نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۶۹-۶۵۱

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 651-669

مقاله علمی-پژوهشی

بهینه‌سازی هوشمند پارامترهای هیدروشیمیایی آب آبیاری برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری

محمّد میرناصری[۱*]، مجتبی خوش‌روش[۲]، لاله دیوبند هفشجانی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۵

چکیده

بهبود مدیریت کیفیت آب آبیاری به‌ویژه در شرایط استفاده از منابع آب غیرمتعارف هم‌چون پساب، از عوامل کلیدی در افزایش پایداری و بهره‌وری سیستم‌های کشاورزی است. این مطالعه با هدف تعیین مقادیر بهینه پارامترهای هیدروشیمیایی آب آبیاری (شامل EC، Na^{+}، SAR، Ca^{2+} و Mg^{2+}) برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای رقم *SC 704* انجام گردید. روش تحقیق در سه فاز اصلی پیاده‌سازی شد: تحلیل اکتشافی و آماری داده‌های خام مزرعه‌ای (۴۵ مشاهده)، برازش و ارزیابی سه مدل رگرسیونی (خطی، اثرات متقابل و درجه دوم) و بهینه‌سازی چندالگوریتمی با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSO) و تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده (SA). نتایج نشان داد مدل رگرسیونی با درنظرگیری اثرات متقابل بین پارامترها با داشتن بالاترین ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) ۹۱/۹۷٪ و کمترین خطا (RMSE) ۰/۳۳۸ تن در هکتار به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. در فرآیند بهینه‌سازی، الگوریتم PSO با میانگین عملکرد پیش‌بینی‌شده ۳۰/۰۶۴ تن در هکتار، نرخ موفقیت ۱۰۰ درصد و بالاترین پایداری، کارایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های GA و SA نشان داد. مقادیر بهینه پیشنهادی توسط الگوریتم‌ها در محدوده‌ای قابل دستیابی در شرایط عملی قرار داشتند. بر اساس تلفیق وزن‌های استخراج‌شده از ماتریس همبستگی پارامترها در منطقه بهینه و مقادیر بهینه‌شده توسط الگوریتم PSO، نسبت اختلاط ۶۲ درصد پساب تصفیه‌شده با ۳۸ درصد آب چاه به‌عنوان نقطه بهینه عملیاتی تعیین شد. نتایج این پژوهش نشان داد که بهینه‌سازی هوشمند ترکیب کیفی آب آبیاری می‌تواند ضمن استفاده پایدار از منابع آب غیرمتعارف هم‌چون پساب، موجب افزایش عملکرد ذرت علوفه‌ای را نیز گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده، الگوریتم ژنتیک، پساب تصفیه‌شده شهری، نسبت جذب سدیم

مقدمه

امنیت غذایی در جهان امروز، خصوصاً در پی تغییرات اقلیمی و افزایش جمعیت، به یکی از کلیدی‌ترین دغدغه‌های جوامع بدل شده است. در این میان، بخش کشاورزی به عنوان تأمین‌کننده اصلی مواد غذایی، با چالش‌های بسیاری مواجه است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به محدودیت منابع آب شیرین اشاره داشت. بر اساس گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO)، بخش کشاورزی بیش از ۷۰٪ از برداشت‌های آب شیرین جهان را به خود اختصاص می‌دهد که لزوم مدیریت بهینه و افزایش راندمان مصرف آب در این بخش را بیش از پیش آشکار می‌سازد (FAO, 2022).

ایران نیز به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک جهان، از این قاعده مستثنی نبوده و بخش کشاورزی آن به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب، نیازمند اتخاذ راهبردهای مدیریتی نوین و پایدار است. در این میان، محصول استراتژیک ذرت (Zea mays L.) با کاربردهای گسترده در تأمین خوراک دام و صنایع غذایی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است که تولید پایدار آن در گرو تأمین منابع آبی مطمئن و باکیفیت خواهد بود. عملکرد مطلوب این گیاه به شدت به تأمین آب در مراحل بحرانی رشد خصوصاً دوره گل‌دهی و پر شدن دانه وابسته است (Ge et al., 2020). با این حال، رویکردهای مرسوم در مدیریت آبیاری این محصول، اغلب بر پایه دانش تجربی و سوابق گذشته استوار بوده و فاقد پشتوانه علمی دقیق و مبتنی بر داده‌های

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زارعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست،دانشگاه شهیدچمران اهواز، اهواز، ایران
(* نویسنده مسئول: Mohammadmirnaseri@yahoo.com)
DOI: 10.22034/idj.2026.580019.2682

بلندمدت اقلیمی، هیدرولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاه است. این امر منجر به اعمال برنامه‌های آبیاری ناکارآمد، افت راندمان مصرف آب[1] و در نهایت، عدم دست‌یابی به عملکرد واقعی می‌شود.

در دهه‌های اخیر، کاربرد روش‌های هوش محاسباتی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی در حل مسائل پیچیده مهندسی آب و مدیریت منابع طبیعی گسترش چشمگیری یافته است (Maier et al., 2019). در این میان الگوریتم ژنتیک (GA) به دلیل توانایی بالا در کاوش فضای گسترده پارامترها و حل مسائل چندهدفه (Goldberg, 1989; Noory et al., 2011; Raju and Kumar, 2004)، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به دلیل همگرایی سریع و پیاده‌سازی آسان در ترکیب با مدل‌های شبیه‌سازی محصول (Jiang et al., 2017; Kennedy and Eberhart, 1995) و تبرید شبیه‌سازی شده (SA)به دلیل توانایی فرار از مینیمم‌های محلی و ساده‌بودن پارامتری (Kirkpatrick et al., 1983; Metropolis et al., 1953)، به طور گسترده در مسائل زمان‌بندی و تخصیص آب به منظور بیشینه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب به کار رفته‌اند (Karahan and Ayvaz, 2015; Montalvo et al., 2008). مطالعات اخیر حاکی از آن است که ادغام الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با مدل‌های شبیه‌سازی محصول، بهبود قابل‌توجهی در بهره‌وری آب ذرت ایجاد می‌کند (Azimi and Azimi, 2019) و نتایج مقایسه‌ای میان الگوریتم‌های تکاملی مختلف، مزیت‌های کاربردی هر روش را در شرایط داده‌محور و محدودیت منابع نشان می‌دهد (Eiben and Smith, 2015).

الگوریتم ژنتیک در سال‌های اخیر در مدیریت آبیاری (Raju and Kumar, 2004)، پیش‌بینی عملکرد محصول (Noory et al., 2011)، بهینه‌سازی کیفیت آب (Zheng et al., 2022)، بهینه‌سازی پارامترهای کیفی آب در استفاده از پساب تصفیه‌شده شهری (شاکری و همکاران، ۱۴۰۴) و شبیه‌سازی انتقال املاح در مجاری آبی (میرناصری و همکاران ۱۴۰۴) موفقیت‌آمیز عمل کرده است.

پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که ادغام PSO با مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول، مانند AquaCrop، امکان بهینه‌سازی زمان‌بندی، مقدار و تخصیص آب آبیاری را فراهم کرده و می‌تواند منجر به افزایش عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در کشت ذرت شود. هم‌چنین مطالعات جدید تأیید می‌کنند که استفاده از نسخه‌های تطبیقی و چندهدفه PSO، به‌ویژه در شرایط محدودیت منابع آبی و تغییر کیفیت آب آبیاری، ابزاری کارآمد برای دستیابی به راهکارهای مدیریتی پایدار در تولید ذرت محسوب می‌شود.

ترکیب SA با شبیه‌سازی مونت‌کارلو مقاومت بهینه‌سازی را در مواجهه با عدم قطعیت‌هایی مانند نوسان قیمت، تقاضا یا هزینه افزایش می‌دهد و مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از SA در برنامه‌ریزی کشت می‌تواند بازده اقتصادی بالاتر نسبت به طرح‌های سنتی ایجاد کند و کارآمدی منابع، از جمله زمین و تنوع محصولات را بهبود بخشد، بنابراین SA چارچوبی مناسب برای بهینه‌سازی بهره‌وری و مدیریت احتمال ریسک در کشت محصولات مهم مانند ذرت فراهم می‌کند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مدل‌های آبیاری در کشت ذرت علوفه‌ای، بیشتر پژوهش‌های موجود یا بر مدیریت کمی آب تمرکز داشته‌اند یا کیفیت آب را به‌صورت مستقل بررسی کرده‌اند و کمتر به تعامل هم‌زمان این دو عامل پرداخته‌اند. همچنین، بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی ارائه‌شده، کیفیت آب آبیاری را به‌عنوان متغیر مؤثر اصلی وارد ساختار مدل نکرده و اغلب فاقد اعتبارسنجی میدانی کافی در شرایط واقعی اقلیمی و خاکی هستند. از سوی دیگر، استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری متداول بدون ادغام مدل‌های فرآیندی رشد گیاه، محدودیت‌هایی در تبیین ارتباط فیزیولوژیک میان کیفیت آب و عملکرد کمی ذرت علوفه‌ای ایجاد کرده است. این کاستی‌ها ضرورت توسعه یک چارچوب یکپارچه، بومی‌سازی‌شده و اعتبارسنجی‌شده را برای بهینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای بر پایه راندمان کیفی آب آبیاری آشکار می‌سازد.

مواد و روش‌ها

طرح کلی پژوهش

این مطالعه با هدف تعیین مقادیر بهینه پارامترهای کیفی آب آبیاری شامل هدایت الکتریک(EC) ، غلظت سدیم (Na^+)، نسبت جذب سدیم (SAR)، غلظت کلسیم (Ca^{2+}) و غلظت منیزیم(Mg^{2+}) به منظور حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای (*Zea mays L.* رقم *SC 704*)، در یک چارچوب روش‌شناختی ترکیبی و چندمرحله‌ای طراحی گردید. این چارچوب شامل سه فاز اصلی متوالی بود: ۱. تحلیل اکتشافی و آماری داده‌های خام مزرعه‌ای، ۲. برازش و ارزیابی مدل‌های ریاضی پیش‌بینی‌کننده عملکرد و ۳. بهینه‌سازی چندالگوریتمی پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و الگوریتم تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده (SA).

اصل راهبردی در سرتاسر این پژوهش، پرهیز از هرگونه میانگین‌گیری یا حذف داده بود تا تمامی تغییرپذیری‌های طبیعی موجود در سیستم زیستی در مدل‌سازی منعکس گردد، رویکردی که صحت برآوردها و قابلیت اطمینان راه‌حل‌های نهایی را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد (Burnham and Anderson, 2002). تمام مراحل پردازش داده و بهینه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB 2014 و بدون استفاده از هیچ تولباکس اختصاصی

1 Water Use Efficiency (WUE)

کدنویسی شد تا شفافیت، کنترل و بازتولیدپذیری کامل فرآیند تضمین گردد.

منطقه مطالعه، طرح آزمایشی و گردآوری داده‌ها

داده‌های این پژوهش از یک آزمایش مزرعه‌ای دقیق و چندساله که توسط پورغلام آمیجی و خوش‌روش (۱۴۰۱) و پورغلام و همکاران (۱۴۰۱) در شرایط اقلیمی مرطوب ناحیه جنوبی دریای خزر (حوزه شهرستان بابلسر، استان مازندران) به اجرا درآمده بود، استخراج گردید. این آزمایش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به صورت فاکتوریل و با سه تکرار در طول سه سال زراعی متوالی (۱۳۹۹ الی ۱۴۰۱) انجام پذیرفته بود .تیمارهای مورد بررسی شامل پنج سطح کیفیت آب آبیاری بودند که از اختلاط نسبت‌های مختلف آب چاه (با کیفیت مطلوب) و پساب شهری تصفیه‌شده (به عنوان یک منبع آب غیرمتداول) تشکیل می‌شدند: الف) W1 تیمار شاهد (۱۰۰ درصد چاه)، ب) W2 تیمار اختلاط ۲۵ درصد پساب و ۷۵ درصد آب چاه، ج) W3 تیمار اختلاط ۵۰ درصد پساب و ۵۰ درصد آب چاه، د) W4 تیمار اختلاط ۷۵ درصد پساب و ۲۵ درصد آب چاه و د) W5 تیمار ۱۰۰ درصد پساب. در مجموع، این ساختار آزمایشی منجر به ایجاد ۴۵ واحد آزمایشی مستقل (۵ تیمار × ۳ تکرار × ۳ سال) گردید. پارامترهای کیفی آب شامل: EC بر حسب ($dS.m^{-1}$)، غلظت یون‌های Na^{+}، Mg^{2+} و Ca^{2+} بر حسب ($meq.L^{-1}$) و نسبت جذب سدیم SAR در ابتدای هر نوبت آبیاری اندازه‌گیری شدند. متغیر وابسته و کلیدی این مطالعه، عملکرد کمی ذرت علوفه‌ای بود که در پایان هر فصل رشد و پس از رسیدگی فیزیولوژیکی کامل، از سطح مفید هر کرت برداشت و وزن تر کل اندام هوایی توزین گردید.

تحلیل آماری اولیه و اکتشاف داده‌ها

پیش از ورود به فاز مدل‌سازی، یک تحلیل اکتشافی جامع و چندبعدی روی مجموعه داده‌های خام ۴۵ گانه انجام پذیرفت تا اطمینان حاصل شود که داده‌ها از کیفیت و یکپارچگی لازم برای تحلیل‌های پیشرفته برخوردار هستند و هم‌چنین شناخت اولیه‌ای از رفتار داده‌ها حاصل شود. این فرآیند با محاسبه شاخص‌های آمار توصیفی برای کلیه متغیرها آغاز گردید. میانگین، میانه، انحراف معیار، خطای استاندارد میانگین، مقادیر کمینه و بیشینه و نیز ضریب تغییرات برای هر یک از پنج پارامتر مستقل (پارامترهای کیفی آب) و متغیر وابسته (عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای) محاسبه شد. به‌منظور بررسی فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها که برای بسیاری از روش‌های آماری امری ضروری است، از ترسیم نمودار میله‌ای توزیع فراوانی همراه با منحنی توزیع نرمال و نیز نمودارهای احتمال نرمال استفاده گردید. به موازات این روش‌های گرافیکی، شاخص‌های عددی چولگی و کشیدگی نیز محاسبه شدند. برای سنجش کمی میزان ارتباط خطی بین کلیه متغیرهای مستقل و وابسته و نیز بررسی احتمال وجود هم‌خطی شدید بین متغیرهای مستقل که می‌تواند بر پایداری برآورد مدل‌های رگرسیونی تأثیر منفی بگذارد، ماتریس همبستگی پیرسون محاسبه و به صورت یک تصویر گرافیکی ارائه گردید (Dormann et al., 2013). علاوه بر این، برای درک بهتر پراکندگی، تمرکز و وجود داده‌های پرت در عملکرد اندازه‌گیری شده برای هر یک از تیمارهای پنج‌گانه، از نمودارهای جعبه‌ای استفاده شد. در نهایت، برای آزمون معناداری آماری اختلاف میانگین عملکرد بین تیمارهای مختلف، از تحلیل واریانس یک‌طرفه استفاده گردید و در صورت مشاهده اختلاف معنادار در سطح ۵٪ (P-Value < 0.05)، از آزمون تعقیبی توکی برای مقایسه‌های زوجی میانگین‌ها بهره گرفته شد.

توسعه و ارزیابی مدل‌های رگرسیونی

هسته مرکزی این پژوهش، توسعه یک مدل ریاضی و قابل اطمینان برای پیش‌بینی عملکرد ذرت علوفه‌ای بر اساس پارامترهای کیفی آب می‌باشد. برای دست‌یابی به این هدف و با در نظر گرفتن ماهیت پیچیده و احتمالاً غیرخطی تأثیر این پارامترها بر رشد گیاه، سه ساختار مختلف مدل رگرسیونی چندمتغیره با درجات متفاوتی از پیچیدگی توسعه داده شد و دقت پیش‌بینی هر یک در یک فرآیند ارزیابی مورد سنجش و مقایسه قرار گرفت:

الف) مدل رگرسیونی خطی: این مدل که ساده‌ترین ساختار ممکن را دارد، رابطه خطی ساده بین هر پارامتر مستقل و متغیر وابسته را فرض می‌کند. فرم کلی این مدل در رابطه (۱) نشان داده شده است:

$$Yield = \beta_0 + \beta_1(EC) + \beta_2(Na) + \beta_3(SAR) + \beta_4(Ca) + \beta_5(Mg) + \varepsilon_1 \quad (۱)$$

در این رابطه عملکرد پیش‌بینی‌شده ذرت علوفه‌ای بر مبنای تن در هکتار، β_0 عرض از مبدا، β_1 تا β_5 ضرایب رگرسیونی مربوط به هریک از پارامترهای مستقل و ε_1 جمله خطای تصادفی مدل است که فرض می‌شود دارای توزیع نرمال با میانگین صفر باشد.

ب) مدل رگرسیونی با اثرات متقابل: این مدل با در نظر گرفتن اثرات متقابل احتمالی بین پارامترهای کیفی آب، امکان برازش روابط پیچیده‌تر و واقعی‌تر را فراهم می‌سازد. در این مدل، علاوه بر جمله‌های خطی، کلیه جملات حاصل از ضرب دو به دوی پارامترها نیز به مدل اضافه خواهند شد. فرم کلی این مدل نیز در رابطه (۲) ارائه شده است:

$$Yield = \beta_0 + \beta_1(EC) + \beta_2(Na) + \beta_3(SAR) + \beta_4(Ca) + \beta_5(Mg) + \beta_6(EC*Na) + \beta_7(EC*SAR) + \beta_8(EC*Ca) + \beta_9(EC*Mg) + \beta_{10}(Na*SAR) + \beta_{11}(Na*Ca) + \beta_{12}(Na*Mg) + \beta_{13}(SAR*Ca) + \beta_{14}(SAR*Mg) + \beta_{15}(Ca*Mg) + \varepsilon_2 \quad (۲)$$

ج) مدل رگرسیونی درجه دوم: این مدل با افزودن جمله‌های درجه دوم برای هر پارامتر، امکان برازش روابط غیرخطی از نوع

سهمی را فراهم کرده و می‌تواند نقاط بهینه (ماکزیمم یا مینیمم) را در فضای پارامترها شناسایی نماید. فرم کلی این مدل در رابطه (۳) نشان داده شده است:

$$Yield = \beta_0 + \beta_1(EC) + \beta_2(Na) + \beta_3(SAR) + \beta_4(Ca) + \beta_5(Mg) + \beta_7(Na^2) + \beta_8(SAR^2) + \beta_9(Ca^2) + \beta_{10}(Mg^2) + \varepsilon_3 \quad (۳)$$

برآورد پارامترها و ارزیابی مدل‌ها

ضرایب ناشناخته تمامی مدل‌های فوق (β_0 تا β_i) با استفاده از روش حداقل مربعات معمولی[1] (OLS) و از طریق محاسبات ماتریسی کارآمد در محیط‌نرم‌افزار MATLAB برآورد گردیدند. در این پژوهش، به منظور انتخاب مدل برتر از بین سه مدل خطی، تعاملات و درجه دوم، از یک چارچوب ارزیابی چندمعیاره مبتنی بر معیارهای آماری استاندارد استفاده شد:

الف) ضریب تعیین (R^2): مقدار نسبت واریانس تبیین‌شده توسط مدل را نشان می‌دهد (رابطه ۴). محدوده قابل‌قبول این معیار در مدل‌های کشاورزی-آب، مقدار بیش‌تر از ۰/۷۰ (خوب) و بیش‌تر از ۰/۹۰ (عالی) در نظر گرفته می‌شود (Legates and McCabe, 1999; Moriasi et al., 2007).

ب) ضریب تعیین تعدیل‌شده (Adjusted R^2): که با اعمال جریمه برای تعداد پارامترهای مدل، امکان مقایسه منصفانه‌تر مدل‌های با پیچیدگی مختلف را فراهم می‌کند (رابطه ۵). محدوده قابل‌قبول برای Adjusted R^2 مشابه R^2 ولی همواره اندکی کم‌تر از آن بوده و مقادیر بالای ۰/۶۵ نشان‌دهنده برازش قابل قبول و بالای ۰/۸۵ نشان‌دهنده برازش عالی است (Hair et al., 2014).

ج) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE): این پارامتر به عنوان معیاری از دقت مطلق پیش‌بینی مدل، بر حسب واحد متغیر وابسته (تن در هکتار) گزارش می‌شود (رابطه ۶). محدوده قابل‌قبول برای RMSE به مقیاس متغیر وابسته بستگی دارد. معمولاً اگر RMSE کمتر از ۱۰ درصد میانگین داده‌های مشاهده‌شده باشد، دقت مدل را می‌توان عالی ارزیابی کرد (Li et al., 2013; Willmott, 1982). در این مطالعه، میانگین عملکرد ذرت علوفه‌ای برابر ۲۱/۵۵ تن در هکتار است، بنابراین RMSE کمتر از ۲/۱۵ تن در هکتار در محدوده قابل قبول و RMSE کمتر از ۰/۵ تن در هکتار در محدوده عالی قرار می‌گیرد.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (۴)$$

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1-R^2)(n-1)}{n-p-1} \quad (۵)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۶)$$

1 Ordinary Least Squares

در این روابط، n تعداد کل داده‌ها، y_i مقدار واقعی عملکرد، $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل، $\bar{y}_i$ میانگین عملکرد واقعی و p تعداد پارامترهای مستقل در مدل می‌باشد.

مدلی که در نهایت بالاترین مقدار ضریب تعیین تعدیل‌شده (R^2_{adj}) و کمترین مقدار RMSE را به دست آورد، به عنوان مدل نهایی انتخاب و مبنای محاسبه تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم‌های ژنتیک، ازدحام ذرات و تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده قرار گرفت (Burnham and Anderson, 2002). صحت مدل نهایی از طریق تحلیل جامع باقیمانده‌ها که شامل بررسی موارد زیر بود: الف) توزیع نرمال باقیمانده‌ها، ب) استقلال خطاها، ج) ثبات واریانس و د) عدم وجود همبستگی، مورد تأیید قرار گرفت.

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک الگوریتم فرااکتشافی الهام‌گرفته از فرآیند تکامل طبیعی، اولین روش بهینه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش بود (Goldberg, 1989). پیاده‌سازی این الگوریتم به‌صورت کاملاً کدنویسی شده و بدون استفاده از جعبه-ابزارهای MATLAB انجام پذیرفت.

هر فرد در جمعیت که یک راه‌حل احتمالی برای مسئله است، به صورت یک کروموزوم[2] با پنج ژن[3] حقیقی نمایش داده شد. این ژن‌ها به ترتیب نمایان‌گر مقادیر پارامترهای EC, Na^+, SAR, Ca^{2+} و Mg^{2+} بودند.

$$\text{Chromosome} = [\text{Gene_EC}, \text{Gene_Na}, \text{Gene_SAR}, \text{Gene_Ca}, \text{Gene_Mg}] \quad (۷)$$

محدوده مجاز برای هر ژن، بر اساس مقادیر حداقل (Min) و حداکثر (Max) مشاهده شده در داده‌های مزرعه‌ای ۴۵ گانه تعریف گردید (جدول (۱)). این محدوده سبب خواهد شد تا اطمینان حاصل شود که راه‌حل‌های تولید شده در محدوده واقعی و قابل دسترس از نظر فیزیکی و تجربی قرار داشته باشند. جمعیت اولیه متشکل از ۵۰ کروموزوم، به صورت کاملاً تصادفی و با توزیع یکنواخت درون محدوده مجاز تعریف شده برای هر پارامتر تولید گردید. در این پژوهش، از مدل رگرسیونی برتر به عنوان تابع هدف استفاده شد که معیار شایستگی هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک بر اساس همین تابع محاسبه گردید. تابع شایستگی برای ارزیابی کیفیت هر کروموزوم، معادل با مقدار خروجی مدل رگرسیونی نهایی در نظر گرفته شد. هدف الگوریتم، بیشینه‌سازی این تابع شایستگی (یعنی عملکرد پیش‌بینی شده ذرت علوفه‌ای) بود.

2 Chromosome
3 Gene

عملگرهای ژنتیکی

انتخاب[1]: از روش انتخاب تورنمنت با اندازه گروه برابر سه استفاده گردید. در این روش، از بین سه کروموزوم انتخاب شده به صورت تصادفی، کروموزومی که بالاترین مقدار شایستگی را داشت، به عنوان والد انتخاب گردید. این روش فشار انتخاب قابل کنترل و مناسبی را اعمال می‌کند.

تقاطع[2]: عملگر تقاطع تک‌نقطه‌ای با نرخ ۰/۸ پیاده‌سازی شد. در این روش، یک نقطه تقاطع به صورت تصادفی بر روی طول کروموزوم انتخاب شده و محتویات ژن‌های پس از آن نقطه بین دو والد مبادله می‌گردید تا دو فرزند جدید ایجاد شود. این عملگر موجب تبادل اطلاعات ژنتیکی بین راه‌حل‌های امیدبخش خواهد شد.

جهش[3]: عملگر جهش غیریکنواخت با نرخ ۰/۱ به کار گرفته شد. در این روش، مقدار یک ژن به صورت تصادفی تغییر می‌یابد، اما دامنه این تغییر با پیشرفت نسل‌ها کاهش می‌یابد. این استراتژی امکان اکتشاف گسترده در مراحل اولیه و بهره‌برداری دقیق‌تر در مراحل پایانی الگوریتم را فراهم می‌سازد و از هم‌گرایی زودرس جلوگیری می‌کند.

نخبه‌گرایی[4]: برای اطمینان از حفظ بهترین راه‌حل‌های یافت‌شده در طول نسل‌ها، از استراتژی نخبه‌گرایی استفاده شد که در آن، دو کروموزوم برتر هر نسل، به صورت مستقیم و بدون تغییر به نسل بعد منتقل می‌گردند. این کار تضمین می‌کند که کیفیت جواب برتر در طول فرآیند تکامل هرگز کاهش نمی‌یابد.

معیار توقف[5]: فرآیند تکامل زمانی متوقف می‌گردید که یا به حداکثر ۱۰۰ نسل مشخص شده رسیده باشیم، یا بهبودی در مقدار تابع شایستگی بهترین کروموزوم طی ۲۰ نسل متوالی مشاهده نشود.

پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) که از رفتار جمعی پرندگان و ماهی‌ها الهام گرفته شده است، دومین الگوریتم بهینه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه بود (Kennedy and Eberhart, 1995). پیاده‌سازی این الگوریتم به صورت کدنویسی کامل و مستقل از جعبه-ابزارهای آماده MATLAB و با در نظرگیری مشخصات مسأله بهینه‌سازی کیفیت آب آبیاری برای حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای انجام گردید.

نمایش و مقداردهی اولیه: هر ذره در این الگوریتم به عنوان یک بردار پنج‌بعدی در فضای جستجو نمایش داده شد که موقعیت آن نمایان‌گر یک مجموعه از مقادیر پارامترهای کیفیت آب Particle_Position = [EC, Na, SAR, Ca, Mg] بوده است. یک جمعیت اولیه متشکل از ۳۰ ذره با موقعیت‌های اولیه تصادفی در محدوده مجاز پارامترها (بر اساس داده‌های واقعی) و همچنین سرعت‌های اولیه تصادفی کوچک، مقداردهی اولیه گردید.

تابع هدف و قیود: تابع شایستگی برابر با مدل رگرسیونی بهینه انتخاب شده (Linear، Interactions یا Quadratic) بود که عملکرد ذرت علوفه‌ای را بر اساس پارامترهای کیفیت آب پیش‌بینی می‌کرد و قیود مسأله نیز همانند الگوریتم ژنتیک (GA) شامل محدوده واقعی پارامترها بوده است (جدول ۱).

حافظه ذرات: هر ذره، بهترین موقعیتی که خود تاکنون تجربه کرده است را در بهترین موقعیت فردی (pBest) ذخیره می‌کند. هم-چنین، بهترین موقعیتی که توسط هر یک از ذرات در کل جمعیت تجربه شده است، به عنوان بهترین موقعیت سراسری (gBest) برای تمامی ذرات شناخته می‌شود.

به‌روزرسانی سرعت و موقعیت: در هر تکرار، سرعت و موقعیت هر ذره i برای بعد d ام بر اساس روابط کلاسیک زیر به‌روزرسانی می‌شوند:

$$v_{id}^{t+1} = w * v_{id}^{t} + c_1 * r_1 * (pBest_{id} - x_{id}^{t}) + c_2 * r_2 * (gBest_{d} - x_{id}^{t}) \quad (۸)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^{t} + v_{id}^{t+1} \quad (۹)$$

در این روابط: v_{id}: سرعت ذره، x_{id}: موقعیت ذره، w: ضریب اینرسی که برای کنترل تاثیر سرعت قبلی ذره به کار می‌رود و در این پژوهش ۰/۷ در نظر گرفته شد، این مقدار تعادل مناسبی بین اکتشاف[6] و بهره‌برداری[7] ایجاد می‌نماید. c_1 و c_2 :به ترتیب ضرایب شناختی[8] و اجتماعی هستند که میزان جذب ذره به سمت pBest و gBestرا کنترل می‌کنند و مقادیر آنها ۱/۵ تنظیم گردید. r_1 و r_2: اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت در بازه [۰ تا ۱].

ارزیابی و به‌روزرسانی: پس از به‌روزرسانی موقعیت‌ها، تابع شایستگی (مدل رگرسیونی) برای هر ذره محاسبه و در صورت لزوم، مقادیر pBest و gBest به‌روز می‌شوند. همچنین برای اطمینان از واقعی بودن جواب‌ها، موقعیت ذرات در محدوده مجاز پارامترها نگه داشته شد.

معیار توقف: الگوریتم PSO پس از ۱۰۰ تکرار یا عدم بهبود در طی ۲۰ تکرار متوالی متوقف گردید.

1 Selection
2 Crossover
3 Mutation
4 Elitism
5 Stopping Criterion

6 Exploration
7 Exploitation
8 Cognitive

پیاده‌سازی الگوریتم تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده

الگوریتم تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده (SA) که بر اساس فرآیند تبرید در متالورژی مدل شده است، سومین الگوریتم این مطالعه بود (Kirkpatrick et al., 1983). این الگوریتم یک روش جستجوی محلیاست که با استفاده از یک مکانیزم احتمالی، از گیر کردن در بهینه‌های محلی جلوگیری می‌کند.

جواب اولیه: الگوریتم با یک جواب اولیه که به صورت تصادفی در فضای جستجو تولید شده بود، آغاز به کار کرد. جواب اولیه در محدوده پارامترهای با مقادیر بالاتر تنظیم شد تا جستجوی نواحی متفاوتی از فضای جستجو تضمین شود.

تابع انرژی[1]: در این الگوریتم، منفی مقدار تابع هدف (یعنی منفی عملکرد پیش‌بینی شده توسط مدل رگرسیونی بهینه) به عنوان تابع انرژی سیستم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، هدف، کمینه‌سازی این تابع انرژی (که معادل بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای است) می‌باشد.

کنترل دما: یک پارامتر کنترل کننده به نام دما (T) تعریف می‌شود که در ابتدا مقدار بالایی (۱۰۰ واحد) دارد و در طول فرآیند به تدریج کاهش می‌یابد. نرخ کاهش دما توسط یک ضریب سردشدگی (α)کنترل می‌گردد که در این پژوهش ۰/۹۵ در نظر گرفته شد. بنابراین دمای جدید در هر مرحله از رابطه $T_{new} = \alpha * T_{old}$ محاسبه می‌شود.

تولید همسایه: در هر مرحله، یک جواب همسایه با اعمال تغییرات تصادفی به جواب فعلی تولید می‌گردد. اندازه گام تغییر برای هر پارامتر با استفاده از رابطه $step = \left(\frac{T}{100}\right) * 0.3 * (max_{range} - min_{range})$ محاسبه شد که در آن T دمای فعلی، عدد ۰/۳ ضریب کنترل‌کننده اندازه گام و max_{range} و min_{range} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل هر پارامتر بر اساس داده‌های واقعی پنج پارامتر مؤثر (EC, Na^+, SAR, $Ca2^+$, Mg^{2+}) هستند (جدول ۱). این رویکرد امکان جستجوی گسترده در دماهای بالا و جستجوی موضعی دقیق در دماهای پایین را فراهم می‌سازد.

معیار پذیرش: اختلاف انرژی (ΔE) بین جواب فعلی و جواب همسایه محاسبه می‌شود. اگر $\Delta E < 0$ باشد (یعنی جواب همسایه همیشه پذیرفته می‌شود. حتی اگر $\Delta E > 0$ باشد (یعنی جواب همسایه بدتر باشد)، این جواب با احتمالی مطابق با معیار متروپلیس $P(accept) = \exp(\frac{-\Delta E}{T})$ پذیرفته می‌شود (Metropolis et al., 1953). این مکانیزم، امکان خروج از بهینه‌های محلی را در مراحل اولیه فراهم می‌سازد.

معیار توقف: فرآیند زمانی متوقف می‌گردید که دمای سیستم به زیر یک واحد کاهش یابد یا حداکثر ۲۰۰ تکرار انجام شود. این الگوریتم برای مسأله بهینه‌سازی کیفیت آب آبیاری با و با هدف حداکثرسازی عملکرد ذرت علوفه‌ای پیاده‌سازی گردید.

ارزیابی مقایسه‌ای، تحلیل همگرایی و تحلیل حساسیت

پس از اتمام فرآیند بهینه‌سازی توسط هر سه الگوریتم، یک ارزیابی جامع و مقایسه‌ای برای سنجش کارایی نسبی آن‌ها انجام شد. معیارهای اصلی این ارزیابی عبارت بودند از: (۱) بهترین مقدار تابع هدف نهایی (بالاترین عملکرد پیش‌بینی شده ذرت علوفه‌ای)، (۲) سرعت همگرایی که با ترسیم منحنی‌های همگرایی جداگانه برای هر الگوریتم مورد بررسی قرار گرفت و (۳) درصد بهبود جواب بهینه هر الگوریتم نسبت به بهترین تیمار آزمایشگاهی موجود در داده‌ها.

منحنی‌های همگرایی برای هر سه الگوریتم به صورت جداگانه ترسیم و مقایسه شدند. این منحنی‌ها روند تغییرات بهترین مقدار تابع هدف را بر حسب تعداد تکرارها نشان داده و رفتار همگرایی متفاوت هر الگوریتم در مسأله بهینه‌سازی کیفیت آب آبیاری را به وضوح نمایان می‌سازند.

در ادامه، یک تحلیل حساسیت ساختاریافته بر روی جواب بهینه هر سه الگوریتم به صورت مجزا انجام گرفت. در این تحلیل، مقدار هر یک از پنج پارامتر کیفیت آب (EC, Na^+, SAR, Ca^{2+}, Mg^{2+}) در جواب بهینه، به صورت مجزا و با اعمال یک آشفتگی مشخص (مقدار ۵٪ از محدوده تغییرات هر پارامتر) تغییر داده شد و تأثیر این تغییر بر مقدار تابع هدف (عملکرد پیش‌بینی شده ذرت علوفه‌ای) محاسبه گردید.

بر این اساس، معیارهای زیر برای هر پارامتر محاسبه شد:

الف) حساسیت مطلق: $S_{abs} = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i}$

که در آن: ΔY تغییر در عملکرد پیش‌بینی شده ذرت علوفه‌ای ($ton.ha^{-1}$) ناشی از تغییر در پارامترهای کیفیت آب و ΔX_i تغییر اعمال شده در پارامتر i ام می‌باشد.

ب) حساسیت نسبی (کشش): $E = \frac{\frac{\Delta Y}{Y}}{\frac{\Delta X_i}{X_i}}$

که در آن: Y مقدار عملکرد کمی ذرت علوفه‌ای در نقطه بهینه (ton.ha-1) و X_i مقدار پارامتر i ام در نقطه بهینه است.

ج) اهمیت نسبی: $\text{Importance} = \frac{|S_{abs}|}{\max(|S_{abs}|)}$

پارامترها بر اساس میانگین اهمیت نسبی در بین سه الگوریتم رتبه‌بندی شدند. این تحلیل به وضوح نشان خواهد داد که کنترل کدام پارامتر در مدیریت عملیاتی آب آبیاری از اولویت بیشتری برخوردار است و کدام پارامتر بیشترین تأثیر را بر عملکرد نهایی ذرت علوفه‌ای خواهد داشت.

1 Energy Function

نتایج و بحث

تحلیل آماری اکتشافی داده‌های مزرعه‌ای

پیش از ورود به فاز مدل‌سازی، یک تحلیل اکتشافی جامع روی مجموعه داده‌های خام ۴۵ گانه (متشکل از ۵ تیمار کیفیت آب، ۳ تکرار و ۳ سال زراعی) انجام شد تا از کیفیت و یکپارچگی داده‌ها اطمینان حاصل شود. آمار توصیفی کلیه پارامترهای مستقل و وابسته در جدول (۱) خلاصه شده است. میانگین کلی عملکرد ذرت علوفه‌ای در کل دوره آزمایش ۲/۳۸±۲۱/۵۵ تن در هکتار (میانگین ± انحراف معیار) بود. بالاترین عملکرد در تیمار I5 (۱۰۰٪ پساب) با میانگین ۲۴/۵۸ تن در هکتار و کم‌ترین عملکرد در تیمار I1 (۱۰۰٪ آب چاه) با میانگین ۱۸/۵۰ تن در هکتار بودند. اختلاف زیاد بین میانگین عملکرد تیمارها (بیش از ۶ تن در هکتار) نشان‌دهنده تأثیر قوی کیفیت آب آبیاری بر عملکرد ذرت علوفه‌ای است. ضریب تغییرات (CV) عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای در بین تیمارها بین ۱/۱۵٪ برای تیمار I4 تا ۲/۲۵٪ برای تیمار I1 متغیر بود که نشان‌دهنده پایداری خوب داده‌ها و کنترل دقیق عملیات مزرعه‌ای است.

جدول ۱ - آمار توصیفی پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای در دوره آزمایش

پارامتر	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار
هدایت الکتریکی ($dS.m^{-1}$)	۰/۵۷	۱/۱۸	۰/۸۷	۰/۱۹
غلظت سدیم ($meq.L^{-1}$)	۱/۶۵	۱۲/۲۱	۶/۹۴	۳/۶۶
نسبت جذب سدیم (-)	۱/۰۴	۲/۵۴	۱/۷۹	۰/۵۴
غلظت کلسیم ($meq.L^{-1}$)	۲/۸۶	۴/۵۵	۳/۷۱	۰/۵۳
غلظت منیزیم ($meq.L^{-1}$)	۲/۱۰	۴۱/۶۰	۲۱/۸۵	۱۴/۰۵
عملکرد ذرت ($ton.ha^{-1}$)	۱۸/۱۶	۲۵/۰۷	۲۱/۵۵	۲/۳۸

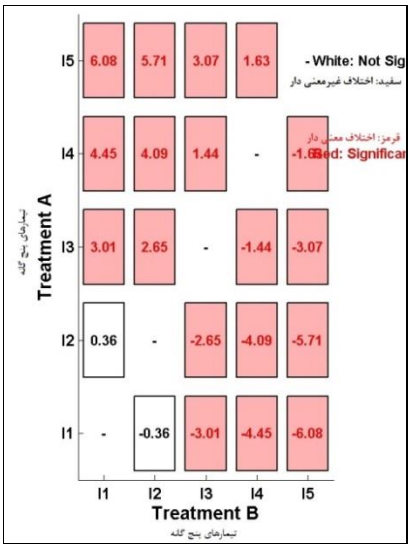
تحلیل واریانس یک‌طرفه روی داده‌های عملکرد ذرت علوفه‌ای نشان داد که کیفیت آب آبیاری اثر معنی‌داری بر عملکرد داشته است ($P<0.05$). آزمون تعقیبی توکی نیز به‌عنوان روش مقایسه زوجی میانگین‌ها، اختلاف‌های معنی‌دار بین تیمارهای مختلف را آشکار ساخت. همان‌گونه که در شکل (۱) مربوط به ماتریس تفاوت‌های معنی‌دار مشاهده می‌شود، بخش قابل‌توجهی از مقایسه‌ها به‌غیر از تیمارهای I1 و I2 نسبت به‌هم، دارای اختلاف آماری معنی‌دار بوده‌اند، به‌ویژه در تیمارهایی که سهم پساب افزایش یافته است. این نتایج بیان‌گر آن است که داده‌های گردآوری‌شده از آزمایش مزرعه‌ای دارای قدرت تفکیک کافی بوده و تغییرات مشاهده‌شده در عملکرد کمی گیاه صرفاً ناشی از نوسانات تصادفی نیستند، بلکه بازتابی از اثر واقعی کیفیت آب آبیاری بر رشد و عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای بوده است. این بررسی‌ها نشان می‌دهند که داده‌های حاصل از این آزمایش نه تنها از نظر آماری معتبر هستند، بلکه به‌عنوان ورودی‌های مناسب برای فرآیند مدل‌سازی و بهینه‌سازی پارامترهای هیدروشیمیایی آب آبیاری نیز قابل استفاده هستند. وجود اختلاف‌های معنی‌دار بین تیمارها تضمین می‌کند که الگوریتم‌های فراابتکاری به‌کاررفته در این پژوهش (GA، PSO و SA) بر پایه داده‌هایی با تنوع و حساسیت کافی عمل کرده و نتایج بهینه‌سازی نیز از قابلیت اعتماد و کاربرد عملی بالایی برخوردار می‌باشند.

گزینش مدل ریاضی بهینه

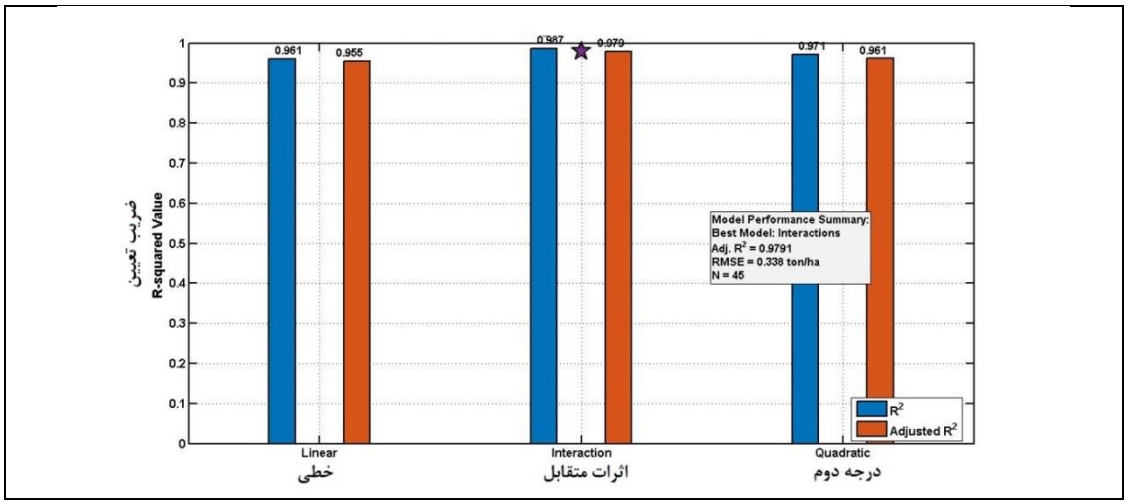
در گام دوم و به منظور تدوین یک رابطه ریاضی قابل اطمینان برای پیش‌بینی عملکرد بر اساس پنج پارامتر مستقل کیفی آب، سه ساختار رگرسیونی با سطوح مختلف پیچیدگی مورد آزمون قرار گرفت: ۱) مدل خطی ساده، ۲) مدل با اثرات متقابل و ۳) مدل درجه دوم کامل. نتایج ارزیابی این مدل‌ها با معیارهای آماری چندگانه در شکل (۲) نشان داده شده است. نتایج به وضوح نشان داد که مدل اثرات متقابل با داشتن بالاترین ضریب تعیین تعدیل‌شده ($R^2\approx0.92$) و کمترین خطای پیش‌بینی ($RMSE = 0.338$ ton/ha)، از برتری برخوردار است. این برتری نشان می‌دهد که روابط بین پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای، صرفاً از نوع خطی یا سهموی ساده نیست، بلکه اثرات متقابل پیچیده‌ای بین این فاکتورها وجود دارد که مدل مذکور موفق به ثبت آن شده است. برای مثال، ممکن است اثر شوری (EC بالا) در حضور غلظت‌های مختلف کلسیم (Ca^{2+}) متفاوت باشد، که تنها با درج جمله تعاملی EC×Ca در مدل قابل توصیف است.

برتری مدل‌های دارای جمله‌های تعاملی در توصیف پاسخ‌های زیستی به تنش‌های ترکیبی، در مطالعات مختلف تأیید شده است. Dormann et al., 2013 بر اهمیت در نظر گرفتن تعاملات بین متغیرهای محیطی برای جلوگیری از نتایج گمراه‌کننده در مدل‌سازی اکولوژیکی تأکید کرده‌اند. این مفهوم در حوزه تغذیه گیاه نیز صادق است، جایی که تعادل و نسبت بین عناصر غذایی اغلب تأثیر قوی‌تری

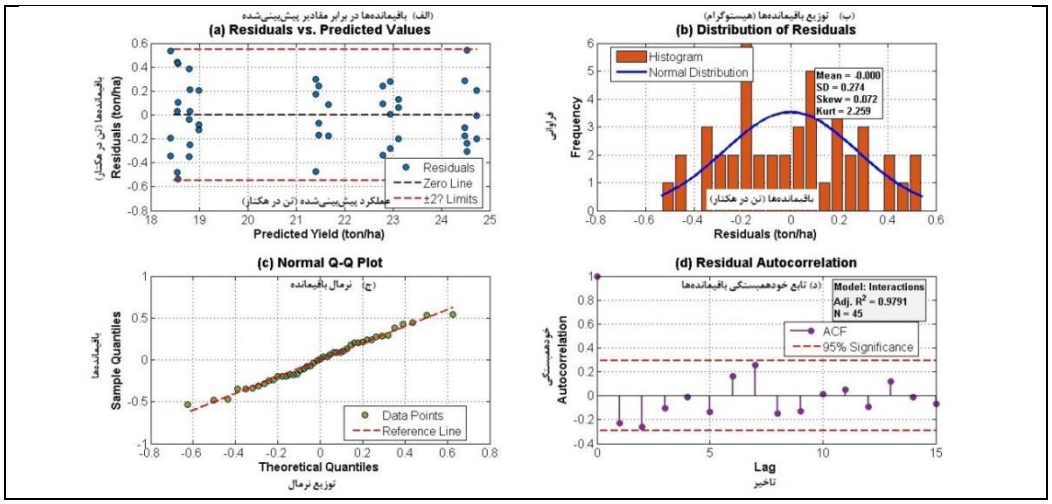
از غلظت مطلق هر یک از آنها بـر رشـد و عملکـرد گیـاه دارد. بـرای نمونه، نسبت‌های مهمی مانند کلسیم به منیزیم (Ca:Mg) یـا سـدیم به کلسیم (Na:Ca) به‌طور گسترده‌ای به عنوان شاخص‌هایی کلیدی برای ارزیابی تـنش شـوری، قلیاییـت و کیفیـت خـاک و آب شـناخته می‌شوند (Wright et al., 2019). مدل‌سازی این روابط تعاملی برای پیش‌بینی دقیق‌تر پاسـخ گیـاه ضـروری اسـت. صـحت‌سـنجی مـدل منتخب از طریق تحلیل جامع باقیمانده‌ها شکل (۳) انجام شـد. نتـایج نشان داد که باقیمانده‌ها از نظر توزیع تقریباً نرمـال (نمودارهـای ب و ج)، استقلال زمانی (نمودار د) و همسـانی واریـانس و فقـدان الگـوی سیستماتیک (نمودار الف) برخوردارند. بنـابراین مفروضـات کلاسـیک رگرسیون برقرار است و مدل اثرات متقابل به‌عنوان تابع هدف معتبر و یکسان برای مقایسه منصفانه کارایی سه الگوریتم بهینه‌سـازی (GA، PSO و SA) در مرحله بعد انتخاب شد.



شکل ۱ - ماتریس اختلاف‌های معنی‌دار بین تیمارهای کیفیت آب آبیاری بر اساس آزمون توکی



شکل ۲- ارزیابی مدل‌های رگرسیونی با معیارهای آماری



شکل ۳ - تحلیل جامع باقیمانده‌ها برای مدل رگرسیونی اثرات متقابل

ارزیابی تطبیقی الگوریتم‌های فراابتکاری

هدف این بخش از پژوهش، صرفاً یافتن یک مجموعه پارامتر بهینه نمی‌باشد بلکه مقایسه قابلیت‌های سه الگوریتم فراابتکاری پرکاربرد ژنتیک (GA)، ازدحام ذرات (PSO) و تبرید تدریجی شبیه‌سازی‌شده (SA) در حل این مسئله خاص بوده است. برای اطمینان از قابلیت اطمینان آماری نتایج و کاهش وابستگی به نقطه شروع تصادفی، هر الگوریتم به صورت مستقل ۱۰ بار اجرا گردید. معیارهای ارزیابی نیز فراتر از صرفاً بهترین مقدار تابع هدف (عملکرد کمی ذرت علوفه‌ای) توسعه داده شد و شاخص‌های جامعی مانند پایداری (Stability)، قابلیت اطمینان (Reliability) ، سرعت همگرایی (Convergence Speed) و کارایی محاسباتی (Efficiency)محاسبه شدند. خلاصه‌ای از نتایج مقایسه جامع معیارهای عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی در جدول (۲) ارائه شده است.

نتایج این ارزیابی چندمعیاره به وضوح نشان داد که الگوریتم PSO با کسب بالاترین امتیاز کلی ۰/۷۱۸، خود را به عنوان کارآمدترین گزینه معرفی کرد. میانگین عملکرد پیش‌بینی شده توسط بهترین راه‌حل‌های PSO در ۱۰ اجرا، ۳۰/۰۶۴ تن در هکتار بود که بیانگر افزایش قابل توجه ۲۲/۳۱٪ نسبت به بهترین تیمار مزرعه‌ای (I5) با ۲۴/۵۸ تن در هکتار است. اما امتیاز برتر PSO تنها به علت این عملکرد بالا نبوده و این الگوریتم به نرخ موفقیت ۱۰۰٪ (یعنی در همه ۱۰ اجرا به جوابی بسیار نزدیک به بهینه سراسری دست یافت) و بالاترین شاخص پایداری (۱۳۸۸/۰۹۴) دست یافت که نشان‌دهنده حداقل پراکندگی و بیش‌ترین اطمینان‌پذیری در نتایج آن است. در مقابل، اگرچه الگوریتم SA سریع‌ترین زمان اجرا (۰/۰۱۰) را داشت، اما نرخ موفقیت و پایداری پایین‌تری (به ترتیب ۹۰٪ و ۵/۷۵۹) نشان داد که حاکی از حساسیت بیش‌تر به نقطه شروع و احتمال بالاتر گیرکردن در بهینه‌های محلی می‌باشد. الگوریتم GA نیز با امتیاز کلی ۰/۴۳۵ و نرخ موفقیت ۸۰٪، عملکردی ضعیف‌تر نسبت به دو الگوریتم دیگر از خود نشان داد. شکل (۴) ماتریس رتبه‌بندی عملکرد الگوریتم‌های سه‌گانه را از نظر: الف) میانگین بهترین عملکرد، ب) نرخ موفقیت، ج) پایداری، د) کارایی و ه) سرعت همگرایی را نشان می‌دهد. اساس طبقه‌بندی رتبه‌ای در این ماتریس بدین‌صورت در نظر گرفته شد که هر رتبه سوم برابر یک امتیاز، رتبه دوم برابر دو امتیاز و هر رتبه اول برابر سه امتیاز برای آن الگوریتم در هر یک از عملکرد-های پنج‌گانه فوق در نظر گرفته شد. نتایج این رتبه‌بندی نشان داد که الگوریتم PSO با ۱۱ امتیاز در جایگاه نخست، الگوریتم GA با ۱۰ امتیاز در جایگاه دوم و نهایتاً الگوریتم SA با ۹ امتیاز نیز در جایگاه سوم عملکردی قرار گرفت.

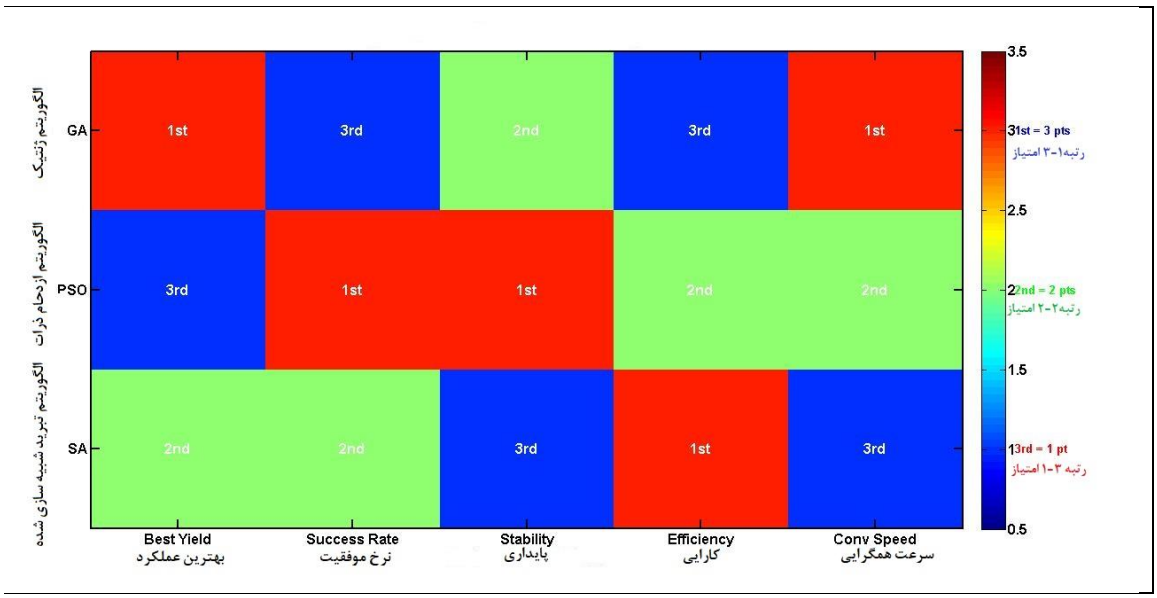
برتری PSO در این مسئله را می‌توان با مکانیسم جستجوی آن توجیه کرد. الگوریتم PSO با به‌روزرسانی هم‌زمان موقعیت ذرات بر اساس بهترین تجربه فردی (pBest) و بهترین تجربه جمعی (gBest)، تعادل بهینه‌ای بین اکتشاف فضای جستجو و بهره‌برداری از نواحی امیدبخش ایجاد می‌کند. این ویژگی به‌ویژه در مسائل با فضای جستجوی پیوسته و دارای تعاملات غیرخطی (مانند مدل رگرسیونی Interactions این پژوهش) بسیار سودمند است. این یافته با نتایج گسترده‌ای که بر کارایی و استحکام بالای PSO در مسائل بهینه‌سازی منابع آب و کشاورزی تأکید دارند، هم‌سو است (Jiang et al., 2017). هم‌گرایی یکنواخت و سریع PSO با سرعت همگرایی ۱/۴ و قابلیت اطمینان ۹۹/۹۲۸٪ نیز تأییدکننده این ادعاست. از سوی دیگر، عملکرد نسبتاً ضعیف‌تر GA می‌تواند ناشی از ماهیت گسسته‌تر عملگرهای آن (مانند تقاطع و جهش) در مواجهه با فضای پارامتر پیوسته باشد، هرچند این الگوریتم نرخ موفقیت قابل قبول ۸۰٪ را حفظ کرده و صرفاً این موضوع را در قیاس با PSO می‌توان بیان

داشت. الگوریتم SA اگرچه از نظر زمانی بسیار کارآمد بود، اما انحراف معیار بالای عملکرد (۴/۹۵۲) نشان می‌دهد که در برخی اجراها در بهینه‌های محلی با کیفیت پایین‌تر گیر کرده است. شکل (۵) توزیع عملکرد بهینه در اجراهای متعدد (تن در هکتار) برای هر سه الگوریتم را نشان می‌دهد. نمودار توزیع عملکرد در ۱۰ اجرا نشان داد که PSO دارای کمترین پراکندگی و بیشترین تمرکز حول مقدار بهینه است، در حالی که SA دارای پراکندگی بسیار بالاتری (علامت‌های + قرمزرنگ در فضای نمودار) بود که نشان‌دهنده حساسیت بیشتر آن به نقطه شروع و احتمال گیرکردن در بهینه‌های محلی است که این مقدار تا تا ۱۴/۴۲۴ تن در هکتار نیز کاهش داشته است. این یافته با نتایج کندی و ابرهارت (Kennedy and Eberhart, 1995) که پایداری و قابلیت اطمینان بالای PSO در حل مسائل بهینه‌سازی پیوسته را گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد.

بررسی نتایج جدول (۲) در خصوص عملکرد بهینه برآوردی هر سه الگوریتم (GA، PSO و SA) نشان از بهبود عملکرد ذرت علوفه‌ای ۲۲/۱۰٪ در الگوریتم PSO، ۱۹/۸۰٪ در الگوریتم GA و ۱۵/۲۰٪ در الگوریتم SA نسبت به بهترین تیمار مزرعه‌ای (۱۰۰٪ پساب) و همچنین افزایش حدوداً ۵۷/۹۰٪ در الگوریتم GA، ۶۱/۷۰٪ در الگوریتم PSO و ۵۳/۴۰٪ در الگوریتم SA نسبت به تیمار شاهد (آبیاری با آب چاه) با ۱۸/۵۹ تن در هکتار داشته است.

جدول ۲- مقایسه جامع معیارهای عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی (مقادیر میانگین و انحراف معیار از ۱۰ اجرای مستقل)

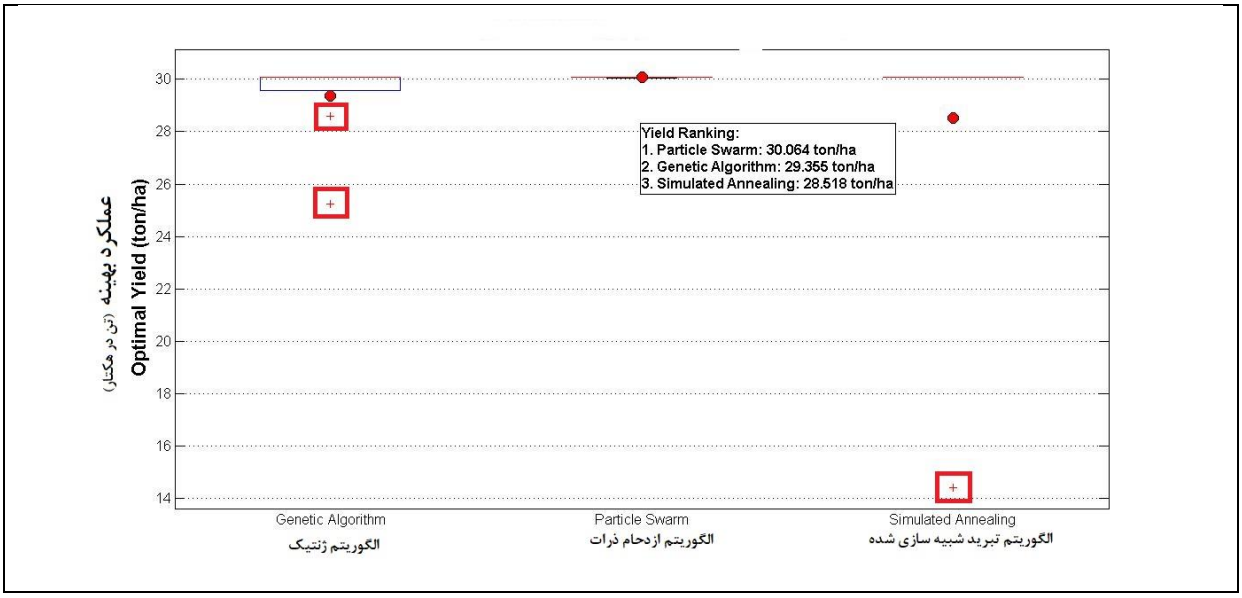
معیار	GA	PSO	SA
میانگین عملکرد (تن در هکتار)	۲۹/۳۵۵±۱/۵۲۵	۳۰/۰۶۴±۰/۰۲۲	۲۸/۵۱۸±۴/۹۵۲
میانگین زمان اجرا (ثانیه)	۰/۱۰۸±۰/۰۳۲	۰/۰۶۰±۰/۰۱۲	۰/۰۱۰±۰/۰۰۳
میانگین تعداد تکرارها	۲۶/۱±۱۳/۴۹	۴۰/۲±۹/۸۹	۴۳/۰±۰۰/۰۰
نرخ موفقیت (٪)	۸۰	۱۰۰	۹۰
شاخص پایداری	۱۹/۲۵۳	۱۳۸۸/۰۹۴	۵/۷۵۹
سرعت همگرایی (تکرار)	۱/۴	۱/۴	۱/۵
کارایی (عملکرد بر ثانیه)	۲۷۱/۳۶۲	۵۰۰/۸۹۳	۲۷۵۱/۶۵۹
امتیاز نهایی	۰/۴۳۵	۰/۷۱۸	۰/۵۵۷



شکل ٤ - ماتریس رتبه‌بندی عملکرد الگوریتم‌ها

تحلیل فضای پارامترهای بهینه

نتایج اجرای مستقل سه الگوریتم بهینه‌سازی بر روی مدل رگرسیونی برتر (Interactions)، در جدول (۳) ارائه شده است. این جدول امکان مقایسه دقیق بین راه‌حل‌های پیشنهادی هر الگوریتم را فراهم ساخته و همچنین هم‌پوشانی‌ها و تفاوت‌های بین آن‌ها را آشکار می‌سازد.



شکل ۵ - توزیع عملکرد بهینه اجراهای مختلف الگوریتم‌ها

جدول ۳ - مقایسه جامع مقادیر بهینه پارامترهای کیفی آب پیشنهادی توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی

پارامتر (واحد)	محدوده بهینه	SA مقدار بهینه	PSO مقدار بهینه	GA مقدار بهینه
EC ($dS.m^{-1}$)	۰/۴۱	۰/۶۸	۰/۹۹	۱/۰۹
Na^{+} ($meq.L^{-1}$)	۴/۰۳	۹/۴۸	۱۰/۱۷	۶/۱۴
SAR	۰/۹۰	۲/۲۱	۱/۳۶	۲/۲۶
Ca^{2+} ($meq.L^{-1}$)	۰/۶۶	۳/۶۳	۴/۱۷	۴/۲۹
Mg^{2+} ($meq.L^{-1}$)	۹/۷۹	۱۳/۰۶	۲۱/۲۷	۲۲/۸۵
عملکرد بهینه (تن در هکتار)	۰/۰۰۲	۳۰/۰۸۲	۳۰/۰۸۴	۳۰/۰۸۴

نکته اول و حائز اهمیت، همگرایی قابل توجه هر سه الگوریتم به سمت یک عملکرد پیش‌بینی شده بسیار مشابه و در حدود ۳۰/۰۸ تن در هکتار است. این همگرایی، علی‌رغم تفاوت‌های اساسی در مکانیسم جستجوی الگوریتم‌های ژنتیک (جستجوی مبتنی بر جمعیت و تکامل)، ازدحام ذرات (بهینه‌سازی مبتنی بر رفتار جمعی) و تبرید تدریجی (جستجوی احتمالی مبتنی بر کاهش دما)، اعتبار درونی بالای مدل رگرسیونی Interactions و نیز صحت فرآیند بهینه‌سازی را به وضوح تأیید می‌کند. این یافته با اصول نظریه بهینه‌سازی که بیان می‌دارد الگوریتم‌های کارآمد باید قادر به یافتن نقاط بهینه سراسری یا بسیار نزدیک به آن در یک فضای پاسخ معین باشند، سازگار است (Goldberg, 1989).

تفاوت عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی

ارزیابی جامع الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مطالعات پژوهشی می‌بایست فراتر از گزارش یک مقدار بهینه منفرد باشد و این موضوع نیازمند بررسی معیارهای چندگانه تحت شرایط شروع تصادفی مختلف می‌باشد (Eiben and Smith, 2015). در این پژوهش، برای ایجاد درکی عمیق‌تر از رفتار هر الگوریتم، نتایج به دو شکل مکمل ارائه شده‌اند که هریک جنبه متفاوتی از کارایی را روشن می‌سازد. در جدول (۲)، معیارهای عملکرد جامع هریک از الگوریتم‌ها همراه با معیارهای آماری حاصل از ۱۰ اجرای مستقل هر الگوریتم با نقاط شروع تصادفی متفاوت را خلاصه می‌کند. در مقابل، جدول (۳) (مقایسه پارامترهای بهینه)، بهترین جواب مطلق یافت‌شده[1] هر الگوریتم در طی تمامی این اجراهای ده‌گانه را نمایش می‌دهد. این مقادیر نمایانگر توانایی اوج‌یابی[2] هر الگوریتم هستند؛ یعنی بهترین نقطه‌ای که الگوریتم در مطلوب‌ترین شرایط جستجوی خود قادر به یافتن آن بوده است. این معیار، حداکثر پتانسیل الگوریتم را بدون در

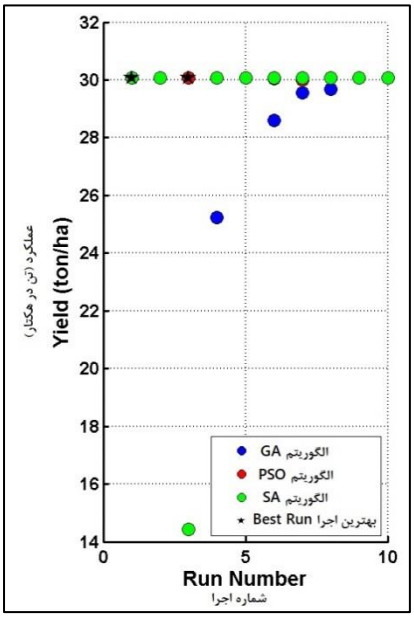
1- Absolute Best Solution
2- Peak-Finding Capability

نظر گرفتن نوسانات ناشی از نقطه شروع، نشان می‌دهد.

مقایسه بین داده‌های این دو جدول، بیان‌گر نقاط قوت و ضعف هر الگوریتم است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) با میانگین عملکرد ۳۰/۰۶۴ تن در هکتار و انحراف معیار بسیار پایین ۰/۰۲۲، نه تنها بالاترین میانگین را داراست، بلکه پایدارترین نتایج را نیز ارائه می‌دهد. این امر با نرخ موفقیت ۱۰۰٪ و بالاترین شاخص پایداری (حدوداً ۱۳۸۸/۱) در همین جدول تأیید می‌گردد. هم‌چنین نتایج جدول (۳) نیز نشان می‌دهد که بهترین جواب یافت‌شده توسط PSO نیز به مقدار ۳۰/۰۸۳ تن در هکتار می‌رسد. این همخوانی نزدیک بین میانگین عملکرد و بهترین عملکرد (تفاوت تنها ۰/۰۲ تن در هکتار)، بیان‌کننده قابلیت اطمینان بالای الگوریتم PSO در این مسئله خاص بوده و نشان می‌دهد این الگوریتم تقریباً بدون توجه به نقطه آغازین، همواره به منطقه بهینه سراسری همگرا می‌شود.

الگوی عملکرد الگوریتم تبرید تدریجی شبیه‌سازی شده (SA) کاملاً متفاوت است. همان‌طور که در جدول (۳) دیده می‌شود، SA در بهترین اجرای خود قادر به یافتن جوابی با عملکرد ۳۰/۰۸۴ تن در هکتار بوده که از نظر ارزش تابع هدف، کاملاً با بهترین جواب PSO و GA برابری می‌کند. این نشان می‌دهد که SA از قابلیت اوج‌یابی بالقوه بالایی برخوردار است. با این حال، نگاهی به نتایج جدول (۲) نشان می‌دهد که میانگین عملکرد SA تنها ۲۸/۵۱۸ تن در هکتار با انحراف معیار بسیار بالا (۴/۹۵۲) است. این تفاوت بین بهترین عملکرد و میانگین عملکرد در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل، پراکندگی اجراهای فردی قابل مشاهده است، جایی که نتایج SAبه طور گسترده‌ای بین حدود ۱۴ تا ۳۰ تن در هکتار پراکنده شده‌اند. این الگوی رفتاری، مشخصه ذاتی SA است. اگرچه مکانیسم پذیرش احتمالی آن امکان خروج از بهینه‌های محلی را فراهم می‌سازد و می‌تواند به نقطه بهینه سراسری برسد، اما عملکرد نهایی آن به شدت وابسته به پارامترهای تنظیمی (مانند نرخ سردشدن) و نقطه شروع تصادفی است (Kirkpatrick et al., 1983). البته این امکان نیز وجود دارد که این الگوریتم در بسیاری از اجراها در بهینه‌های محلی با کیفیت پایین‌تر گیر کند، که موجب کاهش چشمگیر میانگین و افزایش پراکندگی نتایج می‌گردد.

الگوریتم ژنتیک (GA) نیز تصویری مشابه الگوریتم SA اما با شدت کمتر ارائه می‌دهد. بهترین جواب آن در نتایج جدول (۳)، ۳۰/۰۸۴ تن در هکتار است، اما میانگین عملکرد آن در جدول (۲)، ۲۹/۳۵۵ تن در هکتار بوده که این مقدار پایین‌تر از PSO و با پراکندگی بیشتری (انحراف معیار ۱/۵۲۵) همراه است. این نشان می‌دهد که اگرچه GA یک جستجوگر قوی است، اما قابلیت اطمینان و تکرارپذیری آن در این مسئله خاص، در سطح الگوریتم PSO نبوده و تقریباً شرایط بینابینی در مجموع این سه الگوریتم بهینه‌سازی دارد.



شکل ٦ - مقایسه عملکرد اجراها در هر یک از الگوریتم‌ها

در نتیجه، این مقایسه‌ها تأکید می‌کند که انتخاب یک الگوریتم بهینه‌سازی باید بر اساس نیازمندی‌های مسئله باشد. اگر هدف، دستیابی مطمئن و تکرارپذیر به یک جواب با کیفیت بسیار بالا بدون حساسیت به شرایط اولیه باشد که معمولاً در مدیریت عملیات آبی در مزرعه نیز همین مسأله انتظار می‌رود، الگوریتم PSO با توجه به تلفیق بی‌نظیر اوج قابلیت و پایداری، گزینه برتر است. با این حال، اگر

هدف کاوش گسترده فضای جستجو و یافتن بهترین نقطه ممکن صرف‌نظر از تعداد دفعات اجرا باشد، الگوریتم SA نیز می‌تواند مورد توجه قرار گیرد، هرچند که برای کاربردهای عملی نیازمند تنظیم دقیق و احتیاط بیشتر است.

شناسایی پارامترهای کلیدی بهینه کیفیت آب

نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد که پارامتر EC، در محدوده‌ای نسبتاً کم (۰/۶۸ تا ۱/۰۹ $dS.m^{-1}$) الگوریتم‌ها بهینه تشخیص داده شده که نشان‌دهنده وجود یک آستانه بهینه مشخص برای شوری آب آبیاری ذرت علوفه‌ای است. این محدوده کاملاً در چارچوب محدوده مجاز و تجربی (۰/۵۷ تا ۱/۱۸ $dS.m^{-1}$) دارد و با یافته‌های پژوهش‌های دیگر که محدوده مطلوب EC برای ذرت علوفه‌ای را بین ۰/۷ تا ۱/۲ $dS.m^{-1}$ گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی داد (Maas and Hoffman, 1977).

بر اساس داده‌های جدول (۳)، محدوده تغییر در مقادیر بهینه بین سه الگوریتم متعلق به یون سدیم (Na^+) با دامنه ۴/۰۳ $meq.L^{-1}$ است. الگوریتم ژنتیک (GA) مقدار بهینه ۶/۱۴ $meq.L^{-1}$ پیشنهاد می‌دهد، در حالی که الگوریتم‌های ازدحام ذرات (PSO) و تبرید تدریجی(SA) به ترتیب مقادیر ۱۰/۱۷ و ۹/۴۸ $meq.L^{-1}$ بهینه تشخیص داده‌اند.

این پراکندگی لزوماً نشانه ناسازگاری نبوده بلکه می‌تواند ناشی از سه عامل اصلی باشد: الف) تحمل نسبی رقم ذرت 704 SC به سدیم: گستره نسبتاً وسیع مقادیر بهینه سدیم (حدوداً ۶ تا ۱۰ $meq.L^{-1}$) می‌تواند حاکی از تحمل قابل توجه این رقم به حضور سدیم باشد، مشروط بر اینکه سایر پارامترها (خصوصاً کلسیم و منیزیم) در سطوح مطلوب خود قرار گیرند. این نتایج بهینه با گزارش‌های مربوط به تنوع ارقامی در تحمل به شوری و سدیم همخوانی دارد (Cakmak, 2005).

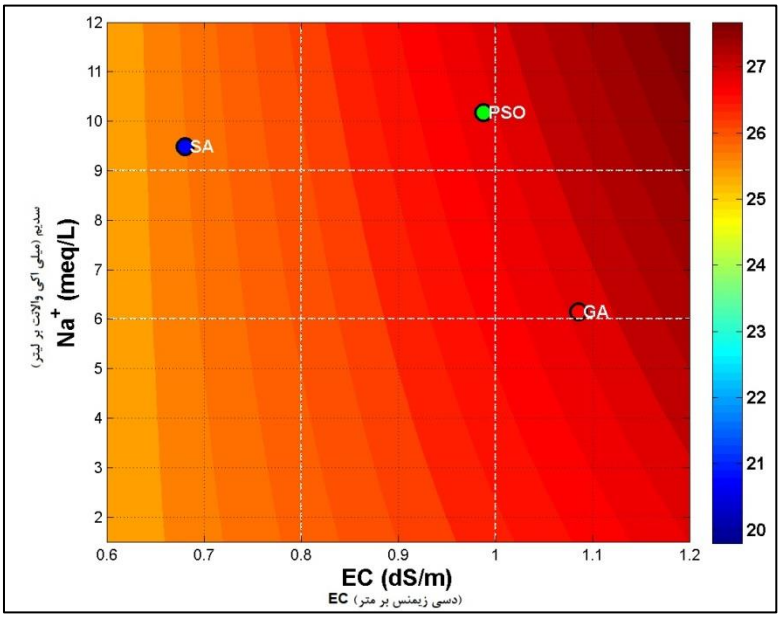
ب) وجود چندین ترکیب بهینه[1]: مدل رگرسیونی Interactions که اثرات متقابل پارامترها را در نظر می‌گیرد، می‌تواند دارای چندین نقطه اوج در فضای پاسخ باشد. در این حالت، امکان دارد ترکیبات متفاوتی از پارامترها (از جمله سطوح مختلف Na^+) به عملکردی تقریباً یکسان منجر شوند. بنابراین، هر الگوریتم ممکن است به یکی از این نقاط بهینه همگرا شده باشد. به عنوان نمونه، شکل (۷) نشان می‌دهد چگونه تأثیر هم‌زمان EC و Na^+ می‌تواند به سطوح مختلف عملکردی گیاه ذرت علوفه‌ای منجر گردد. به‌طوری‌که تأثیر تعاملی این دو پارامتر (هم‌زمان EC و Na^+) در الگوریتم‌های PSO و GA (حدوده قرمز پررنگ) منجر به سطح عملکرد بیش‌تری در مقایسه با الگوریتم SA شدند.

ج) خنثی‌سازی اثر سدیم توسط کاتیون‌های دوظرفیتی: مقادیر بهینه هم‌زمان کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) در راه‌حل‌های PSO و SA که دارای سدیم بالا هستند (به ترتیب حدوداً ۴/۱۷ و ۳/۶۳ $meq.L^{-1}$ برای Ca^{2+} و حدوداً ۲۱/۲۷ و ۱۳/۰۶ $meq.L^{-1}$ برای Mg^{2+})، از این فرضیه حمایت می‌کند که سطوح کافی این کاتیون‌های دوظرفیتی می‌توانند اثرات منفی سدیم را تعدیل کنند (Rengasamy, 2010). این رابطه تعاملی دقیقاً در مدل رگرسیونی برتر (Interactions) گنجانده شده است.

بررسی نتایج بهینه پارامتر SAR در جدول (۳) الگوی جالبی را نشان می‌دهد. الگوریتم PSO مقدار بهینه پایین‌تری (۱/۳۶) را پیشنهاد کرده، در حالی که GA و SA مقادیر بالاتری نزدیک به حد بالایی محدوده تجربی را بهینه تشخیص داده‌اند. این اختلاف می‌تواند مجدداً بر اهمیت اثرات متقابل تأکید کند. مقدار متوسط SAR احتمالاً در ترکیب با غلظت‌های بهینه Ca^{2+} و Mg^{2+} پیشنهادیPSO کفایت می‌کند، در حالی‌که برای دستیابی به همان عملکرد با ترکیبات متفاوتی از Ca^{2+} و Mg^{2+} مثلاً در نتایج GA و SA، نیاز به SAR بالاتری برای حفظ تعادل یونی وجود دارد. این موضوع اهمیت مدیریت نسبت‌های یونی به جای تمرکز صرف بر غلظت‌های مطلق را برجسته می‌سازد. مقایسه مقادیر بهینه Ca^{2+} و Mg^{2+} در جدول (۳) نیز نشان می‌دهد که هر سه الگوریتم (GA، PSO و SA) بر ضرورت غلظت‌های نسبتاً بالای این دو کاتیون دوظرفیتی برای دستیابی به عملکرد اوج تأکید دارند. مقادیر بهینه Ca^{2+} بین۳/۶۳ تا ۴/۲۹ $meq.L^{-1}$و Mg^{2+} بین ۱۳/۰۶ تا ۲۲/۸۵ $meq.L^{-1}$ متغیر است. این مقادیر به وضوح بالاتر از حداقل‌های تجربی و نزدیک به حداکثرهای مشاهده شده در تیمارهای آزمایشی (به ویژه تیمارهای حاوی پساب) هستند. این نتایج از این فرضیه حمایت می‌کند که تأمین کافی کلسیم و منیزیم، عاملی کلیدی در توجیه عملکرد بالای تیمارهای دارای پساب بوده است. نقش کلسیم در استحکام دیواره سلولی، تقسیم سلولی و سیگنال‌دهی و از سوی دیگر، نقش منیزیم در ساخت کلروفیل و فعال‌سازی آنزیم‌ها به خوبی شناخته شده است (Marschner, 2012). این نتایج حاضر نشان می‌دهد که در شرایط استفاده از آب‌های با کیفیت متغیر، تأمین این دو عنصر می‌تواند حتی از کنترل صرف شوری (EC) مهم‌تر باشد. تاثیر استفاده از پساب در آبیاری گیاه ذرت به‌منظور افزایش عملکرد ذرت و همچنین برآورد بهینه بیش‌تر نسبت به تیمارهای شاهد در هر سه الگوریتم بهینه-سازی این پژوهش با نتایج نیکبخت و رضائی (۱۳۹۶) که کاربرد ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد پساب در آب آبیاری را سبب افزایش در وزن تر کل بوته ذرت در مقایسه با تیمار شاهد به میزان ۵، ۱۴، ۳۳ و ۵۱ درصد برآورد کردند، مطابقت دارد. آن‌ها در این مطالعه علت افزایش عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای در آبیاری با پساب را با عدم استفاده از کود در طول دوره رشد گیاه به تأمین بخشی از عناصر غذایی مورد

1- Multiple Optimal Compositions

نیاز گیاهان توسط پساب و نیز وجود مواد آلی و معدنی مورد نیاز رشد گیاه در فاضلاب مرتبط دانستند. این افزایش عملکرد ذرت علوفه‌ای در نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی با مطالعه Mousavi and Shahsavari (2014) که غنی بودن فاضلاب تصفیه‌شده از عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، روی و آهن نسبت به آب چاه را موجب افزایش وزن هزار دانه ذرت دانستند و هم‌چنین نتایج کریمی و همکاران (۱۳۹۷) که استفاده از پساب در آبیاری ذرت را علت افزایش وزن خشک بوته به ویژه وزن خشک برگ نسبت به تیمار شاهد یافتند و نیز یافته‌های لیاقت و همکاران (۱۴۰۰) که اثر استفاده از پساب بر وزن بوته خشک ذرت را در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار دانستند، مطابقت دارد.



شکل ۷ - اثر متقابل هدایت الکتریکی و سدیم بر عملکرد ذرت

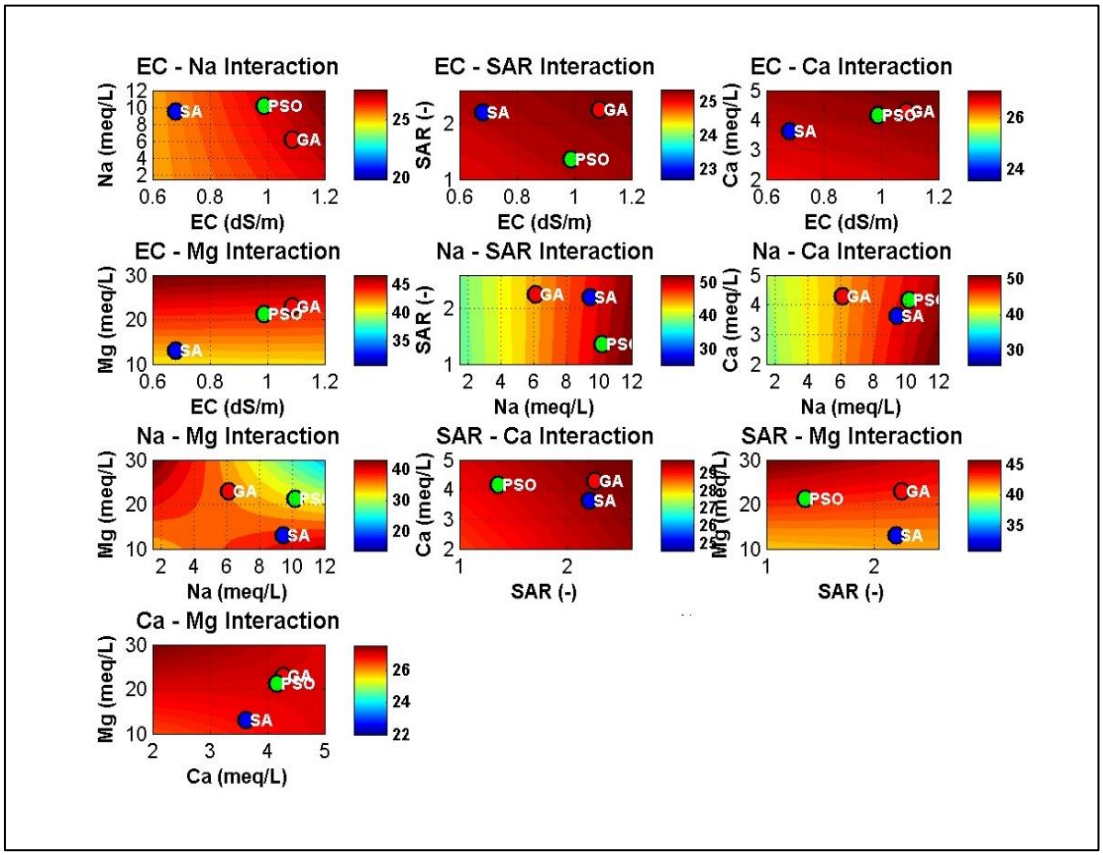
نتایج کلی کلیه روابط تعاملی دو به دو پارامترهای پنج‌گانه (EC, Na^+, SAR, Ca^{2+}, Mg^{2+}) کیفیت آب در شکل (۸) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد چگونه تأثیر هم‌زمان متقابل هریک از پارامترها روی هم می‌تواند منجر به ایجاد سطوح مختلف عملکردی برای گیاه ذرت گردد.

تحلیل تطبیقی ماتریس‌های همبستگی

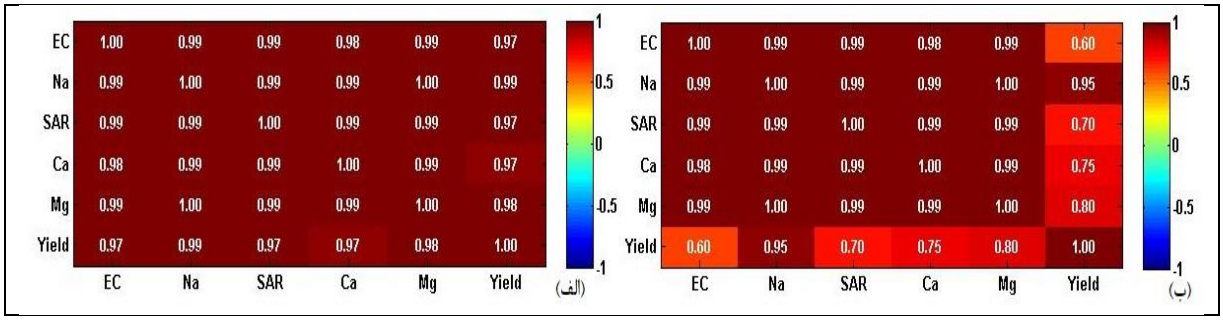
ماتریس همبستگی محاسبه‌شده برای داده‌های تجربی اولیه (۴۵ نقطه) نشان‌دهنده وجود همبستگی‌های قوی و مثبت بین کلیه پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای بود (شکل ۹-الف). به‌طور مشخص، تمامی پارامترها از جمله EC (r^2=0.972)، Na^+ (r^2=0.985)، SAR (r^2=0.970)، Ca^{2+} (r^2=0.968) و Mg^{2+} (r^2=0.984)همبستگی‌هایی بالاتر از ۰/۹۷ با عملکرد ذرت علوفه‌ای کشت‌شده در مزرعه نشان دادند. این الگو نشان‌دهنده آن است که در محدوده گسترده شرایط تجربی (از آب چاه خالص تا پساب خالص)، تغییرات تمامی پارامترها به‌طور هم‌جهت با تغییرات عملکرد بوده و به‌ظاهر همه پارامترها نقش تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، تحلیل ماتریس همبستگی در منطقه بهینه، ناحیه‌ای که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی به‌عنوان فضای پارامترهای مطلوب برای حداکثر عملکرد شناسایی شد، الگوی تقریباً متفاوتی را آشکار ساخت (شکل ۹-ب). در این منطقه، با وجود حفظ همبستگی مثبت کلیه پارامترها با عملکرد، ساختار اهمیت نسبی پارامترها دچار تحول گردید. همبستگی Na^+ با عملکرد همچنان در سطح بسیار بالا باقی ماند (r^2=0.950)، که تأکید مجددی بر نقش محوری این پارامتر حتی در شرایط بهینه بود. در مقابل، همبستگی EC با عملکرد به‌طور چشمگیری کاهش یافت (از ۰/۲۹۷ به ۰/۶۰۰). همبستگی SAR (r^2=0.700)، Ca^{2+} (r^2=0.750) و Mg^{2+} (r^2=0.800) نیز کاهش‌هایی معنادار اما با شدت کمتر نسبت به EC را در برآورد نهایی عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای تجربه کردند.

کاهش همبستگی EC با عملکرد در منطقه بهینه نسبت به داده‌های تجربی، حاکی از تغییر نقش این پارامتر از یک عامل تعیین‌کننده اصلی به یک عامل تعدیل‌کننده ثانویه در شرایط نزدیک به بهینه است. در داده‌های تجربی که دامنه وسیعی از کیفیت آب (از مطلوب تا نامطلوب) را پوشش می‌دهند، EC به‌عنوان شاخص کلی

شوری، همبستگی بالایی با کاهش عملکرد نشان می‌دهد، اما در منطقه بهینه شناسایی‌شده توسط الگوریتم‌ها، پارامتر EC در محدوده‌ای قرار می‌گیرد که برای گیاه ذرت حداقل تنش را ایجاد می‌کند.



شکل ۸ - اثر متقابل پارامترهای کیفی آب بر عملکرد ذرت



شکل ۹- ماتریس همبستگی پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت؛ (الف)- داده‌های مزرعه‌ای، (ب)-نتایج بهینه

در این شرایط، عوامل دیگر مانند تعادل یونی و غلظت عناصر خاص (به‌ویژه Na^+) نقش تعیین‌کننده‌تری در تعیین نهایی عملکرد ایفا می‌کنند. ثبات همبستگی بالای Na^+ با عملکرد در هر دو شرایط تجربی و بهینه، اهمیت مستمر این پارامتر را به‌عنوان کلیدی‌ترین متغیر کیفی آب در سیستم مورد مطالعه تأیید می‌کند. این یافته نشان می‌دهد که حتی زمانی که EC در محدوده مطلوب قرار دارد، مدیریت غلظت سدیم همچنان از اهمیت حیاتی برخوردار است.

این نتیجه با یافته‌های پژوهش‌های متعددی که بر نقش سمیت ویژه یون سدیم فراتر از اثرات شوری کل تأکید داشته‌اند، یکسان است (Rengasamy, 2010;Grattan and Grieve, 2008). تأکید بر نقش کلیدی Na^+ حتی در شرایط بهینه، با یافته‌های پژوهش‌هایی در مورد سمیت ویژه سدیم که نشان می‌دهند سدیم می‌تواند مستقل از اثرات اسمزی، از طریق اختلال در جذب سایر عناصر و ایجاد عدم تعادل یونی به گیاه آسیب برساند، همسو است (Isayenkov and

Maathuis, 2019).

کاهش همبستگی SAR از ۰/۹۷۰ به ۰/۷۰۰ در منطقه بهینه را می‌توان ناشی از تعامل پیچیده‌تر این شاخص با کاتیون‌های دوظرفیتی در شرایط نزدیک به بهینه دانست. در محدوده بهینه، ممکن است نسبت‌های مختلفی از سدیم، کلسیم و منیزیم قادر به حفظ عملکرد بالا باشند، مشروط بر اینکه غلظت مطلق سدیم کنترل شده و مقادیر کافی کلسیم و منیزیم حاضر باشند. این امر منجر به پراکندگی بیش‌تر در رابطه SAR عملکرد و در نتیجه کاهش ضریب همبستگی می‌گردد.کاهش متوسط در همبستگی Ca^{2+} و Mg^{2+} به ترتیب از ۰/۹۶۸ و ۰/۹۸۴ به ۰/۷۵۰ و ۰/۸۰۰ احتمالاً نشان‌دهنده این واقعیت است که در منطقه بهینه، سطوح این کاتیون‌ها عمدتاً در محدوده کافی و غیرمحدودکننده قرار دارند .بنابراین، تغییرات جزئی در غلظت آن‌ها تأثیر کمتری بر عملکرد نهایی دارد، در حالی که در شرایط تجربی گسترده (شامل سطوح احتمالی کمبود)، تغییرات آن‌ها همبستگی قوی‌تری با عملکرد نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بهینه‌سازی پارامترهای کیفی آب آبیاری برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای، در یک چارچوب روش‌شناختی ترکیبی شامل تحلیل آماری، مدل‌سازی رگرسیونی و بهینه‌سازی چندالگوریتمی (GA، PSO و SA) انجام گردید. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که با تنظیم دقیق ترکیب یونی آب، می‌توان عملکرد ذرت علوفه‌ای را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد و از منابع آب غیرمتعارف به‌صورت پایدار بهره‌برداری نمود. اگرچه هر سه الگوریتم (GA، PSO و SA) در بهترین اجرای خود قادر به یافتن ترکیب پارامتری با عملکرد بهینه‌شده تقریباً یکسان (حدوداً ۳۰/۰۸ تن در هکتار) بودند اما تحلیل آماری ۱۰ اجرای مکرر با نقاط شروع تصادفی متفاوت نشان داد که تنها الگوریتم PSO از پایداری و قابلیت اطمینان کافی برای دستیابی به این سطح عملکرد به طور متوالی برخوردار است. این موضوع برتری الگوریتم PSO را نه تنها در قابلیت اوج‌یابی، بلکه که در مواجهه با عدم قطعیت‌های ناشی از شرایط اولیه نیز تأیید می‌نماید.

در مقایسه با پژوهش‌های مشابه، محدوده بهینه پیشنهادی برای پارامترهای پنج‌گانه کیفیت آب ($EC, Na^{+}, SAR, Ca^{2+}, Mg^{2+}$) از انسجام منطقی برخوردار است. محدوده بهینه EC شناسایی شده در این مطالعه (۰/۶۸ تا ۱/۰۹ $dS.m^{-1}$) کاملاً در چارچوب توصیه‌های کلاسیک برای کشت ذرت در شرایط غیرشور یا شوری بسیار کم که آستانه شوری برای ذرت بدون کاهش عملکرد را در حدود ۱/۷ $dS.m^{-1}$برآورد کردند، قرار دارد (Maas and Hoffman, 1977). بنابراین، محدوده بهینه به دست آمده نه تنها پایین‌تر از این آستانه است، بلکه نشان می‌دهد حداکثر عملکرد در بخشی حتی محافظه‌کارانه‌تر و بهینه‌تر از این محدوده کلی حاصل می‌شود. مقادیر بهینه بالاتر برای Ca^{2+} و Mg^{2+} نیز با گزارش‌هایی که بر اهمیت نسبت Ca:Na و Mg:Na در تعدیل اثرات سمیت سدیم تأکید دارند، همسو است (Rengasamy, 2010). نتیجه اصلی این است که مدل و فرآیند بهینه‌سازی، قادر به شناسایی ترکیبی متعادل و عملیاتی از پارامترها شده‌اند که اگرچه ممکن است از نظر مقدار عددی بین الگوریتم‌ها اندکی تفاوت باشد، اما همگی در یک حوزه مشترک و با عملکردی تقریباً یکسان قرار می‌گیرند. این حوزه مشترک را می‌توان به عنوان محدوده بهینه پارامترها برای مدیریت کیفیت آب آبیاری گیاه ذرت در شرایط مشابه تعریف کرد. این محدوده پارامترها، یک محدوده از مقادیر است که انعطاف‌پذیری لازم را برای مدیریت در شرایط واقعی مزرعه، با در نظر گرفتن تغییرات طبیعی منابع آب و خاک، فراهم خواهد ساخت. گستردگی محدوده بهینه Na^{+} نه یک ضعف، بلکه نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری سیستم و وجود راه‌حل‌های جایگزین عملی برای دستیابی به عملکرد اوج تولید ذرت است. این یافته را می‌توان بر اهمیت مدیریت ترکیب یونی متعادل به جای تمرکز صرف بر غلظت منفرد سدیم یا شوری کل دانست.

تحلیل تطبیقی ماتریس‌های همبستگی در داده‌های تجربی و منطقه بهینه نشان داد که: الف) ساختار روابط بین پارامترها در شرایط نزدیک به بهینه با شرایط کلی تجربی متفاوت است، ب) پارامتر Na^{+} با حفظ همبستگی بسیار بالا (۰/۹۵) در هر دو شرایط، کلیدی‌ترین پارامتر کیفیت آب برای عملکرد ذرت علوفه‌ای در سیستم مورد مطالعه است. اهمیت نسبی پارامتر EC در منطقه بهینه کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد پس از اطمینان از قرارگیری آن در محدوده مطلوب، تمرکز مدیریت باید بر کنترل سدیم و تعادل کاتیونی معطوف گردد. این تحول ساختاری، لزوم استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندمتغیره همانند الگوریتم‌های فراابتکاری به‌کاررفته در این پژوهش را برای شناسایی مناطق بهینه در فضای پیچیده پارامترها تأیید می‌کند، چرا که روش‌های تک‌متغیره یا مبتنی بر همبستگی‌های کلی ممکن است به راهکارهای مدیریتی ناقص منجر گردند.

نتایج بهینه‌سازی چندالگوریتمی با محاسبه وزن‌های عینی مبتنی بر ماتریس همبستگی پارامترهای کیفی آب و عملکرد ذرت علوفه‌ای، نسبت اختلاط ۶۲ درصد پساب با ۳۸ درصد آب چاه را به‌عنوان نقطه بهینه تعیین می‌نماید .این نتیجه بر پایه دو مرحله محاسباتی کاملاً کمی استوار است: الف) تعیین درصدی مقادیر بهینه هر پارامتر کیفی آب از طریق درونیابی خطی بین تیمار شاهد (W1) و تیمار ۱۰۰ درصد پساب (W5) بر اساس مقادیر بهینه‌شده توسط الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) به‌عنوان الگوریتم برتر و ب) تلفیق این درصدها با وزن‌هایی که مستقیماً از ضرایب همبستگی هر پارامتر با عملکرد نهایی در ماتریس همبستگی منطقه بهینه PSO استخراج شدند.

از منظر علمی، این نسبت بهینه (۶۲:۳۸) تعادل قابل قبولی بین بهره‌برداری از منابع آب غیرمتعارف و حفظ سلامتی سیستم خاک-گیاه ایجاد می‌کند. یافته‌های پژوهش‌های پیشین در زمینه استفاده از آب‌های نامتعارف نیز بر لزوم رقیق‌سازی با هدف کاهش مخاطرات کیفی تأکید دارند. دستورالعمل‌های فائو (*FAO*) و سازمان حفاظت محیط زیست ایالات متحده (*USEPA*) برای استفاده کشاورزی از آب‌های بازیافتی، اغلب رقیق‌سازی را به عنوان یک راهکار کلیدی برای مدیریت خطرات کیفی پیشنهاد می‌کنند. یک مطالعه مروری گسترده نشان داد که رقیق‌سازی پساب با منابع آب با کیفیت بالاتر (با نسبت‌هایی در محدوده ۱:۱ تا ۳:۱) یک عمل رایج و مؤثر برای حفظ بهره‌وری محصول و سلامت خاک در درازمدت است (Pedicchio et al., 2020). نتیجه ۶۲ درصدی این پژوهش که معادل نسبت رقیق‌سازی تقریبی ۱/۶:۱ (پساب به آب چاه) است، درون این چارچوب توصیه‌شده جهانی قرار می‌گیرد. بنابراین، می‌توان ادعا نمود که این نتیجه نه تنها از پشتوانه ریاضی و الگوریتمی قوی برخوردار است، بلکه با اصول پذیرفته‌شده علمی در مدیریت پایدار آب‌های بازیافتی نیز هم‌خوانی دارد.

منابع

پورغلام آمیجی، م. و خوش روش، م. ۱۴۰۱. اثر آبیاری با پساب تصفیه‌شده مغناطیسی بر جذب برخی فلزات سنگین در کشت ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران. ۳۵(۵): ۱۰۹۱-۱۰۷۹.

پورغلام آمیجی، م.، خوش روش، م.، دیوبند هفشجانی، ل. و قدمی فیروزآبادی، ع. ۱۴۰۱. اثر آبیاری با پساب مغناطیسی تصفیه‌شده بر بهره‌وری آب ذرت. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۱): ۲۵۳-۲۴۳.

کریمی، ب.، عبدی، چ. و فتحی تیلکو، ز. ۱۳۹۷. تأثیر آبیاری با پساب شهری تصفیه شده بر عملکرد و برخی ویژگی‌های رشد گوجه‌فرنگی و ذرت در شرایط گلخانه‌ای .دانش آب و خاک. ۲۸(۴): ۲۹-۱۹.

لیاقت،ع.م.، اویسی،م.ر.، ابراهیمیان، ح.، پورغلام آمیجی، م. و صالح، م. ۱۴۰۰. اثر استفاده از آب آلوده به فلز سرب با آبیاری سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و جذب آن توسط گیاه ذرت علوفه‌ای. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۵(۱): ۱۶-۱.

میرناصری، م.، دیوبند هفشجانی، ل. و خوش‌روش. ۱۴۰۴. واسنجی هوشمند مدل ذخیره موقت با ادغام الگوریتم ژنتیک و روش تفاضل محدود در شبیه‌سازی انتقال املاح. تحقیقات آب و خاک ایران. ۵۶(۱۱): ۳۱۷۹-۳۱۵۷.

شاکری پرکوهی، ن.، میرناصری، م.، خوش روش, م. و دلیر حسن نیا، ر. ۱۴۰۴. تعیین نسبت بهینه اختلاط آب چاه و پساب شهری برای بیشینه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم ژنتیک. پژوهش آب در کشاورزی. ۳۹(۴): ۳۴۰-۳۲۱.

نیکبخت، ج. و رضایی، ا. ۱۳۹۶. تأثیر سطوح مختلف پساب و آب مغناطیسی شده بر عملکرد و بهره‌وری مصرف آب در آبیاری ذرت و برخی خصوصیات فیزیکی خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸(۱): ۷۵-۶۳.

Azimi, R. and Azimi, S. 2019. Optimization of water use efficiency in maize production using particle swarm optimization and AquaCrop model. Computers and Electronics in Agriculture. 165: 104959.

Burnham, K. P. and Anderson, D. R. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach (2nd ed.). Springer-Verlag.

Cakmak, I. 2005. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 168(4): 521-530.

Dormann, C. F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J. R. G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P. J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P. E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A. K., Zurell, D. and Lautenbach, S. 2013. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. Ecography. 36(1): 27-46 .

Eiben, A. E., and Smith, J. E. 2015. Introduction to evolutionary computing (2nd ed.). Springer-Verlag.

Ge, Y., Bai, G., Stoelzle, M. and Liang, Z. 2020. Why is maize under drought more sensitive to nitrogen fertilization A comprehensive data analysis. Field Crops Research. 255: 107865.

Goldberg, D. E. 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley.

Grattan, S. R. and Grieve, C. M. 2008. Salinity–mineral nutrient relations in horticultural crops. Scientia Horticulturae. 118(2): 127-139 .

Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., and Anderson, R. E. 2014. *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson.

Isayenkov, S. V. and Maathuis, F. J. 2019. Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. Frontiers in Plant Science. 10, 80 .

Jiang, P., Wang, Y. and Li, R. 2017. Particle swarm

calculations by fast computing machines. The Journal of Chemical Physics. 21(6): 1087–1092.

Montalvo, I., Izquierdo, J., Pérez-García, R. and Herrera, M. 2008. A comparison of genetic algorithms, particle swarm optimization and simulated annealing for water distribution network design. Journal of Hydroinformatics. 10(4): 285–300.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50(3): 885-900.

Mousavi, S. R. and M. Shahsavari. 2014. Effects of treated municipal wastewater on growth and yield of maize (Zea mays). Biological Forum. 6(2): 228-233.

Noory, H., Liaghat, A. and Parsinejad, M. 2011. Crop yield prediction using genetic algorithms and remote sensing data. Agricultural Water Management. 98(9): 1497–1507.

Pedicchio, G., Pedicchio, M. C. and Gatta, G. 2020. Effects of irrigation with treated wastewater on soil properties and maize yield. Agricultural Water Management. 240: 106255 .

Raju, K. S. and Kumar, D. N. 2004. Irrigation planning using genetic algorithms. Water Resources Management. 18(2): 163–176.

Rengasamy, P. 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. Functional Plant Biology. 37 (7): 613-620.

Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin of the American Meteorological Society. 63(11): 1309-1313.

Wright, D. L., Inman, D. and Grieve, C. M. 2019. Nutrient interactions and salinity affect growth and ion relations in strawberry. Journal of Plant Nutrition. 42(3): 266-278 .

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.

optimization-based approach for optimal allocation of water resources in agriculture. Water Resources Management. 31(10): 3145–3159.

Karahan, H. and Ayvaz, M. T. 2015. Transient analysis of a multi-reservoir system using genetic algorithm, particle swarm optimization and simulated annealing. Journal of Hydrologic Engineering. 20(10): 04015019.

Kennedy, J. and Eberhart, R. 1995. Particle swarm optimization. In Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks (Vol. 4, pp. 1942–1948). IEEE.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. 1983. Optimization by simulated annealing. Science. 220(4598): 671–680.

Legates, D. R. and McCabe, G. J. 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research. 35(1): 233-241.

Li, J., Heap, A. D., Potter, A. and Daniell, J. J. 2013. Application of machine learning methods to spatial interpolation of environmental variables. Environmental Modelling & Software. 41: 132-147.

Maas, E. V. and Hoffman, G. J. 1977. Crop salt tolerance–current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE. 103 (2): 115-134.

Maier, H. R., Razavi, S., Kapelan, Z., Matott, L. S., Kasprzyk, J. R. and Tolson, B. A. 2019. Introductory overview: Optimization using evolutionary algorithms and other metaheuristics. Environmental Modelling & Software. 114: 195–213.

Marschner, H. 2012. Marschner's mineral nutrition of higher plants (3rd ed.). Academic Press.

Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. 1953. Equation of state calculations by fast computing machines. The journal of chemical physics. 21(6): 1087-1092.

Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. 1953. Equation of state

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.4, Vol. 20, Oct.-Nov. 2026, p. 651-669

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۲۰، مهر - آبان ۱۴۰۵، ص. ۶۶۹-۶۵۱

Intelligent Optimization of Hydrochemical Parameters of Irrigation Water for Maximizing Maize Yield Using Metaheuristic Algorithms

M.Mirnaseri[1*], M.Khoshravesh[2], L.Divband Hafshejani[3]
Recived: Apr.30, 2026 Accepted: Jun.26, 2026

Abstract

Improving irrigation water quality management is a pivotal factor in enhancing the stability and productivity of agricultural systems, particularly when unconventional water resources such as treated wastewater are utilized. This study was conducted to determine the optimal hydrochemical parameters of irrigation water (including EC, Na^{+}, SAR, Ca^{2+}, and Mg^{2+}) for maximizing the yield of forage corn (*Zea mays L. SC 704*). The research was implemented in three principal phases: (i) exploratory and statistical analysis of raw field data (45 observations); (ii) fitting and evaluation of three regression models (linear, interaction, and quadratic); and (iii) multi-algorithm optimization employing genetic algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO), and simulated annealing (SA). The results revealed that the regression model incorporating interaction effects among the parameters, which achieved the highest adjusted coefficient of determination (R^2_{aj} = 0.9197) and the lowest error (RMSE = 0.338 ton.ha^{-1}), was selected as the superior model. In the optimization process, the PSO algorithm outperformed GA and SA, yielding a mean predicted yield of 30.064 ton.ha^{-1}, a success rate of 100%, and the highest stability. The optimal values proposed by the algorithms fell within a range that is practically achievable under field conditions. By integrating the weights extracted from the correlation matrix of the parameters in the optimum region with the values optimized by PSO, a blending ratio of 62% treated wastewater and 38% well water was established as the operational optimum. The findings of this research demonstrate that intelligent optimization of the qualitative composition of irrigation water can simultaneously promote the sustainable use of unconventional water resources, such as wastewater, and increase forage corn yield.

Keywords: Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Simulated Annealing (SA), Treated Municipal Wastewater, Sodium Adsorption Ratio (SAR).

1- Assistant Professor of Water Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2- Associate Professor of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3- Assistant Professor of Environmental Engineering, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: Mohammadmirnaseri@yahoo.com)