



Optimization of Well and Urban Treated Wastewater for Irrigation of Forage Maize Using NSGA-II Algorithm Integrated with A Full Interactions Regression Model and Response Surface Analysis

Narjes Shakeri¹ | Mohammad Mirnaseri² | Mojtaba Khoshravesh³ | Reza Delir-Hasannia⁴

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: Shakerinarjes130@gmail.com

2. Corresponding Author, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.mirnaseri@sanru.ac.ir

3. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. E-mail: khoshravesh_m24@yahoo.com

4. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: delearhasannia@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 1, 2026

Revised: July. 26, 2026

Accepted: Aug. 16, 2026

Published online: Oct. 23, 2026

Keywords:

**Wastewater Irrigation,
Multi-Objective Optimization,
Pareto Front,
Heavy Metals,
Water Resources Management**

ABSTRACT

The utilization of treated municipal wastewater for forage maize irrigation represents an unavoidable strategy for mitigating water scarcity crises. However, this practice may entail the risk of heavy metal accumulation in plant tissues. The objective of this study was to determine the optimal blending ratio of well water and wastewater through a multi-objective optimization framework to simultaneously achieve maximum forage maize yield and minimum concentrations of nickel (Ni), zinc (Zn), cadmium (Cd), and lead (Pb). Three-year field data (2020–2022) were obtained from a lysimetric experiment conducted in Babolsar, Iran, comprising five blending treatments (0 to 100% wastewater). In the initial phase, a full interactions regression model was developed, attaining an average adjusted coefficient of determination of 0.9968 between six water quality parameters (EC, Na⁺, SAR, Ca²⁺, Mg²⁺, and N) and the five objectives. Subsequently, the NSGA-II multi-objective genetic algorithm, configured with a population size of 500 and 1,000 generations, generated a Pareto front consisting of 500 non-dominated solutions. Combined sensitivity analysis identified sodium concentration as the most influential variable governing the yield-toxicity trade-off, exhibiting a sensitivity coefficient of -0.232. In contrast, the sodium adsorption ratio (SAR) ranked second in importance with a coefficient of +0.207. The balanced solution selected from the Pareto front recommended an optimal blending ratio of 23% wastewater to 77% well water. This solution achieved a grain yield of 24.54 ton/ha (0.33% higher than the 100% wastewater treatment (I5)) while substantially reducing lead concentration from 46.85 to 14.19 µg/g and cadmium concentration from 8.39 to 0.96 µg/g (corresponding to 70% and 89% reductions, respectively). Multi-objective response surface analysis further corroborated the dualistic behavior of sodium-acting as a beneficial element at low concentrations while exacerbating toxicity at elevated levels. The proposed framework constitutes a reliable decision-support tool for the sustainable management of non-conventional water resources in agriculture.

Cite this article: Shakeri, N., Mirnaseri, M., Khoshravesh, M., Delir-Hasannia, R., (2026) Optimization of Well and Urban Treated Wastewater for Irrigation of Forage Maize Using NSGA-II Algorithm Integrated with A Full Interactions Regression Model and Response Surface Analysis, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 57 (8), 2003-2023. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413567.670130>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413567.670130>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The escalating scarcity of freshwater resources in arid and semi-arid regions has rendered the utilization of non-conventional water sources, such as treated municipal wastewater, an unavoidable imperative in the agricultural sector. Treated Municipal wastewater, owing to its richness in essential macronutrients (particularly nitrogen, phosphorus, and organic matter) possesses considerable potential to enhance the yield of agronomic crops, including forage maize. Nevertheless, the concurrent presence of heavy metals such as nickel (Ni), zinc (Zn), cadmium (Cd), and lead (Pb) in treated wastewater composition poses significant risks to both human and animal food chain safety, as well as long-term soil quality. Consequently, the fundamental challenge in treated wastewater irrigation management lies in determining the optimal blending ratio with fresh water (well water) such that the nutritional benefits of the effluent are harnessed while maintaining tissue concentrations of toxic elements within permissible thresholds. Owing to the inherent conflict between maximizing crop yield and minimizing heavy metal uptake, this problem resides firmly within the domain of multi-objective optimization. Classical irrigation management approaches are ill-equipped to resolve these competing objectives simultaneously, necessitating advanced computational and multi-criteria decision-making frameworks. The objective of this study was to develop an integrated regression-optimization framework based on the NSGA-II multi-objective genetic algorithm to determine the optimal blending ratio of well water and treated municipal wastewater for forage maize irrigation and to conduct a comprehensive analysis of the trade-offs between quantitative yield and product biosafety.

Materials and Methods

The field data utilized in this study were derived from a three-year investigation (2020–2022) conducted at a farm located in Amij-Kola village, Babolsar County, Mazandaran Province, Iran. The experiment was executed in PVC lysimeters measuring 60 cm in diameter and 100 cm in height, arranged in a randomized complete block design with three replications. Irrigation treatments comprised five blending levels of well water and treated municipal wastewater: (I1) 100% well water, (I2) 25% wastewater + 75% well water, (I3) 50% wastewater + 50% well water, (I4) 75% wastewater + 25% well water, and (I5) 100% wastewater. For the purposes of this study, only data from non-magnetized water treatments were employed. The independent variables consisted of six irrigation water quality parameters: electrical conductivity (EC), sodium concentration (Na^+), sodium adsorption ratio (SAR), calcium concentration (Ca^{2+}), magnesium concentration (Mg^{2+}), and total nitrogen (N). The dependent variables comprised five objectives: forage maize grain yield (ton/ha) as the maximization objective, and the tissue concentrations of four heavy metals (Ni, Zn, Cd, and Pb ($\mu\text{g/g}$)) as the minimization objectives. In the initial phase, to model the relationships between water quality and plant responses, three regression structures (linear, full quadratic, and full interactions) were fitted to the averaged dataset using Ridge regression ($\lambda=0.1$). The adjusted coefficient of determination (Adjusted R^2) served as the criterion for selecting the optimal model. In the second phase, employing the selected model as the fitness function, the NSGA-II multi-objective genetic algorithm was executed with a population size of 500 and 1000 generations to derive the Pareto front. The search space was strictly bounded between the values of pure well water and pure wastewater to ensure the physical feasibility of the generated solutions. Simulated Binary Crossover (SBX) with a rate of 0.7 and polynomial mutation with a rate of 0.2 were utilized to produce offspring. Following Pareto front extraction, the balanced solution was identified using the ideal point method, incorporating user-defined weights (yield: 40%, each heavy metal: 15%). A combined sensitivity analysis was also performed to prioritize the water quality parameters. Finally, the optimal blending ratio was computed using the linear mixing equation for five linear parameters and subsequently validated.

Results and Discussion

Evaluation of the regression models revealed that the full interactions model, with an average adjusted R^2 of 0.9968 across all five objectives, demonstrated markedly superior performance compared to the linear (0.9898) and full quadratic (0.9940) models. This model achieved near-perfect predictive accuracy, particularly for cadmium and lead concentrations ($R^2_{\text{adj}} \approx 1.000$). The NSGA-II algorithm successfully converged, yielding a final Pareto front comprising 500 non-dominated solutions. The convergence history indicated that the fitness function stabilized completely after approximately 600 generations. The final Pareto front substantiated a profound structural conflict between the yield objective and the heavy metal objectives; specifically, movement towards yields exceeding 24.5 ton/ha was inevitably accompanied by an exponential increase in lead and cadmium concentrations. Combined sensitivity analysis identified sodium concentration (Na^+) as the most influential parameter governing the yield-toxicity trade-off, exhibiting a sensitivity coefficient of -0.232. The sodium adsorption ratio (SAR) ranked second in importance with a coefficient of

+0.207, underscoring the dualistic and nonlinear behavior of sodium in forage maize physiology. The balanced solution selected from the Pareto front recommended an optimal blending ratio of 23% wastewater to 77% well water. This solution achieved a grain yield of 24.54 ton/ha, thereby not only maintaining the yield at the record level of the 100% wastewater treatment (24.46 ton/ha) but also improving it by 0.33%. From a biosafety perspective, this solution reduced lead concentration from 46.85 to 14.19 $\mu\text{g/g}$ (a 70% reduction) and cadmium concentration from 8.39 to 0.96 $\mu\text{g/g}$ (an 89% reduction) compared to the 100% wastewater treatment. Multi-objective response surface analysis further corroborated the nonlinear behavior of sodium; specifically, increasing sodium at lower salinity levels was associated with improved yield, whereas at higher levels, the slope of cadmium and nickel uptake escalated sharply.

Conclusions

This study successfully developed an integrated regression-optimization framework based on the NSGA-II algorithm for the qualitative management of forage maize irrigation with treated municipal wastewater. The findings unequivocally demonstrated that the full interactions regression model, by accounting for complex ion interactions, serves as a precise tool for simulating plant responses. The proposed balanced optimal solution (specifically, blending 23% wastewater with 77% well water) represents an intelligent compromise between food security and product safety, achieving near-maximum yield (24.54 ton/ha) while mitigating heavy metal hazards by 70% to 89% relative to irrigation with 100% wastewater. Both sensitivity analysis and response surface methodology convergently emphasized the pivotal role of sodium concentration and the meticulous management of the sodium adsorption ratio (SAR). The study revealed that the slight increase in heavy metal concentrations observed in the optimal solution relative to pure well water (I1) is an unavoidable cost of harnessing the substantial nutritional potential of wastewater to achieve economically viable yields; nonetheless, the absolute values of these metals remain within internationally accepted permissible limits. The framework presented herein can serve as an effective decision-support tool for farmers, extension specialists, and water resource managers in regions confronting freshwater scarcity yet possessing access to treated wastewater. Future research should focus on modeling the long-term dynamics of heavy metal accumulation in soil profiles and integrating such models with plant growth simulations.

Funding

The financial support for this study was provided by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Faculty of Agricultural Engineering. This support included a thesis research grant for the **first author** and separate research grants for the **second and third authors**, who are faculty members of the same university.

Authorship contribution

The contributions of the authors to this manuscript, which is derived from a thesis, are as follows:

First author (Narges Shakeri): Data collection, performing calculations, statistical analysis of data, analysis and interpretation of information and results, and drafting the manuscript.

Second author (Dr. Mohammad Mirnaseri, first thesis supervisor): Research design, supervision of the research process, verification and control of results, revision, review, and finalization of the manuscript, numerical coding in MATLAB software, numerical optimization, and assistance to the first author.

Third author (Dr. Mojtaba Khoshrvash, second thesis supervisor): Contribution to research design, research supervision, review and revision of the manuscript, examination of primary data, and guidance of the first author.

Fourth author (Dr. Reza Hasanzadeh Dalir, thesis advisor): Contribution to research design, research supervision, review and revision of the manuscript, and data analysis.

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

Data availability statement

The data of the present study are available upon request from the authors (by emailing the corresponding author).

Acknowledgements

The authors would like to thank anonymous referees for their constructive comments.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

بهینه‌سازی تلفیق آب چاه و پساب شهری برای آبیاری ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم NSGA، اثرات متقابل و تحلیل سطوح پاسخ

نرجس شاکری^۱ | محمد میرناصری^۲ | مجتبی خوش‌روش^۳ | رضا دلیرحسن‌نیا^۴

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

Shakerinarjes130@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

m.mirnaseri@sanru.ac.ir

۳. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه:

khoshravesh_m24@yahoo.com

۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز ایران. رایانامه: delearhasannia@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۲/۱۱	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۲۵	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۸/۱	
واژه‌های کلیدی: آبیاری با پساب، بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پارتو، فلزات سنگین، مدیریت منابع آب.	بهره‌گیری از پساب شهری تصفیه‌شده در آبیاری ذرت علوفه‌ای، راهکاری اجتناب‌ناپذیر برای گذر از بحران کم‌آبی که البته این مهم با مخاطره تجمع فلزات سنگین در بافت گیاه می‌تواند همراه باشد. هدف این مطالعه، تعیین نسبت اختلاط بهینه آب چاه و پساب با رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه به‌منظور دستیابی هم‌زمان به بیشینه عملکرد ذرت علوفه‌ای و کمینه غلظت عناصر نیکل (Ni)، روی (Zn)، کادمیم (Cd) و سرب (Pb) در بافت گیاه بود. داده‌های مزرعه‌ای سه‌ساله (۱۳۹۹-۱۴۰۱) از یک آزمایش لایسمتری در بابلسر، مشتمل بر پنج تیمار اختلاط (۰ تا ۱۰۰ درصد پساب) استخراج گردید. در گام نخست، مدل رگرسیونی اثرات متقابل کامل با میانگین ضریب تعیین تعدیل‌شده ۰/۹۹۶۸ میان شش پارامتر کیفیت آب (EC، SAR، Na ⁺ ، Mg ²⁺ ، Ca ²⁺ و H ⁺ نیترژن کل) اهداف پنج‌گانه تدوین شد. در ادامه، الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II با ۵۰۰ جمعیت و ۱۰۰۰ نسل، جبهه پارتو شامل ۵۰۰ راه‌حل نامغلوب را استخراج نمود. تحلیل حساسیت ترکیبی، غلظت سدیم را با ضریب ۰/۲۳۲- به‌عنوان تأثیرگذارترین متغیر در ایجاد توازن میان عملکرد و سمیت معرفی کرد. حال آن‌که نسبت جذب سدیم (SAR) با ضریب ۰/۲۰۷+ در رتبه دوم اهمیت قرار گرفت. راه‌حل متعادل منتخب از جبهه پارتو، نسبت اختلاط ۲۳ درصد پساب با ۷۷ درصد آب چاه را پیشنهاد داد. این راه‌حل با ثبت عملکرد ۲۴/۵۴ تن در هکتار (۰/۳۳ درصد فراتر از تیمار پساب ۱۰۰ درصد)، غلظت سرب را از ۴۶/۸۵ به ۱۴/۱۹ و کادمیم را از ۸/۳۹ به ۰/۹۶ میکروگرم بر گرم کاهش داد (به‌ترتیب ۷۰ و ۸۹ درصد بهبود). تحلیل سطوح پاسخ چندهدفه نیز رفتار دوگانه سدیم (ایفای نقش عنصر سودمند در غلظت پایین و تشدید سمیت در غلظت بالا) را تأیید نمود. چارچوب پیشنهادی، ابزاری قابل اتکا برای مدیریت پایدار منابع آب نامتعارف در کشاورزی محسوب می‌گردد.

استناد: شاکری؛ نرجس؛ میرناصری؛ محمد، خوش‌روش؛ مجتبی، دلیر حسن‌نیا؛ رضا، (۱۴۰۵) بهینه‌سازی تلفیق آب چاه و پساب شهری برای آبیاری ذرت علوفه‌ای با استفاده از الگوریتم NSGA، اثرات متقابل و تحلیل سطوح پاسخ، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۷ (۸)، ۲۰۰۳-۲۰۲۳.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413567.670130>

© نویسنندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.413567.670130>

مقدمه

بحران کمبود منابع آب شیرین، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جاری، بخش کشاورزی را به‌عنوان بیش‌ترین مصرف‌کننده آب در جهان، با محدودیت‌های جدی مواجه ساخته است (FAO, 2025). به‌گونه‌ای که بخش کشاورزی حدود ۷۲ درصد از کل برداشت آب شیرین در جهان را به خود اختصاص داده است (FAO, 2025; UN, 2025). تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر و رشد روزافزون جمعیت، فشار مضاعفی بر این منابع محدود وارد آورده است (Chatham House, 2025; Saleh et al., 2025). در چنین شرایطی، بهره‌گیری از منابع آب نامتعارف نظیر پساب شهری تصفیه‌شده، به‌عنوان یک راهکار راهبردی و اجتناب‌ناپذیر برای گذر از بحران کم‌آبی و تضمین پایداری تولیدات کشاورزی مطرح شده است (Hayat et al., 2026; Saleh et al., 2025).

پساب شهری تصفیه‌شده به دلیل دارا بودن عناصر غذایی پرمصرف از جمله نیتروژن، فسفر، پتاسیم و مواد آلی، پتانسیل قابل‌توجهی برای افزایش عملکرد محصولات زراعی از جمله ذرت علوفه‌ای دارد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که آبیاری با پساب شهری می‌تواند از طریق بهبود تغذیه گیاه، افزایش شاخص سطح برگ و تقویت فعالیت‌های فتوسنتزی، منجر به افزایش معنی‌دار عملکرد زیست‌توده ذرت گردد (Mojiri & Amirossadat, 2011; Daneshvar et al., 2020). با این وجود، حضور هم‌زمان فلزات سنگین نظیر نیکل (Ni)، روی (Zn)، کادمیم (Cd) و سرب (Pb) در ترکیب پساب‌های شهری، مخاطرات جدی را برای سلامت زنجیره غذایی انسان و دام و همچنین کیفیت خاک در بلندمدت به همراه دارد (Lu et al., 2015).

مطالعات متعدد نشان داده‌اند آبیاری با پساب تصفیه‌شده، خاک را با نیتروژن و فسفر غنی می‌کند اما هم‌زمان خطرات تجمع فلزات سنگین به‌ویژه نیکل و سرب را به همراه دارد (Saleh et al., 2025). این هم‌پوشانی در سطح خاک نیز تشدید می‌شود زیرا حضور ماده آلی موجود در پساب می‌تواند با افزایش تحرک فلزات سنگین، جذب آن‌ها را نیز توسط ریشه تسهیل نماید (Salam et al., 2026). در سطح فیزیولوژیک نیز ذرت به‌عنوان یک گیاه با توانایی بالا در جذب فلزات سنگین، کروم، سرب و نیکل را عمدتاً در ریشه خود تجمع می‌دهد (Lu et al., 2015). به‌گونه‌ای که اگرچه آبیاری با پساب می‌تواند زیست‌توده و جذب عناصر غذایی در ذرت را افزایش دهد اما هم‌زمان منجر به افزایش تجمع فلزات سنگین فراتر از حد مجاز نیز می‌گردد (Khoshravesh & Pourgholam-Amiji, 2024). از این‌رو، چالش اساسی پیش روی پژوهشگران و مدیران منابع آب، یافتن نسبت اختلاط بهینه پساب با آب شیرین (آب چاه) است، به‌گونه‌ای که ضمن بهره‌مندی از مزایای تغذیه‌ای پساب و دستیابی به حداکثر عملکرد ممکن، غلظت عناصر سمی در بافت گیاه در محدوده مجاز استانداردهای بین‌المللی باقی بماند. این مسأله به دلیل تضاد ذاتی و ساختاری میان اهداف حداکثرسازی عملکرد کمی گیاه و حداقل‌سازی جذب فلزات سنگین، در قلمرو مسائل بهینه‌سازی چندهدفه^۱ قرار می‌گیرد. روش‌های کلاسیک مدیریت آبیاری که صرفاً بر یک جنبه، معمولاً عملکرد متمرکز هستند، قادر به حل هم‌زمان این اهداف متضاد نبوده و ضرورت به‌کارگیری رویکردهای پیشرفته محاسباتی و الگوریتم‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره را نمایان می‌سازند (Deb et al., 2002).

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه، به‌ویژه الگوریتم NSGA-II^۲، به دلیل توانایی بالا در استخراج جبهه پارتو^۳ و ارائه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه، کاربرد گسترده‌ای در مدیریت منابع آب و بهینه‌سازی سیستم‌های کشاورزی یافته‌اند (Reed et al., 2013; Du et al., 2024). این الگوریتم با بهره‌گیری از مفاهیم مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی، قادر است تعادل مناسبی میان اهداف متضاد ایجاد نموده و به تصمیم‌گیران امکان انتخاب از میان مجموعه‌ای از گزینه‌های بهینه را اعطا نماید. تلفیق این الگوریتم با مدل‌های رگرسیونی پیش‌بینی‌کننده که روابط میان متغیرهای مستقل (پارامترهای کیفیت آب) و متغیرهای وابسته (عملکرد و غلظت فلزات سنگین) را کمی‌سازی می‌نمایند، می‌تواند چارچوبی قدرتمند برای بهینه‌سازی کیفیت آب آبیاری فراهم آورد.

پیشینه پژوهش

اثرات آبیاری با پساب بر عملکرد و کیفیت محصولات زراعی

مطالعات متعددی در نقاط مختلف جهان، توانایی بالای پساب شهری تصفیه‌شده را در افزایش عملکرد محصولات زراعی به اثبات رسانده‌اند.

Mojiri & Amirossadat (2011) در تحقیقی روی ذرت نشان دادند که آبیاری با پساب شهری منجر به افزایش غلظت عناصر غذایی در خاک و بهبود رشد گیاه می‌شود، هرچند هم‌زمان افزایش غلظت کادمیم و نیکل در شاخساره ذرت را نیز گزارش نمودند. در مطالعه‌ای دیگر، Daneshvar et al., (2020) با بررسی اثر آبیاری با پساب شهری و آب چاه بر عملکرد ذرت علوفه‌ای، بالاترین میزان عملکرد علوفه، وزن خشک ساقه و بلال و ارتفاع بوته را در تیمار آبیاری با پساب گزارش کردند. این محققین نشان دادند که میزان نیتروژن برگ، ساقه و دانه ذرت در تیمار پساب به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار آب چاه بود.

تجمع فلزات سنگین در گیاهان تحت آبیاری با پساب

در کنار مزایای تغذیه‌ای، مخاطرات ناشی از حضور فلزات سنگین در پساب‌های شهری یکی از مهم‌ترین نگرانی‌های مرتبط با کاربرد این منابع در کشاورزی است. Lu et al., (2015) در یک مطالعه جامع روی ذرت در کشور چین نشان دادند که غلظت کروم، سرب، نیکل و روی در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک‌های آبیاری‌شده با آب زیرزمینی بوده و این عناصر عمدتاً در ریشه ذرت تجمع یافته‌اند. این پژوهشگران هشدار دادند که آبیاری طولانی‌مدت با پساب می‌تواند منجر به تجمع فلزات سنگین در خاک و ورود آن‌ها به زنجیره غذایی گیاه شود. این پدیده می‌تواند ناشی از مکانیزم‌های فیزیولوژیکی نظیر جذب سطحی فلزات توسط دیواره سلولی ریشه، تغییرات pH ریزوسفر، تشکیل ترکیبات نامحلول با مواد آلی خاک و همچنین ذخیره‌سازی انتخابی فلزات در واکوئل‌های سلول‌های ریشه باشد که از انتقال آن‌ها به بخش هوایی جلوگیری می‌کند (Marschner, 2012; Kabata-Pendias, 2011).

Ofori et al., (2025) با انجام یک ارزیابی جامع نشان دادند که استفاده از پساب تصفیه‌شده برای آبیاری محصولات زراعی اگرچه مزایای قابل‌توجهی دارد، اما پایش مستمر غلظت فلزات سنگین در آب، خاک و گیاه برای اطمینان از ایمنی محصول ضروری است. این محققین تأکید کردند که ارزیابی ریسک سلامت باید بر کیفیت پساب ورودی و ویژگی‌های خاک متمرکز باشد. Mapanda et al., (2005) نیز با بررسی اثرات آبیاری طولانی‌مدت با پساب بر محتوای فلزات سنگین در خاک‌های زیر کشت سبزیجات در کشور زیمبابوه، نشان دادند که غلظت فلزات سنگین در خاک‌های آبیاری‌شده با پساب به‌طور معنی‌داری بیشتر از خاک‌های شاهد بوده و این افزایش با مدت زمان آبیاری همبستگی مثبت دارد.

کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در مدیریت منابع آب کشاورزی

در دهه اخیر، الگوریتم‌های فراتکاملی (خصوصاً الگوریتم‌های ژنتیک چندهدفه، کاربرد گسترده‌ای در حل مسائل پیچیده مدیریت منابع آب یافته‌اند. الگوریتم NSGA-II که توسط Deb et al., (2002) معرفی گردید، به دلیل توانایی بالا در حل مسائل بهینه‌سازی و حفظ تنوع راه‌حل‌ها، به یکی از پراستندترین الگوریتم‌ها در این حوزه تبدیل شده است. Reed et al., (2013) در یک مقاله مروری جامع، روند تکاملی کاربرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه در مدیریت منابع آب را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که NSGA-II به عنوان یکی از موفق‌ترین الگوریتم‌ها، در حل مسائل متنوعی از جمله تخصیص آب، مدیریت کیفی منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری به کار گرفته شده است.

در زمینه بهینه‌سازی آبیاری ذرت، Du et al., (2024) با معرفی یک نسخه بهبودیافته از الگوریتم NSGA-II تحت عنوان NDE-NSGA-II، موفق به بهینه‌سازی هم‌زمان مصرف آب و کود در شبیه‌سازی آبیاری ذرت شدند. این محققین با به‌کارگیری استراتژی جستجوی محلی ترکیبی، کارایی الگوریتم را در یافتن راه‌حل‌های بهینه رقابتی بهبود بخشیدند.

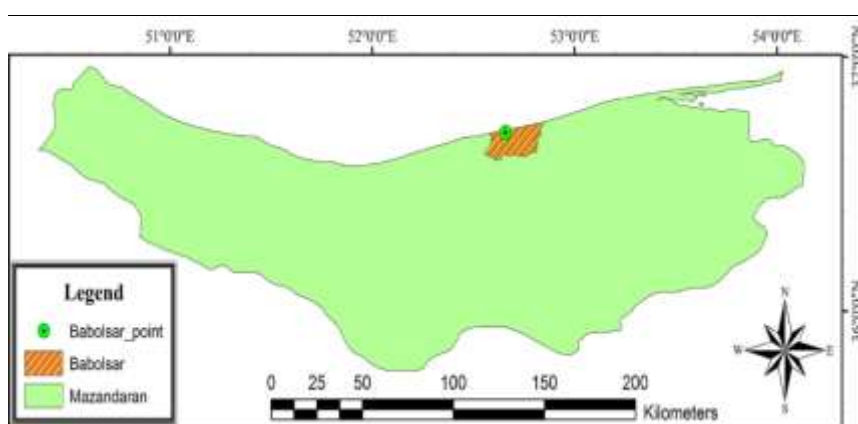
هدف از این پژوهش، توسعه یک چارچوب تلفیقی رگرسیون-بهینه‌ساز مبتنی بر الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II به منظور تعیین نسبت اختلاط بهینه آب چاه و پساب شهری تصفیه‌شده در آبیاری ذرت علوفه‌ای و تحلیل جامع نتایج رقابت تضادی موجود میان عملکرد کمی گیاه و کیفیت محصول از نظر میزان عناصر سنگین می‌باشد. در پژوهش‌های پیشین، اغلب از مدل‌های رگرسیونی ساده (خطی یا درجه دوم) برای شبیه‌سازی پاسخ گیاه به کیفیت آب استفاده شده است. حال آن‌که در محلول‌های خاک با ترکیب پیچیده یونی، اثرات متقابل میان یون‌ها (نظیر تداخل سدیم و کلسیم بر جذب کادمیم) نقشی کلیدی ایفا می‌کنند که این مدل‌ها قادر به کمی‌سازی آن‌ها نیستند. همچنین به دلیل محدودیت‌های محاسباتی، اغلب مسائل بهینه‌سازی با روش جمع وزنی به یک مسأله تک‌هدفه تقلیل یافته‌اند که ذاتاً قادر به نمایش تقابل‌های ساختاری میان اهداف متضاد (هم‌چون عملکرد کمی در برابر جذب فلزات سنگین) نبوده و تصمیم‌گیرنده را از آگاهی از سایر گزینه‌های بهینه، محروم می‌سازد. برای رفع این کاستی‌ها، چارچوب حاضر در دو گام طراحی شده است: نخست، با مقایسه

سه ساختار رگرسیونی (خطی، درجه دوم و اثرات متقابل کامل)، ساختاری که توانایی بیش‌تری در شبیه‌سازی هم‌زمان پاسخ‌های چندگانه دارد، به‌عنوان تابع برازش انتخاب می‌شود. دوم، به‌جای روش‌های تک‌هدفه، از الگوریتم ژنتیک چندهدفه NSGA-II با قابلیت مرتب‌سازی نامغلوب و فاصله ازدحامی استفاده می‌گردد که به‌جای یک جواب منفرد، جبهه‌ای از راه‌حل‌های نامغلوب (Pareto Front) ارائه می‌دهد و امکان انتخاب آگاهانه کشاورز را بر اساس نرخ جایگزینی پنج تابع هدف (عملکرد و چهار غلظت فلز سنگین) فراهم می‌آورد. در گام پایانی، با به‌کارگیری معادلات اختلاط خطی، راه‌حل بهینه به یک نسبت حجمی عملیاتی برای اختلاط آب چاه و پساب تبدیل می‌شود که وجه تمایز این پژوهش با مطالعات صرفاً نظری است. نوآوری پژوهش حاضر تنها به کارگیری مدل اثرات متقابل کامل و الگوریتم NSGA-II محدود نمی‌شود بلکه علاوه بر استخراج جبهه پارتو، تحلیل سطوح پاسخ چندهدفه نیز به‌کار گرفته شده است. این تحلیل، برخلاف جبهه پارتو که صرفاً نقاط بهینه را در فضای تصمیم نشان می‌دهد، قادر است رفتار غیرخطی توابع هدف را در سراسر فضای طراحی ترسیم نموده و نواحی پرخطر (مناطق که افزایش عملکرد با جهش ناگهانی در غلظت فلزات همراه است) را شناسایی نماید. بدین ترتیب، ترکیب جبهه پارتو و سطوح پاسخ چندهدفه، دیدگاهی جامع‌تر برای تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم می‌آورد که در مطالعات پیشین کم‌تر مورد بررسی قرار گرفته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و مجموعه داده‌های تجربی

داده‌های اولیه مورد استفاده در این پژوهش، مستخرج از یک مطالعه مزرعه‌ای سه‌ساله (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱) که توسط خوش‌روش و پورغلام آمیجی (۱۴۰۲) در مزرعه‌ای واقع در روستای آرمیج کلای شهرستان بابلسر، استان مازندران به انجام رسید، استفاده گردید. این مزرعه در مختصات ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه عرض جغرافیایی شمالی و ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول جغرافیایی شرقی با ارتفاع ۲۱- متر از سطح دریا واقع شده است. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مزرعه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس آمار بلندمدت سی‌ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، میانگین بارش سالانه در این منطقه ۸۹۱ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. آزمایش‌ها در لایسمترهایی از جنس PVC با قطر ۶۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر و در قالب طرح بلوک کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شدند. تیمارهای اصلی شامل پنج سطح اختلاط آب چاه و پساب شهری تصفیه‌شده بودند که عبارتند از: (I1) آب چاه خالص، (I2) ۲۵٪ پساب + ۷۵٪ آب چاه، (I3) ۵۰٪ پساب + ۵۰٪ آب چاه، (I4) ۷۵٪ پساب + ۲۵٪ آب چاه و (I5) ۱۰۰٪ پساب. مجموعه داده‌های ورودی به مدل شامل سه گروه اصلی به شرح زیر می‌باشد:



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

داده‌های ورودی به مدل

الف) متغیرهای مستقل (پارامترهای کیفیت آب): شش پارامتر شیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC)، غلظت سدیم (Na^+)، نسبت جذب سدیم (SAR)، غلظت کلسیم (Ca^{2+})، غلظت منیزیم (Mg^{2+}) و غلظت نیتروژن کل (N) به عنوان ورودی‌های مدل در نظر گرفته شدند. ب) متغیرهای وابسته (توابع هدف): پنج متغیر پاسخ شامل عملکرد دانه ذرت علوفه‌ای (با هدف حداکثرسازی تابع) و غلظت چهار فلز



سنگین نیکل (Ni)، روی (Zn)، کادمیم (Cd) و سرب (Pb) در بافت گیاه (با هدف کمینه‌سازی تابع) مورد ارزیابی قرار گرفتند. کلیه داده‌های مربوط به فلزات سنگین بر حسب میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه ($\mu\text{g/g}$) بیان می‌شوند.

ج) ساختار داده‌ها: هر مشاهده (نقطه داده) در این پژوهش، معادل یک لایسیمتر در یک سال زراعی مشخص تعریف شده است. به عبارت دیگر، هر ترکیب منحصر به فرد از سه عامل: سال (۳ سطح)، تیمار آبیاری (۵ سطح) و تکرار (۳ سطح)، یک مشاهده مستقل محسوب می‌گردد. با توجه به وجود ۳ سال آزمایش، ۵ تیمار آبیاری و ۳ تکرار، مجموعاً ۴۵ نقطه در پایگاه داده اولیه وجود دارد که موجب ایجاد یک ماتریس نهایی با ابعاد 45×11 (۴۵ مشاهده و ۱۱ متغیر شامل ۶ متغیر مستقل و ۵ متغیر وابسته) برای تحلیل رگرسیونی گردید. مقادیر پارامترهای کیفیت آب برای هر ترکیب {سال $\times$ تیمار} یکسان و مستقل از تکرار بوده و در فرایند تحلیل، این مقادیر برای تکرارهای مربوطه بازتولید شده‌اند، در حالی که داده‌های عملکرد و فلزات سنگین برای هر تکرار به‌طور جداگانه ثبت گردیده‌اند. جدول (۱) خلاصه‌ای از دامنه تغییرات پارامترهای کیفیت آب در منابع آبی مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های شیمیایی آب چاه و پساب شهری مورد استفاده در آماده‌سازی تیمارها			
پارامتر	واحد	آب چاه	پساب شهری
هدایت الکتریکی (EC)	ds/m	۰/۵۹	۱/۱۴
کلسیم (Ca^{2+})	meq/lit	۲/۹۵	۴/۴۰
منیزیم (Mg^{2+})	meq/lit	۲/۱۴	۴۱/۶۱
سدیم (Na^{+})	meq/lit	۱/۶۷	۱۲/۲۰
SAR	-	۱/۰۴	۲/۵۴
نیترژن کل (N)	mg/lit	۴/۷۰	۳۹/۸۷

رویکرد تحلیلی و چارچوب مدل‌سازی

روش‌شناسی این پژوهش مبتنی بر یک رویکرد دو مرحله‌ای شامل: (۱) مدل‌سازی رگرسیونی چندگانه برای شناسایی روابط بین کیفیت آب و پاسخ‌های گیاه و (۲) بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک NSGA-II برای یافتن بهترین ترکیب کیفیت آب قابل حصول از طریق اختلاط منابع موجود به منظور حداقل‌سازی غلظت عناصر سنگین (نیکل، روی، کادمیم و سرب) موجود در بافت گیاه و هم‌زمان حداکثرسازی عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه‌ای بوده است.

توسعه مدل‌های پیش‌بینی رگرسیونی

برای برقراری ارتباط ریاضی میان ماتریس متغیرهای مستقل X (پارامترهای کیفیت آب) و بردار هر یک از متغیرهای وابسته Y (عملکرد کمی و فلزات سنگین)، سه ساختار رگرسیونی متفاوت مورد آزمون قرار گرفتند:
الف) مدل خطی؛ این مدل تنها شامل اثرات اصلی متغیرها است (رابطه ۱):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i X_i \quad \text{(رابطه ۱)}$$

که X_i در این رابطه، نشان‌دهنده پارامترهای شش‌گانه کیفیت آب (EC ، Na^{+} ، SAR، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و H) می‌باشد.

ب) مدل درجه دوم؛ این مدل شامل اثرات اصلی به همراه ترم‌های توان دوم متغیرها می‌باشد (رابطه ۲):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^6 \beta_{ii} X_i^2 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

ج) مدل اثرات متقابل؛ این مدل علاوه بر اثرات اصلی، تمامی اثرات متقابل دوگانه بین متغیرهای مستقل را نیز در بر می‌گیرد (رابطه ۳):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^6 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^5 \sum_{j=i+1}^6 \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در این معادله، ترم $X_i X_j$ بیان‌گر اثر متقابل دو پارامتر بر یکدیگر است (مانند اثر همزمان شوری (EC) و سدیم (Na^+) بر جذب فلز سنگین). این مدل جمعاً دارای ۲۲ ترم (۱ عرض از مبدأ + ۶ ترم خطی + ۱۵ ترم اثر متقابل) می‌باشد.

پس از برازش هر سه مدل بر روی کل داده‌های معتبر (۴۵ داده)، از معیار آماری ضریب تعیین تعدیل‌شده ($Adj.R^2$) بر اساس داده‌های برازش با استفاده از رابطه $\frac{SSE}{SST} \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right)$ محاسبه گردید، که در آن n تعداد مشاهدات، p تعداد پارامترهای مدل، SSE مجموع مربعات باقیمانده‌ها و SST مجموع مربعات کل است. نتایج ارزیابی مدل‌ها که در جدول (۲) خلاصه شده است، نشان داد که مدل اثرات متقابل با میانگین $R_{adj}^2 = 0.9968$ بهترین عملکرد را در پیش‌بینی اهداف چندگانه دارد. بر این اساس، ساختار مدل اثرات متقابل (رابطه ۳) به عنوان تابع برازش^۱ در الگوریتم NSGA-II انتخاب گردید.

جدول ۲. مقایسه عملکرد مدل‌های رگرسیونی بر اساس معیار ضریب تعیین تعدیل‌شده

مدل رگرسیونی	تعداد ترم‌ها	عملکرد	نیکل	روی	کادمیوم	سرب	میانگین
خطی	۷	۰/۹۶۵۹	۰/۹۹۶۲	۰/۹۹۸۱	۰/۹۹۸۴	۰/۹۹۰۵	۰/۹۸۹۸
اثرات متقابل	۲۲	۰/۹۸۵۰	۰/۹۹۹۴	۰/۹۹۹۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۶۸
درجه دوم	۱۳	۰/۹۸۰۱	۰/۹۹۶۰	۰/۹۹۸۸	۰/۹۹۹۹	۰/۹۹۵۲	۰/۹۹۴۰

بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II

با توجه به تضاد ذاتی بین هدف حداکثرسازی عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه‌ای و اهداف کمینه‌سازی غلظت فلزات سنگین، یک راه‌حل منحصربه‌فرد که تمام اهداف را به طور هم‌زمان بهینه کند وجود ندارد. لذا در این مطالعه از الگوریتم NSGA-II که یک الگوریتم قدرتمند و مبتنی بر نخبه‌گرایی^۲ برای یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو است، استفاده شد (Deb et al., 2002). این الگوریتم یک روش فراابتکاری مبتنی بر مفهوم غلبه پارتو (*Pareto Dominance*) است که قادر است مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه نامغلوب را تحت عنوان جبهه پارتو (*Pareto Front*) استخراج نماید. جبهه پارتو دربرگیرنده نقاطی است که هیچ راه‌حل دیگری در فضای جستجو وجود ندارد که بتواند بدون بدتر کردن حداقل یک هدف، هدف دیگری را بهبود بخشد.

تعریف فضای جستجو و محدودیت‌ها

متغیرهای تصمیم‌گیری در این مسأله، همان شش پارامتر کیفیت آب (EC ، Na^+ ، SAR ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و H (نیترژن کل)) هستند. برای اطمینان از کاربردی بودن راه‌حل‌های بهینه و امکان‌پذیر بودن دستیابی به آن‌ها در شرایط مزرعه از طریق اختلاط آب چاه و پساب، فضای جستجو یا همان دامنه مجاز تغییرات هر متغیر دقیقاً به بازه بین حداقل مقدار مشاهده‌شده در آب چاه و حداکثر مقدار مشاهده‌شده در پساب (مطابق جدول ۱) محدود گردید. اعمال این محدودیت یکپارچه تضمین می‌کند که هیچ راه‌حلی خارج از محدوده فیزیکی منابع آب در دسترس تولید نشود. علاوه بر محدودیت بازه‌ای متغیرهای تصمیم‌گیری، در فرایند ارزیابی توابع هدف، مقادیر پیش‌بینی‌شده هر تابع هدف (عملکرد و فلزات سنگین) به بازه کمینه و بیشینه مشاهدات تجربی همان تابع هدف محدود می‌گردند تا از بروز پیش‌بینی‌های خارج از دامنه داده‌ها و غیرقابل تفسیر فیزیکی نیز جلوگیری گردد.

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک

برای دستیابی به همگرایی مناسب و پوشش کامل جبهه پارتو، پارامترهای کنترلی الگوریتم پس از انجام آزمون و خطاهای اولیه مطابق با مقادیر مندرج در جدول (۳) تنظیم گردیدند. افزایش اندازه جمعیت و تعداد نسل‌ها نسبت به مقادیر پیش‌فرض متداول، به منظور کاوش دقیق‌تر در فضای شش‌بعدی مسأله صورت پذیرفت.

برای وزن‌دهی به اهداف پنج‌گانه در تحلیل حساسیت ترکیبی و انتخاب راه‌حل متعادل از جبهه پارتو، چهار استراتژی وزنی در کد محاسباتی برای کاربر تعریف شده است: الف) متوازن: با وزن ۴۰٪ برای عملکرد و ۱۵٪ برای هر فلز (پیش‌فرض)، ب) عملکرد محور: با وزن ۶۰٪ برای عملکرد و ۱۰٪ برای هر فلز، ج) ایمنی محور: با وزن ۲۰٪ برای عملکرد و ۲۰٪ برای هر فلز و ۴) اولویت فلزات سنگین: با وزن ۱۰٪ برای عملکرد و ۳۰٪ برای نیکل و ۲۰٪ برای سایر فلزات. کاربر (محقق یا مدیر کشاورزی) می‌تواند متناسب با اولویت‌های مدیریتی خود، هر یک از این سناریوها را انتخاب نماید. در پژوهش حاضر، استراتژی متوازن به عنوان پیش‌فرض و مبنای تحلیل‌ها انتخاب

1. Fitness Function

2. Elitism



شده است، زیرا توازن منطقی‌تری میان اهداف اقتصادی (عملکرد) و ایمنی محیطی (فلزات سنگین) برقرار می‌کند.

جدول ۳. پارامترهای تنظیم شده برای اجرای الگوریتم NSGA-II

پارامتر	مقدار تنظیم شده	توضیح
اندازه جمعیت (<i>Population Size</i>)	۵۰۰	تعداد راه‌حل‌ها در هر نسل
حداکثر نسل (<i>Max Generations</i>)	۱۰۰۰	معیار توقف الگوریتم
نرخ تقاطع (<i>Crossover Rate</i>)	۰/۷	احتمال انجام عملگر تقاطع روی والدین
شاخص توزیع تقاطع (η_c)	۱۵	کنترل گستردگی تقاطع SBX
نرخ جهش (<i>Mutation Rate</i>)	۰/۲	احتمال رخداد جهش در هر ژن
شاخص توزیع جهش (η_m)	۲۰	کنترل شدت جهش چندجمله‌ای

مراحل اجرای الگوریتم

در آغاز کار، یک جمعیت اولیه شامل ۵۰۰ بردار پارامتر کیفیت آب به صورت تصادفی در فضای جستجوی تعریف شده تولید شد. سپس به مدت ۱۰۰۰ نسل، مراحل زیر به صورت تکراری اجرا گردید:

ارزیابی اهداف: برای هر عضو جمعیت، پنج تابع هدف (عملکرد و چهار فلز سنگین) با استفاده از ضرایب مدل رگرسیونی اثرات متقابل محاسبه گردید.

مرتب‌سازی نامغلوب سریع: برای تمامی اعضای جمعیت بر اساس مفهوم غلبه پارتو (*Pareto Dominance*) در جبهه‌های مختلف ($F1, F2, \dots$) طبقه‌بندی شدند. راه‌حلی بر دیگری غلبه دارد اگر در همه اهداف بهتر یا مساوی بوده و حداقل در یک هدف به‌طور خاص بهتر باشد (برای عملکرد مقدار بیشتر و برای فلزات مقدار کمتر). به‌گونه‌ای که ابتدا جبهه اول ($F1$) شامل جواب‌هایی است که توسط هیچ راه‌حل دیگری مغلوب نمی‌شوند و سپس این جواب‌ها از مجموعه حذف شده و جبهه دوم ($F2$) شامل جواب‌هایی است که تنها توسط اعضای $F1$ مغلوب می‌شوند و این فرایند تا تخصیص رتبه به تمام اعضای جمعیت ادامه خواهد داشت.

محاسبه فاصله ازدحامی: برای حفظ تنوع ژنتیکی و جلوگیری از تجمع راه‌حل‌ها در یک ناحیه از جبهه پارتو، فاصله نسبی هر راه‌حل با همسایگانش در فضای اهداف محاسبه شد. محاسبه فاصله ازدحامی بر اساس روش استاندارد NSGA-II و با نرمال‌سازی مقادیر هر تابع هدف در بازه $[0,1]$ انجام شد، به‌گونه‌ای که به نقاط مرزی (کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار در هر هدف) فاصله ازدحامی بی‌نهایت نسبت داده می‌شود تا در فرایند انتخاب، بقای خود را حفظ نمایند.

انتخاب والدین: از روش انتخاب تورنمنت دودویی استفاده شد. در مقایسه دو عضو، ابتدا عضوی که رتبه جبهه پایین‌تری (عدد کوچک‌تر) داشت انتخاب می‌شد. در صورت تساوی در رتبه، عضوی که فاصله ازدحامی بیشتری داشت (در ناحیه خلوت‌تری قرار داشت) برگزیده می‌شد.

تولید نسل جدید: از عملگر تقاطع دودویی شبیه‌سازی شده (*Simulated Binary Crossover - SBX*) و عملگر جهش چندجمله‌ای (*Polynomial Mutation*) برای تولید جمعیت فرزندان استفاده شد.

نخه‌گرایی و انتخاب جمعیت بعدی: جمعیت والدین و فرزندان با یکدیگر ادغام شده ($2N=1000$) و پس از مرتب‌سازی نامغلوب، ۵۰۰ عضو برتر برای نسل بعدی گزینش گردیدند.

پس از پایان آخرین نسل، جبهه اول ($F1$) به عنوان جبهه پارتو نهایی معرفی گردید که شامل مجموعه راه‌حل‌های بهینه نامغلوب است.

تحلیل حساسیت پارامترهای کیفیت آب

به‌منظور شناسایی تأثیرگذاری پارامترهای کلیدی کیفیت آب بر توابع هدف چندگانه، یک تحلیل حساسیت موضعی در نقطه بهینه متعادل^۴ جبهه پارتو انجام پذیرفت. در این نقطه، حساسیت هر متغیر X_i با استفاده از روش تفاضل محدود مرکزی^۵ محاسبه گردید (Saltelli et al., 2008). بدین‌صورت که مقدار پارامتر X_i به میزان $\pm 5\%$ درصد تغییر داده شده و تغییرات نسبی در خروجی مدل‌های رگرسیونی

1. Fast Non-dominated Sort
2. Crowding Distance
3. Crossover and Mutation
4. Balanced Solution
5. Central Finite Difference

اندازه‌گیری شد. در ادامه، یک شاخص حساسیت ترکیبی با استفاده از وزن‌هایی که توسط کاربر در ابتدای اجرای کد تعریف شده بود که نشان‌دهنده اولویت‌های مدیریتی است، محاسبه گردید. در این مطالعه، وزن‌های ورودی به صورت: عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه‌ای ۰/۴۰ و هر یک از فلزات سنگین ۰/۱۵ تعریف شدند. معادله شاخص حساسیت ترکیبی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Combined Sensitivity} = (0.40 * S_{Yield}) - (0.15 * S_{Ni} + 0.15 * S_{Zn} + 0.15 * S_{Cd} + 0.15 * S_{Pb}) \quad (\text{رابطه ۴})$$

علامت منفی در مقابل ضرایب فلزات سنگین نشان‌دهنده آن است که افزایش حساسیت این پارامترها (افزایش سمیت عناصر سنگین) تأثیر منفی بر امتیاز کلی دارد. این تحلیل، رتبه‌بندی اهمیت پارامترهای شش‌گانه را برای مدیریت کیفی آب آبیاری فراهم می‌آورد.

محاسبه نسبت اختلاط

همان‌طور که بیان شد، خروجی الگوریتم NSGA-II یک مجموعه از راه‌حل‌های نامغلوب تحت عنوان جبهه پارتو است که هر یک نشان‌دهنده یک سناریوی مدیریتی ممکن بین عملکرد بالا و سمیت پایین می‌باشد. به منظور ارائه یک توصیه عملیاتی واحد برای کاربرد در مزرعه، لازم است یک نقطه از میان این جبهه به عنوان راه‌حل بهینه متعادل برگزیده شود. در این پژوهش، این گزینش با استفاده از روش فاصله‌سنجی از نقطه ایده‌آل صورت پذیرفت (Deb, 2001). در این روش، ابتدا مقادیر هر پنج تابع هدف (عملکرد و چهار فلز سنگین) برای تمامی اعضای جبهه پارتو در بازه [0,1] نرمال‌سازی شدند. یک نقطه فرضی با عنوان نقطه ایده‌آل تعریف گردید که در آن عملکرد بیشینه ($Y_{norm} = 1$) و غلظت فلزات سنگین کمینه ($HM_{norm} = 0$) باشد. متعاقباً فاصله هندسی مستقیم هر یک از راه‌حل‌های پارتو تا این نقطه ایده‌آل در فضای پنج‌بعدی با اعمال وزن‌هایی که قبلاً توسط کاربر تعریف شد، محاسبه گردید. برای نرمال‌سازی توابع هدف در روش فاصله‌سنجی از نقطه ایده‌آل، از روش Min-Max استفاده شد که در آن کمینه و بیشینه هر تابع هدف، به ترتیب از مقادیر متناظر در جبهه پارتو استخراج گردید. این رویکرد، امکان مقایسه عادلانه راه‌حل‌های نامغلوب را در فضای پنج‌بعدی فراهم می‌آورد. راه‌حلی که مطابق رابطه (۵)، کم‌ترین مقدار این فاصله را به دست آورد، به عنوان راه‌حل بهینه متعادل (Balanced Solution) انتخاب شد:

$$D_j = \sqrt{w_y * (1 - Y_{norm,j})^2 + w_{Ni} * (Ni_{norm,j})^2 + w_{Zn} * (Zn_{norm,j})^2 + w_{Cd} * (Cd_{norm,j})^2 + w_{Pb} * (Pb_{norm,j})^2} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در این رابطه، D_j فاصله اقلیدسی وزنی راه حل زام از نقطه ایده‌آل

$Y_{norm,j}$ مقدار نرمال‌شده عملکرد برای رابطه زام

$Ni_{norm,j}$ ، $Zn_{norm,j}$ ، $Cd_{norm,j}$ و $Pb_{norm,j}$ به ترتیب مقادیر نرمال‌شده غلظت نیکل، روی، کادمیوم و سرب برای راه‌حل زام w_y ، w_{Ni} ، w_{Zn} ، w_{Cd} و w_{Pb} وزن‌های تعریف‌شده توسط کاربر برای هر هدف که به ترتیب (۰/۴۰، ۰/۱۵، ۰/۱۵، ۰/۱۵ و ۰/۱۵) می‌باشند.

پس از شناسایی بردار کیفیت آب بهینه (X_{opt})، گام نهایی شامل محاسبه نسبت اختلاط فیزیکی آب چاه و پساب برای حصول به این کیفیت در شرایط مزرعه بود. با فرض خطی بودن اختلاط برای پارامترهای شیمیایی (EC ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و H)، کسر حجمی مورد نیاز از پساب (f) برای هر پارامتر به صورت جداگانه از رابطه (۶) محاسبه گردید:

$$f_i = \frac{X_{opt,i} - X_{well,i}}{X_{waste,i} - X_{well,i}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این رابطه، $X_{well,i}$ و $X_{waste,i}$ به ترتیب بیان‌گر مقدار پارامتر i ام در آب چاه و پساب تصفیه‌شده شهری (مطابق با مقادیر ارائه‌شده در جدول ۱) می‌باشند. لازم به ذکر است که حل مستقیم رابطه (۶) برای برخی پارامترها ممکن است منجر به مقادیری خارج از بازه صفر تا یک ($0 \leq f_i \leq 1$) گردد. این وضعیت زمانی رخ می‌دهد که مقدار بهینه هدف‌گذاری‌شده ($X_{opt,i}$) از نظر فیزیکی در محدوده بین دو منبع آب موجود قرار نداشته باشد. در واقع نتیجه‌ای کمتر از مقدار متناظر در آب چاه بوده و یا فراتر از مقادیر پساب باشد. به منظور اصلاح این خطا و معنادار نمودن فیزیکی راه‌حل، در کد محاسباتی از یک فرآیند محدودسازی استفاده گردید که طی آن مقادیر منفی به صفر (صرفاً استفاده از آب چاه) و مقادیر بزرگ‌تر از یک به عدد یک (صرفاً استفاده از پساب ۱۰۰ درصد) تبدیل شدند.

با توجه به این‌که در شرایط عملیاتی مزرعه تنها یک شیر اختلاط برای ترکیب دو منبع آب وجود دارد، می‌بایست یک نسبت مشخص برای اجرایی بودن کار توسط کشاورز ارائه گردد. از این‌رو، نسبت اختلاط نهایی پیشنهادی ($f_{overall}$) از محاسبه میانگین حسابی مقادیر محدودشده (f_i) متعلق به پنج پارامتر خطی (EC ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و H) حاصل گردید. شایان ذکر است که پارامتر نسبت جذب سدیم (SAR) به دلیل ماهیت غیرخطی آن در فرآیند اختلاط یون‌های یک و دو ظرفیتی به‌طور عمده از فرآیند میانگین‌گیری مستثنی گردید.



با این وجود، به منظور راستی آزمایی صحت نسبت پیشنهادی، مقدار SAR در آب مخلوط نهایی ($f_{overall}$) با استفاده از غلظت های یونی اختلاط یافته و جای گذاری در فرمول استاندارد $SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$ مجدداً محاسبه گردید (Ayers & Westcot, 1985). اگرچه روش های جایگزین نظیر حل مستقیم معکوس مدل یا بهینه سازی مستقیم روی کسر اختلاط از دقت ریاضی بالاتری برخوردارند اما به دلیل پیچیدگی محاسباتی و عدم تضمین حصول یک نسبت واحد که همزمان تمام پارامترها را لحاظ کند، برای کاربرد عملی در مزرعه کمتر مناسب هستند. از این رو، در این پژوهش سادگی و قابلیت اجرا بر پیچیدگی ریاضی صرفاً برای عملیاتی شدن نتایج در مزرعه اولویت داده شده است.

مبانی نرم افزاری و محاسباتی

تمامی محاسبات و الگوریتم ها در محیط نرم افزار MATLAB (R2014a, The MathWorks Inc., USA) و با استفاده از کدنویسی (بدون وابستگی به جعبه ابزارهای اختصاصی) پیاده سازی گردید تا حداکثر سازگاری با نسخه های پایه نرم افزار نیز فراهم گردد. خروجی های نهایی شامل نمودارهای جبهه پارتو، نمودارهای هم گرایی الگوریتم و جداول نتایج در قالب تصاویر و فایل های داده Excel ذخیره سازی شدند.

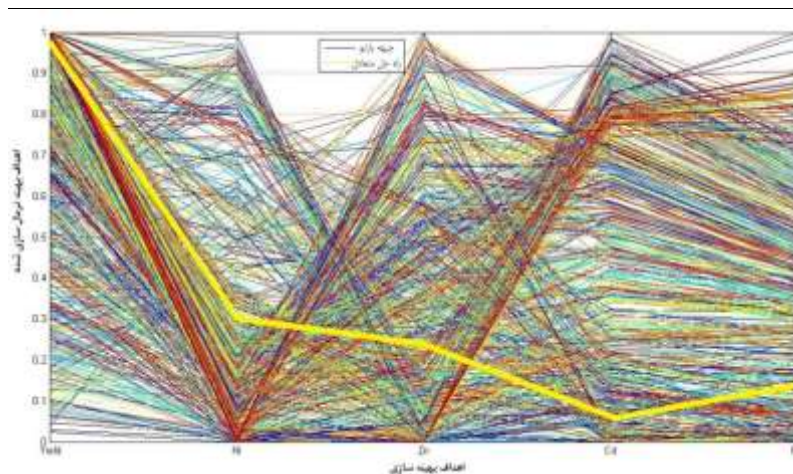
نتایج و بحث

نتایج بهینه سازی چندهدفه و تحلیل جبهه پارتو

الگوریتم NSGA-II با موفقیت به هم گرایی رسید و جبهه پارتو شامل ۵۰۰ راه حل نامغلوب را در انتهای ۱۰۰۰ نسل ارائه نمود. روند هم گرایی نشان می دهد که مقدار تابع برازش (بهترین عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه ای) و تعداد راه حل های نامغلوب (Pareto Size) تقریباً از نسل ۶۰۰ به بعد به پایداری رسیده اند که نشان دهنده کفایت تعداد نسل های در نظر گرفته شده می باشد. نمودار هم گرایی الگوریتم های ژنتیک چندهدفه، ابزاری استاندارد برای اطمینان از عدم توقف زودرس در بهینه های محلی است. هم چنین پایداری در نسل های انتهایی این نوع الگوریتم نشان دهنده استخراج موفق مرز پارتو (Pareto Frontier) می باشد. در چنین مسائلی، معمولاً بهبود یکی از اهداف منجر به تضعیف اهداف دیگر می شود. یک جواب زمانی روی این مرز قرار می گیرد که دیگر نتوان آن را بدون بدتر کردن حداقل یکی از اهداف دیگر، بهبود بخشید. استخراج موفق این مرز توسط الگوریتم های ژنتیک چندهدفه NSGA-II به معنای یافتن و شناسایی مجموعه ای متنوع و کامل از این جواب های بهینه پارتو (Pareto-optimal solutions) است (Deb et al., 2002). مطالعات مشابه در حوزه مدیریت منابع آب نشان می دهد که استفاده از NSGA-II به دلیل توانایی بالا در حفظ تنوع راه حل ها، منجر به استخراج جبهه پارتو با پوشش مناسب فضای تصمیم خواهد شد (Reed et al., 2013).

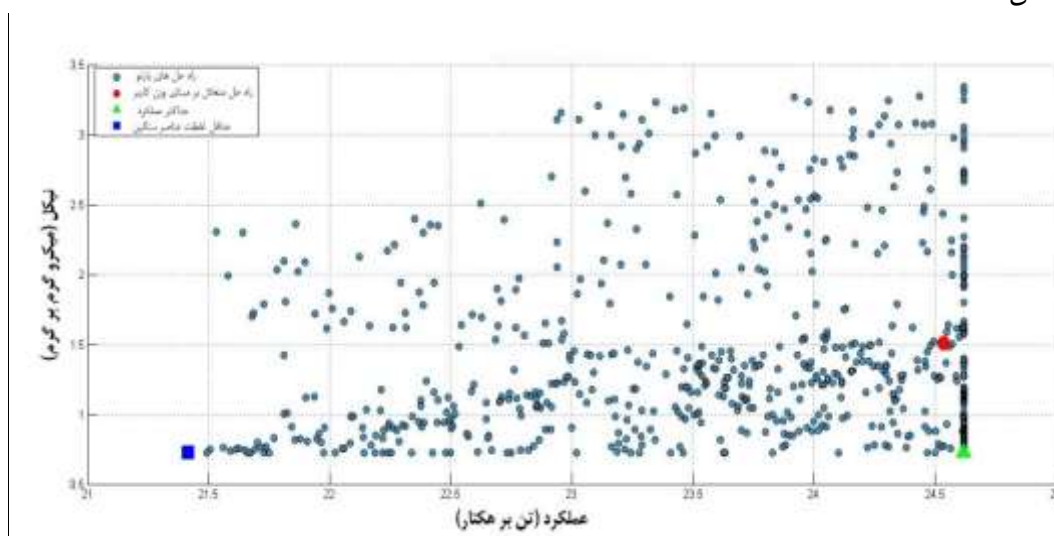
جبهه پارتو نهایی بیانگر تضاد آشکار بین هدف حداکثر سازی عملکرد و اهداف کمینه سازی فلزات سنگین است. شکل (۲) نمودار مختصات موازی (Parallel Coordinates) جبهه پارتو نهایی را برای حل همزمان چهار هدف کمینه سازی غلظت عناصر فلزات سنگین و یک هدف بیشینه سازی عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه ای را نشان می دهد. در این نمودار، هر خط رنگی نمایانگر یک راه حل بهینه نامغلوب از میان ۵۰۰ راه حل نهایی است. محور افقی بیانگر پنج تابع هدف نرمال سازی شده می باشد (عدد ۱ نشان دهنده مطلوب ترین وضعیت برای عملکرد و عدد ۰ نشان دهنده مطلوب ترین وضعیت برای هر یک از فلزات سنگین است). رنگ خطوط بر اساس مقدار عملکرد (Yield) دسته بندی شده است (رنگ قرمز: عملکرد بالا، رنگ آبی: عملکرد پایین). همان طور که در این شکل مشاهده می شود، یک تضاد ساختاری آشکار بین هدف عملکرد و اهداف فلزات سنگین وجود دارد. خطوط قرمز رنگ (راه حل های با عملکرد برتر در سمت چپ محور (هدف عملکرد) به مقادیر بالا (نزدیک به ۱) همگرا شده اند، اما در سمت راست محور (اهداف فلزات سنگین) به ناچار از مقدار ایده آل (صفر) فاصله گرفته و به سمت مقادیر بالاتر (وضعیت نامطلوب تر) منحرف می شوند. در مقابل، خطوط آبی رنگ (راه حل های با عملکرد کمتر) توانسته اند در بخش فلزات سنگین به مقادیر بسیار نزدیک به صفر (ایمن ترین وضعیت) دست یابند. این نمودار به خوبی اثبات می کند که دستیابی همزمان به حداکثر عملکرد و حداقل آلاینده گی در این سیستم امکان پذیر نبوده و هرگونه تصمیم گیری مدیریتی مستلزم پذیرش یک رقابت تضادی (Trade-off) بین کمیت و کیفیت محصول است. خط زرد رنگ که از میان این خطوط عبور کرده است، راه حل بهینه منتخب (Balanced Solution) را نشان می دهد که بر اساس وزن های تعریف شده توسط کاربر (عملکرد ۴۰٪ و مجموع فلزات ۶۰٪) به عنوان نزدیک ترین گزینه به نقطه ایده آل انتخاب شده است. موقعیت خط زرد نشان می دهد که راه حل پیشنهادی با قبول افزایش

اندک در غلظت نیکل (Ni) و روی (Zn)، موفق به حفظ عملکرد در سطحی نزدیک به بیشینه شده است. در موضوعات بهینه‌سازی از این رفتار که در آن بهبود یک هدف منجر به تضعیف اهداف دیگر می‌گردد چندهدفه تحت عنوان Pareto Trade-off شناخته شده که اساس تصمیم‌گیری در مدیریت پایدار منابع است (Coello Coello et al., 2007).



شکل ۲. نمودار مختصات موازی جبهه نهایی پارتو (Parallel Coordinates)

به‌گونه‌ای که حرکت به سمت عملکردهای بالاتر (بیش از حدوداً $24/5$ تن در هکتار) به‌ناچار با افزایش غلظت عناصر سنگین همراه خواهد بود. راه‌حل‌های پارتو (Pareto Solution) برای حداکثرسازی عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه‌ای و حداقل‌سازی غلظت عناصر سنگین در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. راه‌حل‌های پارتو (Pareto Solution) و جبهه پارتو نهایی برای اهداف عملکرد و غلظت نیکل

بررسی نقاط جبهه پارتو ایجاد شده در این شکل نشان می‌دهد که عملکرد حدوداً بیش‌تر از $24/6$ تن در هکتار (رنگ سبز) یا عملکرد بیش‌تر از $24/53$ تن در هکتار (رنگ قرمز، نقطه متعادل بر مبنای وزن‌های ورودی تعریف‌شده توسط کاربر در ابتدای کد) سبب خواهد شد که مقادیر غلظت عناصر سنگین متقابلاً افزایش داشته باشند و در واقع از نقطه حداقلی خودش خارج گردد که با توجه به هدف حداقل‌سازی عناصر سنگین نشان‌دهنده خروج از اهداف تعیینی اولیه خواهد بود.

بر اساس روش نقطه ایده‌آل و با اعمال وزن‌های تعریف‌شده توسط کاربر در ابتدای کد حل عددی (عملکرد: $0/40$ ، فلزات: هر کدام $0/15$)، راه‌حل بهینه متعادل (Balanced Solution) استخراج گردید. مشخصات این راه‌حل به‌همراه راه‌حل‌های حدی (بیشترین مقدار عملکرد کمی گیاه ذرت علوفه‌ای یا کمترین مقدار غلظت عناصر سنگین) در جدول (۴) مقایسه شده است.



جدول ۴. مقایسه راه‌حل‌های شاخص استخراج شده از جبهه پارتو

راه حل	EC (ds/m)	Na (meq/lit)	SAR	Ca (meq/lit)	Mg (meq/lit)	N (mg/lit)	عملکرد (ton/ha)	Ni (μg/g)	Zn (μg/g)	Cd (μg/g)	Zn (μg/g)
متعادل	۱/۱۳	۳/۲۴	۱/۱۸	۲/۹۸	۲/۱۷	۴/۷۰	۲۴/۵۴	۱/۵۱	۱۷/۲۲	۰/۹۶	۱۴/۱۹
بیشینه عملکرد	۱/۱۴	۲/۶۱	۱/۳۸	۴/۴۰	۲/۱۴	۹/۰۷	۲۴/۶۲	۰/۷۲	۱۹/۶۱	۰/۸۶	۹/۶۷
کمینه عناصر	۱/۱۴	۲/۶۲	۱/۳۸	۴/۴۰	۲/۱۴	۱۰/۵۴	۲۱/۴۱	۰/۷۲	۱۶/۴۷	۰/۸۶	۹/۶۷

بررسی اعداد جدول (۴) نشان می‌دهد که راه‌حل بهینه متعادل توانسته است با حفظ عملکرد در سطح بسیار بالای ۲۴/۵۴ تن در هکتار، مقادیر فلزات سنگین را نیز به‌طور قابل توجهی نسبت به تیمار I5 (تیمار مینا با پساب ۱۰۰ درصد) کاهش دهد. مقایسه راه‌حل بهینه متعادل با بهترین تیمارهای منفرد در مزرعه (جدول ۵) نشان داده شده است. نکته قابل تأمل در این مقایسه، افزایش ۱۰۶٪ غلظت نیکل در راه‌حل بهینه نسبت به تیمار I1 است.

جدول ۵. میزان بهبود راه‌حل بهینه متعادل نسبت به بهترین تیمار موجود در مورد هر هدف

هدف	تیمار مزرعه‌ای (مینا)	مقدار بهینه متعادل	درصد تغییر (بهبود یا عدم بهبود)	توضیحات
عملکرد (ton/ha)	۲۴/۴۵ (I5)	۲۴/۵۴	٪+۰/۳۳	بهبود اندک در میزان عملکرد
نیکل (μg/g)	۰/۷۳ (I1)	۱/۵۱	٪-۱۰۶/۱۰	افزایش (اما در محدوده مجاز)
روی (μg/g)	۱۶/۵۰ (I1)	۱۷/۲۲	٪-۴/۳۷	افزایش جزئی
کادمیم (μg/g)	۰/۸۶ (I1)	۰/۹۵	٪-۱۱/۱۱	افزایش
سرب (μg/g)	۹/۷۳ (I1)	۱۴/۱۹	٪-۴۵/۸۵	افزایش

بررسی نتایج جدول (۵) نکات قابل توجهی را آشکار می‌سازد:

راه‌حل بهینه متعادل توانسته است با حفظ عملکرد در سطح بسیار بالای ۲۴/۵۴ تن در هکتار (نزدیک به بیشینه عملکرد ۲۴/۶۲ تن)، مقادیر فلزات سنگین را به‌طور قابل توجهی نسبت به تیمار I5 کاهش دهد. این مهم از طریق کاهش شدید غلظت سدیم (از ۱۲/۲۰ به ۳/۲۴ meq/L) و منیزیم (از ۴۱/۶۰ به ۲/۱۷ meq/L) نسبت به پساب ۱۰۰ درصد محقق شده است.

راه‌حل کمینه عناصر سنگین با وجود دستیابی به کم‌ترین میزان نیکل (Ni) و سرب (Zn)، منجر به افت ۱۳٪ عملکرد (۲۱/۴۲ تن) می‌شود که از نظر اقتصادی برای کشاورز مقرون به صرفه نیست. این موضوع اهمیت استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ایجاد توازن بین امنیت غذایی و سلامت محصول را برجسته می‌کند.

مقایسه راه‌حل بهینه متعادل با بهترین تیمارهای منفرد در مزرعه (جدول ۵) نشان می‌دهد که مدل بهینه‌سازی توانسته است عملکرد را در سطح رکورد تیمار I5 حفظ نموده و حتی ۰/۳۳٪ نیز بهبود بخشد. با این حال، این دستاورد بدون هزینه نبوده است. چنانچه در جدول (۴) ملاحظه می‌گردد، غلظت تمامی فلزات سنگین در راه‌حل بهینه متعادل نسبت به تیمار شاهد I1 (که کمترین سطح آلاینده را داشت) افزایش یافته است. این افزایش برای عناصر روی (۴/۳۷٪)، کادمیم (۱۱/۱۱٪) و به‌ویژه سرب (۸۵/۴۵٪) و نیکل (۱۰۶/۱۰٪) ثبت گردید. این افزایش اگرچه از نظر عددی بزرگ به نظر می‌رسد، اما باید توجه داشت که مقدار مطلق آن ۱/۵۱ μg/g به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از آستانه سمیت نیکل در گیاهان (۱۰-۱۰۰ μg/g) قرار دارد (Alloway, 1990). این پدیده یک رقابت تضادی هوشمندانه الگوریتمی (Trade-off) است. نکته کلیدی در تفسیر این نتایج آن است که اگرچه راه‌حل بهینه از منظر سلامت محصول، وضعیتی نامطلوب‌تر از آب چاه خالص دارد، اما در مقایسه با سناریوی آبیاری با پساب ۱۰۰ درصد (تیمار I5)، توانسته است غلظت سرب را از ۴۶/۸۵ به ۱۴/۱۹ میکروگرم بر گرم (کاهش ۷۰٪) و کادمیم را از ۸/۳۹ به ۰/۹۶ میکروگرم بر گرم (کاهش ۸۹٪) پایین آورد. این رقابت تضادی اهداف (Trade-off) به‌خوبی گویای آن است که الگوریتم برای دستیابی به عملکردی نزدیک به حداکثر، ناگزیر به پذیرش مقداری افزایش در غلظت فلزات سنگین شده است، اما این افزایش را به‌گونه‌ای مدیریت کرده که هم‌چنان در مقایسه با منبع اصلی آلودگی (پساب ۱۰۰ درصد یا همان تیمار I5) یک بهبود چشمگیر محسوب می‌شود.

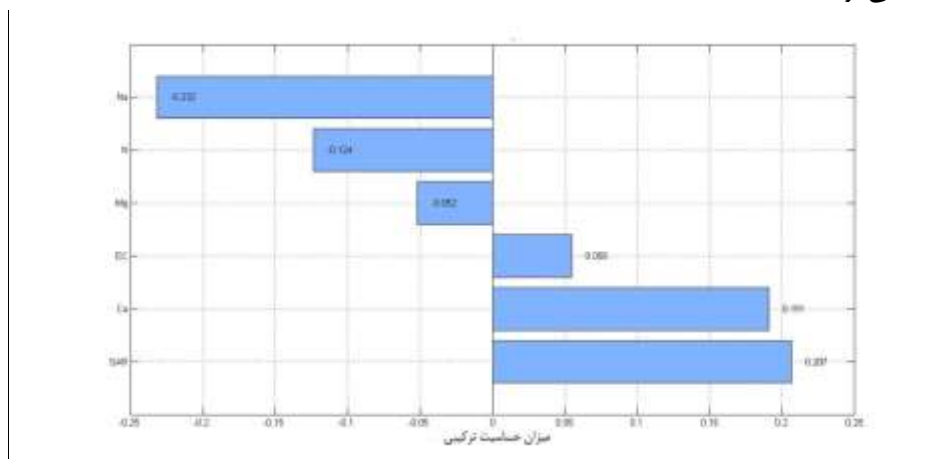
در تفسیر افزایش غلظت نیکل و سرب در راه‌حل بهینه نسبت به تیمار I1 (آب چاه)، باید توجه داشت که این افزایش، هزینه‌ای است که برای دستیابی به عملکردی در حدود ۳۳ درصد بالاتر (۲۴/۵۴) در برابر ۱۸/۳۹ تن در هکتار پرداخت شده است. با این حال، مقادیر مطلق عناصر سنگین در راه‌حل پیشنهادی شامل نیکل (۱/۵۱ میکروگرم بر گرم)، سرب (۱۴/۱۹ میکروگرم بر گرم)، کادمیم (۰/۹۶ میکروگرم بر گرم)

گرم) و روی (۱۷/۲۲ میکروگرم بر گرم) همگی به‌طور قابل‌توجهی پایین‌تر از آستانه‌های سمیت گزارش‌شده در منابع معتبر هستند (Alloway, 1990; Kabata-Pendias, 2011). به‌گونه‌ای که آستانه سمیت برای نیکل بیش از ۵۰، برای سرب بیش از ۳۰، برای کادمیم بیش از ۵ و برای روی بیش از ۱۵۰ میکروگرم بر گرم وزن خشک گیاه گزارش شده است. بنابراین از منظر سیاست‌گذاری آبیاری، راه‌حل پیشنهادی یک مصالحه هوشمندانه محسوب می‌شود که ضمن حفظ بهره‌وری اقتصادی در سطح حداکثر، مخاطرات زیست‌محیطی را به سطح ایمن و قابل‌قبولی کاهش داده است.

تحلیل حساسیت پارامترهای کیفیت آب

به‌منظور اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی در مزرعه، تحلیل حساسیت پارامترهای شش‌گانه کیفیت آب (EC ، Na^+ ، Mg^{2+} ، Ca^{2+} و H) بر اساس راه‌حل بهینه متعادل انجام پذیرفت. نتایج این تحلیل که در شکل (۴) و همچنین جدول (۶) ارائه شده است، رتبه‌بندی اهمیت پارامترها با در نظر گرفتن وزن‌های مشخص‌شده توسط کاربر در ابتدای حل عددی را مشخص می‌کند. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت ترکیبی، غلظت سدیم (Na^+) با ضریب حساسیت ۰/۲۳۲- به‌عنوان تأثیرگذارترین پارامتر در مدل بهینه‌سازی شناسایی شد. علامت منفی این شاخص دلالت بر آن دارد که در دامنه مورد مطالعه، افزایش غلظت سدیم در آب آبیاری بیشترین تأثیر منفی را بر بهبود هم‌زمان عملکرد گیاه و جذب عناصر سمی داشته است. این یافته با اصول فیزیولوژیک تنش شوری که افزایش سدیم از طریق ایجاد تنش اسمزی و اختلال در جذب عناصر ضروری نظیر پتاسیم (K^+) و کلسیم (Ca^{2+}) را منجر به کاهش رشد و افزایش نفوذپذیری غشا می‌داند، مطابقت دارد (Munns & Tester, 2008). در همین راستا، Tester & Davenport (2003) در یک بررسی جامع فیزیولوژیک، مکانیسم‌های مدیریت یون سدیم (Na^+) را تشریح نموده و نشان دادند که تحمل به شوری در گیاهان زراعی به‌ویژه غلات، حاصل مجموعه‌ای از فرآیندهای هماهنگ سلولی از قبیل محدودسازی جذب اولیه سدیم (Na^+) در ریشه و ذخیره‌سازی انتخابی آن در واکوئل‌های سلولی برگ‌ها می‌باشد. غلظت بالای سدیم (Na^+) در محلول خاک ناشی از آب آبیاری، ظرفیت این مکانیسم‌های دفاعی را تحت تأثیر قرار داده و منجر به بروز تنش یونی و افزایش نفوذپذیری غشا برای ورود سایر عناصر سمی به گیاه می‌گردد.

در رتبه دوم اهمیت، نسبت جذب سدیم (SAR) با ضریب حساسیت ۰/۲۰۷+ قرار گرفت. علامت مثبت این شاخص بیانگر یک رابطه غیرخطی و خاص در فیزیولوژی گیاه ذرت (به‌عنوان یک گیاه چهارکربنه یا گروه C4) است. بر خلاف انتظار اولیه از سمیت سدیم (Na^+)، در محدوده خاصی از غلظت‌های مطالعه‌شده، افزایش SAR که نشان‌دهنده افزایش نسبی سدیم به کلسیم و منیزیم است با بهبود عملکرد گیاه همراه بوده است. این پدیده نشان‌دهنده نظریه جایگزینی پتاسیم با سدیم در شرایط کمبود پتاسیم در این دسته از گیاه چهارکربنه است. جایی که گیاهان خانواده غلات و به‌ویژه گونه‌های C4 قادرند از سدیم برای تنظیم اسمزی و حفظ آماس سلولی برگ‌های گیاه استفاده ویژه در جلوگیری از پژمردگی و کمک به انجام فتوسنتز گیاهی نمایند (Wakeel et al., 2011). این یافته با نتایج Maathuis & Amtmann (1999) که نشان دادند در شرایط کمبود پتاسیم، سدیم می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین متابولیکی عمل کرده و از افت عملکرد جلوگیری کند، هم‌خوانی دارد. این دوگانگی رفتاری (حساسیت منفی غلظت مطلق سدیم و حساسیت مثبت نسبت سدیم) نشان‌دهنده وجود یک آستانه بحرانی است که در غلظت‌های پایین، سدیم نقش کمکی برای تغذیه گیاه و انجام فتوسنتز ایفا می‌کند، اما در غلظت‌های بالا، اثر سمی آن غالب می‌گردد.



شکل ۴. تحلیل حساسیت پارامترهای شش‌گانه کیفیت آب بر اساس راه‌حل بهینه متعادل (Balanced Solution)

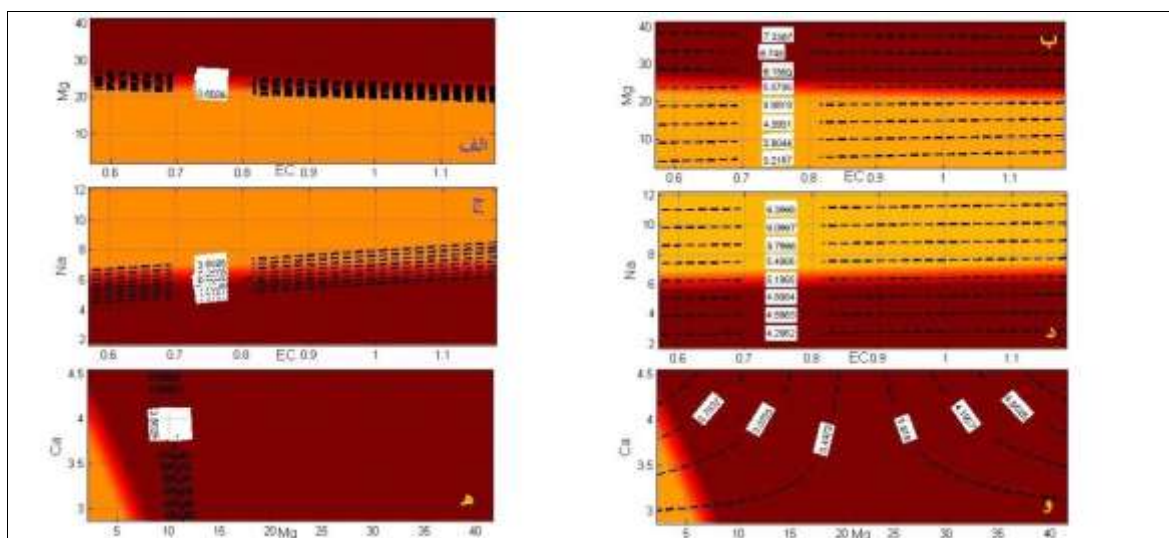
جدول ۶. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای کیفیت آب در نقطه بهینه متعادل

رتبه	پارامتر	حساسیت ترکیبی	تفسیر مدیریتی
۱	Na^+	-۰/۲۳۱۶	کاهش آن بیشترین بهبود را در توازن عملکرد سمیت ایجاد می‌کند.
۲	SAR	+۰/۲۰۶۸	افزایش نسبی آن (از طریق مدیریت نسبت کلسیم) در این محدوده مجاز است.
۳	Ca^{2+}	+۰/۱۹۱۰	افزایش آن به کاهش اثرات سوء سدیم و غلظت فلزات سنگین کمک می‌کند.
۴	N	-۰/۱۲۳۷	مدیریت دقیق آن برای جلوگیری از افزایش جذب کادمیم ضروری است.
۵	EC	+۰/۰۵۴۹	شاخص کلی شوری، حساسیت کمتری نسبت به ترکیبات یونی دارد.
۶	Mg^{2+}	-۰/۰۵۱۷	کمترین تأثیر را بر اهداف چندگانه دارد.

پس از سدیم (Na^+) و SAR، غلظت کلسیم (Ca^{2+}) و نیتروژن کل (N) به ترتیب در رتبه‌های سوم و چهارم حساسیت ترکیبی قرار گرفتند که تأکیدکننده نقش کلیدی تعادل عناصر غذایی در مدیریت تنش است. در نهایت، کمترین میزان حساسیت به عنصر منیزیم (Mg^{2+}) اختصاص یافت که نشان‌دهنده دامنه بالای تحمل گیاه ذرت نسبت به نوسانات این عنصر در آب آبیاری می‌باشد. این نتیجه با یافته‌های Grattan & Grieve (1999) مبنی بر اینکه سمیت یونی خاص منیزیم (Mg^{2+}) در مقایسه با سدیم و کلر در گیاهان زراعی به ندرت مشاهده می‌شود، مطابقت دارد.

تحلیل سطوح پاسخ چندهدفه

به منظور درک بهتر از چگونگی تأثیر هم‌زمان پارامترهای کلیدی کیفیت آب بر عملکرد-سمیت و همچنین شناسایی نواحی پرخطر در فضای تصمیم‌گیری، سطوح پاسخ چندهدفه بر اساس مدل رگرسیونی اثرات متقابل برای جفت پارامترهای کلیدی انتخاب شده ترسیم شد (شکل ۵). در این نمودارها، طیف رنگی پس‌زمینه نشان‌دهنده میزان پیش‌بینی شده عملکرد ذرت علوفه‌ای (ton/ha) و خطوط هم‌مقدار نیز نشان‌دهنده غلظت فلزات سنگین (نیکل در شکل‌های سمت چپ و کادمیم در شکل‌های سمت راست) می‌باشند. هر یک از این سطوح، رفتار مدل را در نواحی اندازه‌گیری نشده فضای تصمیم یعنی محدوده بین نقاط آزمایشی را نیز شبیه‌سازی می‌کنند و امکان شناسایی پدیده‌های غیرخطی پنهان را فراهم خواهند کرد.



شکل ۵. سطوح پاسخ چندهدفه: اندرکنش پارامترهای کیفیت آب بر عملکرد (رنگ) و غلظت فلزات سنگین (خطوط هم‌مقدار). (الف) اثر متقابل EC و Mg بر عملکرد و نیکل. (ب) اثر متقابل EC و Mg بر عملکرد و کادمیم. (پ) اثر متقابل EC و Na بر عملکرد و نیکل. (ت) اثر متقابل EC و Na بر عملکرد و کادمیم. (ث) اثر متقابل Ca و Mg بر عملکرد و نیکل. (ج) اثر متقابل Ca و Mg بر عملکرد و کادمیم.

(الف) اثر متقابل شوری (EC) و منیزیم (Mg^{2+}): ردیف اول شکل (۵-الف و ۵-ب) تأثیر هم‌زمان EC و Mg^{2+} را نشان می‌دهد. بررسی این نمودارها شان می‌دهد که تغییرات هم‌جهت EC و Mg^{2+} منجر به تغییر طیف رنگی از زرد به قرمز می‌گردد که بیان‌گر افزایش عملکرد در سطوح بالاتر این دو پارامتر بوده خصوصاً این افزایش عملکرد در سطوح بالاتر منیزیم (Mg^{2+}) بیش‌تر مشاهده می‌شود. با این حال، بررسی خطوط هم‌مقدار نیکل (۵-الف) و کادمیم (۵-ب) هشدار می‌سازد. تراکم خطوط هم‌مقدار در نواحی با رنگ

قرمز (عملکرد بالا) نشان‌دهنده افزایش شدیدتر غلظت فلزات سنگین در این محدوده است. به عبارت دیگر، اگرچه افزایش Mg^{2+} و EC به عملکرد بیش‌تر گیاه ذرت علوفه‌ای منجر می‌شود، اما نرخ افزایش سمیت در این ناحیه به مراتب بیشتر از نرخ افزایش عملکرد خواهد بود. این پدیده می‌تواند ناشی از اثر رقابتی منیزیم با کلسیم و افزایش نفوذپذیری غشای ریشه در شرایط شوری بالا باشد (Grattan & Grieve, 1999). راه‌حل بهینه متعادل با انتخاب سطحی از منیزیم که در آستانه تغییر رنگ به قرمز قرار دارد، از ورود به ناحیه‌ای که در آن شیب افزایش سمیت بر شیب افزایش عملکرد غلبه می‌کند، اجتناب نموده است.

ب) اثر متقابل شوری (EC) و سدیم (Na^+): ردیف دوم شکل (۵-ج و ۵-د) تأثیر متقابل دو پارامتر کلیدی EC و Na^+ را نشان می‌دهد. رفتار غیریکنواخت خطوط هم‌عملکرد نسبت به سدیم است. در بخش‌هایی از نمودار، افزایش سدیم با تغییر رنگ به سمت قرمز همراه است که نشان‌دهنده بهبود عملکرد می‌باشد. این نتیجه تأییدکننده تحلیل حساسیت (جدول ۶) و نظریه (Wakeel et al., 2011) است که بیان می‌دارند سدیم (Na^+) در غلظت‌های پایین و در شرایط کمبود پتاسیم، می‌تواند به‌عنوان یک عنصر سودمند برای گیاهان چهارکربنه (C4) ایفای نقش کند. با این وجود، در ادامه روند و در سطوح بالاتر، شیب خطوط هم‌مقدار کادمیم و نیکل به گونه‌ای تغییر می‌کند که نشان‌دهنده افزایش تصاعدی جذب این عناصر سمی است. این یافته با نتایج (Tiwari et al., 2008) مبنی بر افزایش مقدار کادمیم در حضور سدیم هم‌خوانی دارد و تأکید می‌کند که مدیریت SAR باید با احتیاط و در یک بازه مشخص صورت پذیرد.

ج) اثر متقابل منیزیم (Mg^{2+}) و کلسیم (Ca^{2+}): ردیف سوم شکل (۵-ه و ۵-و) به بررسی تعادل دو کاتیون دو ظرفیتی می‌پردازد. الگوی رنگی این نمودار نشان می‌دهد که ناحیه بهینه عملکرد (رنگ قرمز) در محدوده کلسیم بالا و طیف متنوعی از منیزیم متمرکز شده است. این یافته با نتایج جدول (۶) مبنی بر حساسیت پایین ایجاد شده توسط تغییرات منیزیم (Mg^{2+}) مطابقت دارد و حتی در محدوده $Mg^{2+} < 10$ و $Ca^{2+} < 4$ مقدار عملکرد کاهش چشم‌گیری (رنگ نارنجی) داشته است. موقعیت راه‌حل بهینه متعادل بر روی این نمودار نشان می‌دهد که الگوریتم با انتخاب یک نسبت متعادل از این دو کاتیون، از ناحیه پرخطر عدم تعادل کاتیونی (نسبت متوسط Ca^{2+}/Mg^{2+}) به سلامت عبور کرده است.

د) در تفسیر نتایج تحلیل حساسیت، تفاوت علامت ضرایب Na^+ (منفی) و SAR (مثبت) قابل تأمل است. اگرچه SAR تابعی از Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} است، اما مدل اثرات متقابل با در نظر گرفتن تمامی برهم‌کنش‌های دوگانه، امکان تفکیک اثرات مستقل را نیز فراهم می‌سازد. از منظر فیزیولوژیک، غلظت مطلق سدیم (Na^+) عامل اصلی تنش اسمزی و یونی بوده و افزایش آن جذب پتاسیم و کلسیم را مختل کرده و نفوذپذیری غشا را برای ورود فلزات سنگین افزایش می‌دهد (Munns & Tester, 2008). در مقابل، SAR به‌عنوان شاخص تعادل نسبی سدیم در برابر کلسیم و منیزیم، در گیاهان C4 مانند ذرت می‌تواند در شرایط کمبود پتاسیم، نقش جایگزین اسمزی ایفا کرده و از افت عملکرد جلوگیری نماید (Wakeel et al., 2011). بنابراین علامت مثبت SAR در این مطالعه، نشان‌دهنده اثر تعدیل‌کننده کلسیم و منیزیم در کاهش خسارت سدیم است و نه تناقض با اثر منفی Na^+ .

ه) در توجیه فیزیکی ارتباط میان کاتیون‌های آب آبیاری و غلظت فلزات سنگین در بافت گیاهی، دو مکانیسم اصلی قابل استناد است. الف) رقابت یونی در سطح غشای ریشه: به گونه‌ای که کاتیون‌های دوظرفیتی (مانند Ca^{2+} و Mg^{2+}) با فلزات سنگین دوظرفیتی (مانند Pb^{2+} و Cd^{2+}) برای اتصال به جایگاه‌های منفی غشای پلاسمایی ریشه رقابت کرده و از جذب این فلزات سمی جلوگیری می‌نمایند (Kinraide, 1992; Rengel, 1998). این مکانیسم توجیه‌کننده ضریب حساسیت مثبت Ca^{2+} (+۰/۱۹۱) در نتایج تحلیل حساسیت پژوهش حاضر است. ب) تأثیر کاتیون‌ها بر زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک: افزایش غلظت سدیم (Na^+) با افزایش نیروی یونی محلول خاک، می‌تواند فلزات سنگین را از سطح ذرات خاک جانشین نموده و زیست‌فراهمی آن‌ها را افزایش دهد (Acosta et al., 2011). همچنین افزایش SAR با افزایش pH خاک، بر حلالیت و شکل‌های شیمیایی فلزات سنگین تأثیر گذاشته و جذب آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Alloway, 1990). این یافته با ضریب حساسیت منفی Na^+ (-۰/۲۳۲) و مثبت SAR (+۰/۲۰۷) در نتایج تحلیل حساسیت پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد. به عبارت دیگر، غلظت مطلق سدیم (Na^+) با افزایش تنش اسمزی و نفوذپذیری غشا، جذب فلزات سنگین را تشدید می‌کند (Munns & Tester, 2008). در حالی که SAR به‌عنوان شاخص تعادل نسبی سدیم در برابر کلسیم و منیزیم، در شرایط کمبود پتاسیم در گیاهان C4 می‌تواند نقش تعدیل‌کننده داشته باشد. بنابراین رابطه میان کاتیون‌های آب آبیاری و غلظت فلزات سنگین در بافت گیاهی، نه یک هم‌بستگی تصادفی، بلکه مبتنی بر مکانیسم‌های فیزیکیوشیمیایی و فیزیولوژیک معتبر است.

نسبت اختلاط پیشنهادی برای کاربرد در مزارع کشت ذرت

با به کارگیری رابطه (۶) برای پنج پارامتر (EC ، Na^+ ، Ca^{2+} ، Mg^{2+} و N) و اعمال محدودسازی در بازه [0-1]، میانگین حساسی کسرهای



حجمی منفرد (f_i) منجر به نسبت اختلاط نهایی ۰/۲۲۹۶ یعنی معادل ۲۳٪ پساب و ۷۷٪ آب چاه گردید (جدول ۷). دامنه وسیع f_i ها (از ۰/۰۰۰۰۳ برای نیتروژن کل تا ۰/۹۷۵ برای هدایت الکتریکی) نشان‌دهنده این است که ایجاد هم‌زمان تمام مقادیر پارامترهای فوق با یک نسبت واحد امکان‌پذیر نبوده و نسبت اختلاط ۲۳٪ یک راه‌حل مصالحه‌ای با کمترین خطای کلی است.

جدول ۷- مقادیر f_i محاسبه شده و کیفیت آب مخلوط نهایی در مقایسه با مقادیر هدف

پارامتر	واحد	f_i	هدف	مخلوط	اختلاف
هدایت الکتریکی (EC)	ds/m	۰/۹۷۵۰۰	۱/۱۲۶	۰/۷۱۶	-۰/۴۱۰
کلسیم (Ca^{2+})	meq/lit	۰/۱۴۸۸۰	۳/۲۳۷	۴/۰۸۸	+۰/۸۵۱
منیزیم (Mg^{2+})	meq/lit	۰/۰۲۳۵۰	۲/۹۸۴	۳/۲۸۳	+۰/۲۹۹
سدیم (Na^+)	meq/lit	۰/۰۰۰۸۶	۲/۱۷۴	۱۱/۲۰۴	+۹/۰۳۰
SAR	-	۰/۰۰۰۰۳	۴/۷۰۰	۶/۵۱۰	+۱/۸۱۰
نیتروژن کل (N)	mg/lit	-	۱/۱۷۹	۱/۵۱۹	+۰/۳۴۰

مقایسه کیفیت آب مخلوط با مقادیر هدف (جدول ۷) نشان می‌دهد که عمده انحراف در پارامترهای Mg^{2+} و EC رخ داده است. با این حال، نتایج تحلیل حساسیت (جدول ۶) تأیید کرده بود که این دو پارامتر کم‌ترین تأثیر (Mg^{2+} دارای تأثیر ۰/۰۵۱۷- و EC دارای تأثیر ۰/۰۵۴۹+) را بر توابع هدف دارند و در مقابل، پارامتر پراهمیت SAR در آب مخلوط (۱/۵۲) انحراف ناچیزی با مقدار هدف (۱/۱۸) داشته و در طبقه خطر شوری کم باقی مانده است (Ayers & Westcot, 1985). لذا، نسبت اختلاط ۲۳٪ از منظر عملیاتی دارای قابلیت اجرا در مزرعه بوده و در واقع، کشاورز می‌تواند با افزودن تقریباً یک‌چهارم پساب شهری به آب چاه در داخل استخر آبیاری مزرعه، ضمن تأمین بخش قابل توجهی از نیاز غذایی گیاه، از تجمع بیش از حد فلزات سنگین و ایجاد سمیت در محصول نیز جلوگیری نماید.

در تفسیر انحراف مشاهده شده در پارامترهای Na^+ و SAR نسبت به مقادیر هدف (جدول ۷)، باید به محدودیت فیزیکی یک نسبت اختلاط واحد توجه کرد. اگرچه Na^+ و SAR حساس‌ترین پارامترها هستند، اما کسر حجمی موردنیاز برای دستیابی به هدف EC (۰/۹۷۵) با کسر حجمی موردنیاز برای Mg و N (نزدیک به صفر) در تناقض کامل است. بنابراین نسبت ۲۳٪ یک راه‌حل مصالحه‌ای است که با وجود افزایش جزیی Na و SAR نسبت به مقادیر هدف، از افزایش تصاعدی آن‌ها در سناریوی پساب ۱۰۰ درصد جلوگیری کرده است (به‌طوری‌که Na از ۱۲/۲۰ به ۴/۰۸ و SAR از ۲/۵۴ به ۱/۵۲ کاهش یافته‌اند). از منظر استانداردهای FAO، مقدار SAR نهایی (۱/۵۲) هم‌چنان در رده عالی ($SAR < 3$) قرار دارد و بنابراین این انحراف، نه‌تنها قابل قبول، بلکه یک موفقیت در مدیریت تناقضات فیزیکی اختلاط محسوب می‌شود (Ayers & Westcot, 1985).

از منظر ایمنی خوراک دام، مقایسه غلظت فلزات سنگین در راه‌حل بهینه با استانداردهای جهانی حائز اهمیت است. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت و سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد، حد مجاز سرب در غلات خوراکی دام ۰/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم (معادل ۲۰۰ میکروگرم بر گرم) تعیین شده است (FAO/WHO, 2025; Kabugu, 2025). هم‌چنین بر اساس دستورالعمل اتحادیه اروپا، حداکثر حد قابل تحمل کادمیم در خوراک کامل دام ۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم (معادل ۱۰۰۰ میکروگرم بر گرم) می‌باشد (EU, 2002). با مقایسه این آستانه‌ها با مقادیر به‌دست آمده در راه‌حل بهینه (سرب ۱۴/۱۹ میکروگرم بر گرم و کادمیم ۰/۹۶ میکروگرم بر گرم)، مشاهده می‌شود که غلظت هر دو عنصر به‌طور قابل توجهی پایین‌تر از حدود مجاز جهانی قرار دارند. این امر نشان‌دهنده ایمنی محصول تولیدشده با نسبت اختلاط پیشنهادی برای مصرف در خوراک دام می‌باشد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف توسعه یک چارچوب تلفیقی رگرسیون - بهینه‌ساز برای مدیریت کیفی آبیاری ذرت علوفه‌ای با پساب شهری تصفیه شده به انجام و مجموعاً نتایج زیر حاصل گردید:

۱. مدل رگرسیونی اثرات متقابل کامل (Full Interactions) با میانگین ضریب تعیین تعدیل شده (R_{adj}^2) ۰/۹۹۶۸ برای پنج تابع هدف، به‌عنوان ساختار بهینه برای شبیه‌سازی روابط غیرخطی میان پارامترهای کیفیت آب و پاسخ‌های گیاهی شناسایی گردید. این مدل با لحاظ نمودن ۲۲ اثر متقابل دوگانه، توانست پیچیدگی‌های ناشی از برهم‌کنش یون‌ها را به‌خوبی تبیین نماید.
۲. جبهه پارتو (Parto Front) استخراج شده توسط الگوریتم NSGA-II به‌وضوح نشان داد که دستیابی هم‌زمان به حداکثر عملکرد

و حداقل غلظت فلزات سنگین در این سیستم امکان‌پذیر نبوده و هرگونه تصمیم‌گیری مدیریتی مستلزم پذیرش سطحی از رقابت تضادی (Trade-off) میان کمیت و کیفیت محصول است.

۳. بر اساس روش نقطه ایده‌آل و وزن‌های تعریف‌شده، نسبت اختلاط ۲۳ درصد پساب شهری با ۷۷ درصد آب چاه به‌عنوان راه‌حل بهینه متعادل (Balanced Solution) تعیین گردید. این راه‌حل سبب شد که به عملکرد ۲۴/۵۴ تن در هکتار (افزایش ۰/۳۳ درصدی نسبت به تیمار پساب ۱۰۰ درصد) در کشت ذرت علوفه‌ای برسیم و از سوی دیگر، غلظت سرب را ۷۰ درصد (از ۴۶/۸۵ به ۱۴/۱۹ میکروگرم بر گرم) و کادمیم را ۸۹ درصد (از ۸/۳۹ به ۰/۹۶ میکروگرم بر گرم) نسبت به تیمار پساب ۱۰۰ درصد کاهش دهیم. این نتیجه بیان‌گر آن است که الگوریتم بهینه‌سازی با یک رقابت تضادی (trade-off) موفق به بهره‌مندی از مزایای تغذیه‌ای پساب برای حفظ عملکرد گیاه ذرت علوفه‌ای و هم‌زمان کاهش چشمگیر مخاطرات تجمع غلظت فلزات سنگین شده است.

۴. تحلیل حساسیت ترکیبی نشان داد که غلظت سدیم (Na^+) با ضریب $-۰/۲۳۲$ - تأثیرگذارترین پارامتر در توازن عملکرد-سمیت است. نسبت جذب سدیم (SAR) با ضریب $+۰/۲۰۷$ در رتبه دوم قرار گرفت که بیان‌گر رفتار دوگانه سدیم (ایفای نقش عنصر سودمند در غلظت پایین و تشدید سمیت در غلظت بالا) در فیزیولوژی گیاه ذرت به‌عنوان یک گیاه C4 (چهار کربنه) می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که در آبیاری با پساب می‌بایست غلظت یون‌هایی نظیر سدیم مرتباً کنترل شوند.

چارچوب پیشنهادی این پژوهش می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای تصمیم‌گیری کشاورزان و کارشناسان ترویج در مناطقی که با کمبود آب شیرین از یک‌سو و دسترسی مناسب به پساب تصفیه‌شده از سوی دیگر مواجه هستند، مورد استفاده قرار گیرد. نسبت اختلاط تعیین‌شده، یک توصیه عملیاتی مشخص و قابل اجرا در مزرعه است که می‌تواند ضمن تضمین امنیت غذایی، مخاطرات زیست‌محیطی را به حداقل برساند. با این وجود، برای کاربردهای بلندمدت، تحقیقات آتی می‌بایست به مدل‌سازی تجمع فلزات سنگین در خاک بپردازند.

۵. لازم به ذکر است که تحلیل حساسیت صورت‌گرفته در پژوهش حاضر، از نوع موضعی بوده و صرفاً به بررسی رفتار توابع هدف در همسایگی ± 5 درصدی هر یک از پارامترهای کیفیت آب، پیرامون راه‌حل بهینه‌ی متعادل (به‌عنوان یک نقطه‌ی خاص از جبهه‌ی پارتو) محدود گردیده است. در مقابل، تأثیر تغییرات پارامترهای کنترلی الگوریتم NSGA-II (هم‌چون اندازه‌ی جمعیت، نرخ تقاطع، نرخ جهش و تعداد نسل‌ها) و هم‌چنین تغییر در مرزهای فضای جستجو بر روی ساختار، پراکندگی و تنوع کل جبهه‌پارتو، در محدوده این مطالعه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. بدین ترتیب، انجام یک تحلیل حساسیت سراسری که بتواند پایداری و حساسیت‌پذیری الگوریتم را در قبال تغییرات پارامترها و سناریوهای مختلف مدیریتی به‌طور جامع واکاوی نماید، به‌عنوان یکی از مسیرهای پژوهشی ارزشمند برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد. چنین تحلیلی می‌تواند کاربردپذیری عملی چارچوب ارائه‌شده را در شرایط متنوع مزرعه‌ای و اقلیمی ارتقا بخشد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری دانشکده مهندسی زراعی در قالب پژوهانه پایان نامه دانشجویی نویسنده اول و همچنین پژوهانه برای نویسندگان دوم و سوم (اعضای هیأت علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری) انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: دانشجو (نرجس شاکری): گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهادیه مقاله؛

نویسنده دوم: استاد راهنمای اول پایان‌نامه (دکتر محمد میرناصری)، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله، کدنویسی عددی در محیط نرم‌افزار MATLAB، بهینه‌سازی عددی و کمک به نویسنده اول (دانشجو)؛

نویسنده سوم: استاد راهنمای دوم پایان‌نامه (دکتر مجتبی خوش‌روش)، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، بررسی داده‌های اولیه و راهنمایی به نویسنده اول (دانشجو)؛



نویسنده چهارم: استاد مشاور پایان نامه (دکتر رضا حسن نیا دلیر)، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله، تحلیل داده‌ها؛

بیانیه دسترسی به داده‌ها

داده‌هایی پژوهش حاضر از طریق درخواست از نویسندگان (ایمیل به نویسنده مسئول) قابل دسترسی است.

سپاسگزاری

از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

خوش‌روش، مجتبی و پورغلام آمیجی، مسعود. (۱۴۰۲). تأثیر آبیاری با پساب مغناطیسی بر خصوصیات شیمیایی خاک، بهره‌وری آب و جذب فلزات سنگین ذرت. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۴(۶)، ۸۷۷-۸۹۳.

REFERENCES

- Acosta, J. A., Jansen, B., Kalbitz, K., Faz, A., & Martínez-Martínez, S. (2011). Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*, 85(8), 1318-1324.
- Alloway, B. J. (1990). Heavy metals in soils. Blackie and Son Ltd.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Chatham House. (2025). The water footprints of global food and agriculture trade: Water availability challenges.
- Coello Coello, C. A., Lamont, G. B., & Van Veldhuizen, D. A. (2007). Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems (2nd ed.). Springer.
- Daneshvar, M., Fattahi, F., Rahmani, H. R., Modarres Sanavy, S. A. M., & Sami, M. (2020). Effect of municipal wastewater irrigation and well water on plant and soil characteristics. *Notulae Scientia Biologicae*, 12(2), 409-419. <https://doi.org/10.15835/nsb12210767>
- Deb, K. (2001). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. John Wiley & Sons.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197. <https://doi.org/10.1109/4235.996017>
- Du, J., Liu, R., Cheng, D., Wang, X., Zhang, T., & Yu, F. (2024). Enhancing NSGA-II algorithm through hybrid strategy for optimizing maize water and fertilizer irrigation simulation. *Symmetry*, 16(8), 1062. <https://doi.org/10.3390/sym16081062>
- EU. (2002). Directive 2002/32/EC of the European Parliament and of the Council on undesirable substances in animal feed. Official Journal of the European Communities, L 140, 10-22.
- FAO. (2025). The World Faces Growing Thirst: Water Use Rises as Resources Shrink. AQUASTAT.
- FAO/WHO. (2025). Permissible limits for lead in cereals for animal feed. Joint FAO/WHO Food Standards Programme.
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1999). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127-157.
- Hayat, F., AL-Zayadneh, W., Khan, U., Asghar, S., Rehman, T., Kandhan, K., & Alyafei, M. (2026). Treated wastewater irrigation: unlocking sustainability in agriculture and food security—a comprehensive review. FAO AGRIS.
- Kabata-Pendias, A. (2011). Trace elements in soils and plants (4th ed.). CRC Press.
- Kabugu, S. (2025). Assessing the level of lead in maize bran used to make animal feeds in Kalisizo Sub County, Kyotera District [Master's dissertation, Makerere University].
- Khoshravesh, M. & Pourgholam-Amiji, M. (2023). The Effect of Irrigation with Magnetically Effluent on Soil

- Chemical Properties, Water Productivity and Heavy Metals Uptake by Maize. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(6), 877-893. (In Persian)
- Khoshravesh, M., & Pourgholam-Amiji, M. (2024). The effect of irrigation with magnetized wastewater on soil heavy metals, water productivity and heavy metals in aerial parts and grains of maize. *Applied Water Science*, 14, 182.
- Kinraide, T. B. (1998). Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. *Plant Physiology*, 118(2), 513-520.
- Lu, Y., Yao, H., Shan, D., Jiang, Y., Zhang, S., & Yang, J. (2015). Heavy metal residues in soil and accumulation in maize at long-term wastewater irrigation area in Tongliao, China. *Journal of Chemistry*, 2015, Article 628280.
- Maathuis, F. J., & Amtmann, A. (1999). K^+ nutrition and Na^+ toxicity: the basis of cellular K^+/Na^+ ratios. *Annals of Botany*, 84(2), 123-133.
- Mapanda, F., Mangwayana, E. N., Nyamangara, J., & Giller, K. E. (2005). The effect of long-term irrigation using wastewater on heavy metal contents of soils under vegetables in Harare, Zimbabwe. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(2-3), 151-165.
- Marschner, H. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- Mojiri, A., & Amirossadat, Z. (2011). Effects of urban wastewater on accumulation of heavy metals in soil and corn (*Zea mays* L.) with sprinkler irrigation method. *Asian Journal of Plant Sciences*, 10(3), 233-237.
- Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651-681.
- Ofori, S., Di Leto, Y., Smrčková, Š., Lopez Marin, M. A., Gallo, G., Růžicková, I., & Wanner, J. (2025). Treated wastewater reuse for crop irrigation: A comprehensive health risk assessment. *Environmental Science: Advances*, 4, 252-269.
- Reed, P. M., Hadka, D., Herman, J. D., Kasprzyk, J. R., & Kollat, J. B. (2013). Evolutionary multiobjective optimization in water resources: The past, present, and future. *Advances in Water Resources*, 51, 438-456. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.01.005>
- Rengel, Z. (1992). The role of calcium in salt toxicity. *Plant, Cell & Environment*, 15(6), 625-632.
- Salam, S. A., Qasim, M., El-Beltagi, H. S., Azizov, K., & Rebouh, N. Y. (2026). Cyclic use of wastewater and canal water improves maize growth while reducing heavy metal accumulation in soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 237, 1020.
- Saleh, M., Salehi, M., Khanaki, S., Ebrahimian, H., Liaghat, A., Mousavi, S. M., Pashapour, S., & Ashrafi, A. (2025). Effects of treated wastewater irrigation on soil properties, nutrient uptakes, and crop yields of agronomic crops under different crop rotations. *Agricultural Water Management*, 316, 109585.
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons.
- Tester, M., & Davenport, R. (2003). Na^+ tolerance and Na^+ transport in higher plants. *Annals of Botany*, 91(5), 503-527.
- Tiwari, K. K., Dwivedi, S., Mishra, S., Srivastava, S., Tripathi, R. D., Singh, N. K., & Chakraborty, S. (2008). Phytoremediation efficiency of *Portulaca tuberosa* roxb and *Portulaca oleracea* L. naturally growing in an industrial effluent irrigated area in Vadodra, Gujrat, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 147(1-3), 15-22.
- UN. (2025). UN sounds alarm over rising demands on water resources as scarcity increases. UN News
- Wakeel, A., Farooq, M., Qadir, M., & Schubert, S. (2011). Potassium substitution by sodium in plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 30(4), 401-41.