

- ۱۶۷..... اثر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه.....
حسن اوجاقلو - فرهاد اوجاقلو - محمد مهدی جعفری - فرهاد میثاقی - بیژن نظری - اسماعیل کرمی دهکردی
- تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بستگی آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی
(مطالعه موردی استان مرکزی - دشت فراهان)..... ۱۸۹
مصطفی گودرزی - جواد قدیک لو - عادل غدیری - محمدعلی خودشناس
- اثر آب شور مغناطیسی شده بر عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی (*Fragaria ananassa* cv. Silva)..... ۲۰۵
مجتبی خوش‌روش - مسعود پورغلام‌آمیجی - فائزه امامی قرا
- پایش زمانی رسوبات بادی و بعضی از عناصر سنگین در رسوبات معلق شهرستان طبس..... ۲۲۱
حجت امامی - مهسا معمارزاده
- تأثیر مصرف تلفیقی ورمی‌کمپوست و کود مرغی در شرایط مختلف کم‌آبیاری بر رشد و عملکرد گیاه خیار..... ۲۳۹
مجید بهدارنژاد - حلیمه پیری - معصومه دلبری
- بررسی کلنیزاسیون دوگانه *Rhizophagus irregularis* و *Serendipita indica* در جو در سطوح مختلف سفر
با به‌کارگیری آنتی‌بادی منوکلونال..... ۲۶۳
وحیده دین محمدی - ناصر علی‌اصغرزاد - لیلی عاقبتی ملکی
- ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات به (*Cydonia oblonga* Mill.) با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی
(CND) در استان اصفهان..... ۲۸۳
اکبر گندمکار - زهرا خان محمدی - مجید بهسیرت
- اثر زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماندگاری خاکپوش در خاک برای کنترل فرسایش بادی..... ۲۹۷
فاطمه نورعلی‌وند - احمد فرخیان فیروزی
- نقشه‌برداری رقومی تغییرات سطحی و زیرسطحی کربن آلی و شوری خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین
(مطالعه موردی: مناطق آبیک و نظرآباد)..... ۳۱۷
گردآفرین رضایی - فریدون سرمه‌بان - علی محمدی ترکاشوند - جواد سید محمدی - مریم مرعشی علی‌آبادی
- تأثیر کاربرد نیتروهیومیک اسید بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزه
(*Satureja hortensis* L.)..... ۳۳۵
منصور میرزایی وروی - شاهین اوستان - عادل ریحانی‌تبار - نصرت‌اله نجفی

Contents

- Effect of Irrigation Management on Water Productivity Indicators of Alfalfa 165
H. Ojaghlou, F. Ojaghlou, M.M. Jafari, F. Misaghi, B. Nazari, E. Karami Dehkordi
- Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain) 187
M. Goodarzi, J. Ghadbeiklou, A. Ghadiri, M.A. Khodshenas
- The Effect of Magnetized Saline Water on Yield and Yield Components of Strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Silva) 203
M. Khoshroavesh, M. Pourgholam-Amiji, F. Emami Ghara
- Spatial Monitoring of Wind Erosion and Some Heavy Metals in Suspended Load of Tabas City..... 219
H. Emami, M. Memarzadeh
- The Effect of Combined Use of Vermicompost and Poultry Manure on the Growth and Yield of Cucumber Plants in Different Conditions of Deficit Irrigation 237
M. Behdamejad, H. Piri, M. Delbari
- Study on Simultaneous Colonization of *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica* in Barley under Different P Levels Using Monoclonal Antibody 216
V. Dinmohammadi, N. Aliasgharzad, L. Aghebati-Maleki
- Evaluation of Nutritional Status of Quince Trees (*Cydonia oblonga* Mill.) by Compositional Nutrient Diagnosis Method (CND) in Isfahan Province 281
A. Gandomkar Deligani, Z. Khanmohammadi, M. Basirat
- The Effect of Time and Wetting-Drying Cycles on Durability of Mulches in Soil to Control Wind Erosion..... 295
F. Nooralivand, A. Farrokhian Firouzi
- Digital Mapping of Surface and Subsurface Soil Organic Carbon and Soil Salinity Variation in a Part of Qazvin Plain (Case Study: Abyek and Nazarabad Regions) 315
G. Rezaie, F. Sarmadian, A. Mohammadi Torkashvand, J. Seyedmohammadi, M. Marashi Aliabadi
- Effect of Nitrohumic Acid Application on Some Morphological and Physiological Characteristics of Savory Plant (*Satureja hortensis* L.) 333
M. Mirzaei Varoei, Sh. Oustan, A. Reyhanitabar, N. Najafi

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه 1368/4/11 و درجه علمی - پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 37 شماره 2 خرداد - تیر سال 1402

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال 1398، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص.پ. 91775-1163 - دبیرخانه نشریات علمی - نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

مقاله‌های این شماره در سایت <https://jsw.um.ac.ir> به صورت کامل نمایه شده است.

این نشریه به صورت دو ماهانه (شی شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 167 اثر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه
حسن اوجاقلو - فرهاد اوجاقلو - محمد مهدی جعفری - فرهاد میثاقی - بیژن نظری - اسماعیل کرمی دهکردی
- 189 تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بست آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی (مطالعه موردی استان مرکزی - دشت فراهان)
مصطفی گودرزی - جواد قدبیک لو - عادل غدیری - محمدعلی خودشناس
- 205 اثر آب شور مغناطیسی شده بر عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی (*Fragaria ananassa* cv. Silva)
مجتبی خوش‌روش - مسعود پورغلام آمیجی - فائزه امامی قرا
- 221 پایش زمانی رسوبات بادی و بعضی از عناصر سنگین در رسوبات معلق شهرستان طبس
حجت امامی - مهسا معمارزاده
- 239 تأثیر مصرف تلفیقی ورمی کمپوست و کود مرغی در شرایط مختلف کم‌آبیاری بر رشد و عملکرد گیاه خیار
مجید بهدارنژاد - حلیمه پیری - معصومه دلبری
- 263 بررسی کلنیزاسیون دوگانه *Rhizophagus irregularis* و *Serendipita indica* در جو در سطوح مختلف فسفر با به‌کارگیری
آنتی‌بادی منوکلونال
وحیده دین محمدی - ناصر علی‌اصغرزاد - لیلی عاقبتی ملکی
- 283 ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات به (*Cydonia oblonga* Mill.) با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) در استان
اصفهان
اکبر گندمکار - زهرا خان محمدی - مجید بصیرت
- 297 اثر زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماندگاری خاکپوش در خاک برای کنترل فرسایش بادی
فاطمه نورعلی‌وند - احمد فرخیان فیروزی
- 317 نقشه‌برداری رقومی تغییرات سطحی و زیرسطحی کربن آلی و شوری خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین (مطالعه موردی: مناطق
آبیک و نظر آباد)
گردآفرین رضایی - فریدون سرمیدان - علی محمدی ترکاشوند - جواد سید محمدی - مریم مرعشی علی‌آبادی
- 335 تأثیر کاربرد نیترو هیومیک اسید بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.)
منصور میرزایی وروی - شاهین اوستان - عادل ریحانی تبار - نصرت‌اله نجفی



Effect of Irrigation Management on Water Productivity Indicators of Alfalfa

H. Ojaghlo^{1*}, F. Ojaghlo², M.M. Jafari³, F. Misaghi⁴, B. Nazari⁵, E. Karami Dehkordi⁶

Received: 11-10-2022

Revised: 04-02-2023

Accepted: 04-03-2023

Available Online: 04-03-2023

How to cite this article:

Ojaghlo, H., Ojaghlo, F., Jafari, M.M., Misaghi, F., Nazari, B., & Karami Dehkordi, E. (2023). Effect of irrigation management on water productivity indicators of alfalfa. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 165-185. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211>

Introduction

Over the last years, long-term average rainfall has experienced a meaningful decrease (from 250 to 206 mm per year) leading to continuous drought in Iran. In addition, population growth and increasing demand for food put more pressure on the limited available water resources. Thus, the quantitative and qualitative improvement of agricultural products become a necessity. There is 640,000 hectares of alfalfa cultivated land, standing for 5.4% of the total cultivated area. One of the most basic obstacles in these farms is the unsuitable model of water consumption management. Previous studies were conducted with the aim of evaluating the mutual effects of different treatments in controlled plots. Nonetheless, there is a need for large-scale investigations to monitor and improve water productivity in agricultural systems. In this research, the focus was on irrigation management and optimizing irrigation timing as a potential solution to enhance water productivity, considering the fixed irrigation cycles and traditional use of available water resources. The study began by assessing the current water productivity in 11 alfalfa farms located across four regions in Zanjan province, ensuring a suitable spatial distribution. Subsequently, the impact of irrigation management, particularly the adjustment of irrigation timing, was evaluated to determine its effectiveness in improving water productivity in these farms.

Materials and Methods

Eleven alfalfa farms, covering a total area of 28 hectares, were initially selected in the agricultural lands of Zanjan province. The majority of these farms were equipped with sprinkler irrigation systems. From these 11 farms, two specific farms were chosen to implement the proposed methods aimed at improving water productivity. These selected farms served as experimental sites where the irrigation management techniques were applied and evaluated. Improvement solutions were mainly focused on irrigation management. Each farm was divided into two parts; one part with real conditions (farmers' management) and the second one with controlled conditions. In the controlled treatments, irrigation management was implemented through optimization of irrigation time. A nutritional program was also prepared according to the soil quality of the fields and applied in the controlled treatments. In each farm, basic information such as area, physical and chemical properties of soil and water quality were determined. Irrigation information (such as inflow discharge and irrigation schedule) was measured and determined at least three times during the cropping season. Soil moisture were measured before and after irrigation in order to calculate the water application efficiency. The amount of harvested product and production costs were obtained at the end of the cropping season through measurements and interviews with farmers. In this research, the indicators including the volume of irrigation water, the water use efficiency, and the physical and economic

1 and 4- Assistant Professors, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran

(*- Corresponding Author Email: ojaghlo@znu.ac.ir)

2 - National Planning Expert, Planning and Budget Organization of Zanjan Province, Iran

3- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

5- Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

6- Associate Professor, Department of Agricultural Extension and Education, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.79145.1211](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79145.1211)

efficiency of water have been calculated to analyze the water productivity.

Results and Discussion

The volume of irrigation water in alfalfa farms was measured as 14250 m³/ha on average (with the lowest and highest consumption values of 9849 and 20576 m³/ha, respectively). The average of irrigation water in farms with surface irrigation systems equals to 17,806 and in farms equipped with sprinkle irrigation systems is about 13,460 m³/ha. While the net water requirement of alfalfa in study area was 7160 to 7290 m³/ha. The minimum and maximum values of water application efficiency were 38.3 and 82%, respectively, with average of 64%. The average of application efficiency in surface and sprinkle irrigation systems were obtained 50 and 67%, respectively. The measured alfalfa yield ranged from a minimum of 6.5 ton/ha to a maximum of 14.1 ton/ha, with an average yield of 10.4 ton/ha. After implementing the revised irrigation program in the controlled plots, the harvested water decreased by an average of 49.5%. It was observed that the irrigation schedule in most farms followed a traditional and estimated pattern, with the depth of irrigation water in the middle of the growing season exceeding the net irrigation requirement. The water use efficiency (WUE) values varied between 0.42 and 1.28 kg/m³, with a minimum value of 0.42 kg/m³ and a maximum value of 1.28 kg/m³. The average WUE was calculated as 0.79 kg/m³. Analyzing the correlation between water consumption and the water use efficiency index revealed a decreasing trend. As the volume of irrigation water increased, the water use efficiency index experienced a decline. Specifically, an increase of 1000 m³ in irrigation water resulted in a decrease of 0.04 kg/m³ in the water use efficiency index. The implementation of the corrected irrigation program and appropriate to the water demand led to an increase of the mentioned index by 72%.

Conclusion

The lack of proper irrigation programs that consider climatic conditions and the actual needs of the alfalfa plant was identified as a key factor contributing to high water consumption in the farms. Additionally, the inefficient selection and design of the irrigation system led to lower irrigation efficiency than expected. Despite the majority of farms being equipped with sprinkle irrigation systems, the harvested water did not decrease significantly due to inadequate water management practices. These factors ultimately resulted in a decline in both physical and economic productivity indicators in the alfalfa farms. However, the results of the study highlighted that implementing corrected irrigation management, particularly through modifications to the irrigation timing, can lead to a significant decrease in volume of irrigation water and an improvement in both physical and economic productivity.

Keywords: Efficiency, Irrigation scheduling, Water use efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۱۸۵-۱۶۵

اثر مدیریت آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه

حسن اوجاقلو^{۱*} - فرهاد اوجاقلو^۲ - محمد مهدی جعفری^۳ - فرهاد میثاقی^۴ - بیژن نظری^۵ - اسماعیل کرمی دهکردی^۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

چکیده

تحقیق حاضر با هدف پایش بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه و بررسی اثر اصلاح برنامه آبیاری بر کاهش مصرف آب و ارتقای شاخص‌های بهره‌وری انجام شد. در مرحله اول تحقیق، تعداد ۱۱ مزرعه یونجه واقع در استان زنجان انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفت. عوامل مرتبط با بهره‌وری نظیر شدت جریان ورودی به مزارع، حجم آب مصرفی، برنامه آبیاری، مدیریت تغذیه، عملکرد محصول، هزینه‌های تولید و درآمد حاصل از فروش محصول تعیین و شاخص‌های فیزیکی و اقتصادی بهره‌وری مصرف آب محاسبه شد. در مرحله دوم، اصلاح مدیریت آبیاری به عنوان راهکار اجرایی به منظور بهبود بهره‌وری مصرف آب در شرایط واقعی مزرعه در قالب قطعات کنترل شده اجرا و با وضع موجود مقایسه شد. بر اساس نتایج حاصل از پایش‌های میدانی، میانگین حجم آب آبیاری در مزارع یونجه در حدود ۱۴۲۵۰ متر مکعب در هکتار و میانگین شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب CPD، BPD و NBPD به ترتیب برابر ۰/۷۹، کیلوگرم بر متر مکعب، ۱۶/۱ و ۸/۹ هزار ریال بر متر مکعب برآورد شد. به طور میانگین اعمال برنامه صحیح آبیاری در قطعات کنترل شده منجر به کاهش ۴۹/۵ درصدی حجم آب آبیاری و به تبع آن افزایش ۷۲ درصدی شاخص بهره‌وری فیزیکی شد. تثبیت الگوی اشتباه برنامه آبیاری و عدم کنترل و نظارت بر بهره‌برداری از منابع آب دلایل اصلی مصرف بی‌رویه آب در مزارع یونجه شناخته شد. نتایج مرحله دوم اجرای پژوهش نشان داد، تنها با اصلاح مدت زمان آبیاری می‌توان حجم آب آبیاری را بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش و بهره‌وری مصرف آب را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: برنامه آبیاری، راندمان، کارایی مصرف آب

مقدمه

تشدید این بحران شده است (Nazari et al., 2018). بطوری‌که براساس منابع موجود، هفت درصد جمعیت جهان در مناطقی که در آن آب کمیاب است، زندگی می‌کنند و طبق آمارها می‌توان انتظار داشت که این رقم تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۶۷ درصد افزایش یابد (Howell et al., 2001). بنابراین در حال حاضر مدیریت صحیح و برنامه‌ریزی

آب یکی از مهم‌ترین منابع مورد نیاز جامعه بشری و در عین حال یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن حاضر بشریت است (Hamdi Ahmadabadi et al., 2019). برای بسیاری از بخش‌های مختلف جهان بحران آب در حال حاضر وجود دارد و تغییرات آب و هوایی باعث

۱ و ۴- استادیاران، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
 (*- نویسنده مسئول: Email: ojaghlou@znu.ac.ir)

۲- کارشناس برنامه‌ریزی کشوری، سازمان برنامه و بودجه استان زنجان، ایران

۳- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۵- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین، قزوین، ایران

۶- دانشیار، گروه ترویج و آموزش کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

برای استفاده پایدار از منابع آب امری بسیار مهم و ضروری می‌باشد. کمبود آب یکی از عوامل مهم بازدارنده اقتصادی و اجتماعی در اکثر کشورهای در حال توسعه به خصوص کشورهای واقع شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است (Angus et al., 1991; Seckler et al., 1999). به همین دلیل در بسیاری از مناطق از جمله ایران، کشاورزی بدون آب و آبیاری، غیرممکن و غیراقتصادی می‌باشد. بطوری که آب به عنوان مهم‌ترین و محدود کننده‌ترین نهاده تولید کشاورزی در ایران به شمار می‌رود (Zibayi, 2007).

در سال‌های اخیر اکثر مناطق کشور با خشک‌سالی مواجه بوده است. علاوه بر خشک‌سالی‌های اخیر، رشد جمعیت و به دنبال آن افزایش تقاضا برای این جمعیت رو به رشد کشور و توجه به خودکفایی غذایی، باعث فشار مضاعف بر منابع محدود آب قابل دسترس شده است. در بیش‌تر مناطق ایران منابع آب سطحی محدود بوده و اصلی‌ترین منبع تامین آب، آب‌های زیرزمینی می‌باشد (Jafari et al., 2020). به همین دلیل اکثر دشت‌های کشور با افت سالانه تراز آب زیرزمینی مواجه هستند و در شرایط فعلی بیش از ۵۰ درصد دشت‌های کشور جزء دشت‌های ممنوعه و بحرانی مشخص شده‌اند که نباید هیچ گونه توسعه و برداشت آبی در آن‌ها انجام شود (Ghadami Firouzabadi and Seyedan, 2019). بدیهی است که تمامی فشارهای تامین غذای این جمعیت بر عهده بخش کشاورزی می‌باشد. با توجه به اینکه اکثر دشت‌های کشور دچار بحران آبی هستند، بجای افزایش سطح زیر کشت باید تولید در واحد سطح را افزایش داد. در واقع می‌توان بیان داشت که از مسائل اساسی در تولید مواد غذایی در کشورهای مختلف جهان و بخصوص کشورهای کم آب نظیر ایران، موضوع ارتقای بهره‌وری آب است (Zamani et al., 2015; Gholami et al., 2015). امروزه بهره‌وری مهم‌ترین و مؤثرترین روش دستیابی به رشد اقتصادی، با توجه به کمیابی منابع تولید است (Ehsani and Khaledi, 2003). در تعریف مفهوم بهره‌وری مصرف آب، بهره‌وری آب به مقدار محصولی گفته می‌شود که از هر واحد حجم آب مصرفی به دست می‌آید (Abbasi et al., 2017). هدف اصلی در بهبود بهره‌وری آب کشاورزی در جهان، مصرف کم‌تر آب توأم با افزایش بیش‌تر محصولات کشاورزی است تا از این طریق امکان کاهش سهم آب بخش کشاورزی و تخصیص بیش‌تر آب به سایر مصارف و از همه مهم‌تر نیاز آبی محیط زیست فراهم آید (Heydari, 2014). لذا پرداختن به موضوع اندازه‌گیری و تحلیل شاخص‌های بهره‌وری آب کشاورزی در ایران به علت محدودیت کمی و کیفی این نهاده ارزشمند، به یک ضرورت تبدیل شده است (Qi et al., Solat et al., 2021).

در کنار این مسائل باید توجهی خاص به میزان درآمد کشاورزان به ازای آب مصرفی محصولات داشت، به عبارتی تخصیص آب بایستی به محصولاتی صورت گیرد که دارای سود اقتصادی بیش‌تری به ازای

یک متر مکعب آب باشند. البته این مسئله به معنی چشم‌پوشی از سایر اهداف اساسی و بلند مدتی همچون تامین امنیت غذایی و اشتغال نیست (Gholami et al., 2015). درواقع می‌توان گفت که بدون توجه به این موضوع رسیدن به اهداف بزرگ‌تر (حفظ امنیت غذایی، تامین آب مورد نیاز سایر بخش‌های مصرف کننده) کاری بسیار پیچیده خواهد بود. به همین دلیل در اکثر پژوهش‌های انجام یافته در زمینه بهره‌وری، از یک یا هر دو معیار و شاخص بهره‌وری اقتصادی و بهره‌وری فیزیکی آب محصولات کشاورزی صحبت به عمل آمده است (Amini et al., 2020; Zamani et al., 2015; Bahrami et al., 2019). متأسفانه کشور ایران از نظر معیار بهره‌وری مصرف آب در بخش کشاورزی در شرایط مطلوبی نمی‌باشد. براساس برنامه‌ریزی‌های صورت گرفته در افق پیش‌رو بایستی میزان بهره‌وری آب کشاورزی در کشور تا سال ۱۴۰۴ به حداقل ۱/۶ کیلوگرم به ازای یک متر مکعب آب افزایش یابد (Abbasi et al., 2017; Keshavarz and Dehghanisanij, 2012). تحقق اهداف پیش‌بینی شده در برنامه‌های توسعه بالادستی نیازمند جمع‌آوری و تحلیل داده‌های میدانی دقیق و کافی جهت دستیابی به شناخت کامل و قطعی از وضع موجود و سپس ارائه راهکارهای علمی-عملی و با قابلیت اجرایی به منظور ارتقای بهره‌وری مصرف آب کشاورزی در سطوح مختلف می‌باشد. در این زمینه مطالعات گسترده‌ای در داخل و خارج کشور صورت گرفته است (Cetin and Bilgel, 2002; Liu et al., 2008; Sepahvand et al., 2009; Salvador et al., 2011; Ghadami Firouzabadi, 2012; Fan et al., 2014; Naroua et al., 2014; Foster et al., 2022; Ojaghlou et al., 2020; Karimi et al., 2022).

از طرفی، امروزه غذا به عنوان یکی از محورهای اصلی توسعه اقتصادی، نقشی بنیادین در تامین استقلال کشورها، سلامت جامعه، پرورش نسل‌های آینده و افزایش کارایی در آموختن علم و تکنولوژی نوین توسط نیروهای فعال هر کشور دارد (Modir Shanechi, 2006). لذا، توجه به بهبود خصوصیات کمی و کیفی محصولات کشاورزی به یک ضرورت تبدیل شده است (Mofidian et al., 2013). تولید گیاهان علوفه‌ای را می‌توان نخستین گام در این جهت شمرد (Modir Shanechi, 2006). از مهم‌ترین گیاهان علوفه‌ای که کشت و کار آن در تمام نقاط رواج دارد، گیاهان خانواده لگومینوز هستند (Moinizadeh et al., 2017). این گیاهان علاوه بر تامین علوفه دام، با تثبیت زیستی نیتروژن ضمن بهبود حاصلخیزی خاک، به صورت گیاهان پوششی نقش بدیعی را در جایگزینی کودهای مصنوعی ایفا می‌نمایند و در تناوب با بسیاری از گیاهان زراعی در جلوگیری از فرسایش خاک مؤثر بوده و این محصولات بطور منفرد و به صورت کشت درهم، ردیفی و مخلوط با سایر محصولات قابل کشت می‌باشند (Heidari Sharif Abad and Dari, 2001). همچنین این گیاهان به عنوان یک منبع غنی از پروتئین‌های حیوانی نیز محسوب می‌شوند

مصرف آب صورت پذیرد (Goudarzi et al., 2021). بالیک و همکاران (Balik et al., 2001) در پژوهش خود بهره‌وری آب یونجه را ۰/۸۹ تا حداکثر ۲ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نموده‌اند. در مطالعات انجام یافته دیگر، بهره‌وری آب علوفه خشک یونجه در مناطقی از کلرادو ۰/۷۶ توسط برادا (Berrada, 2005)، ۰/۷۹ در ایالت آیداهو آمریکا توسط آندرسندر و همکاران (Undersander et al., 2011) گزارش شده است. حیدری (Heydari, 2011) متوسط بهره‌وری مصرف آب یونجه را ۱/۴۶ کیلوگرم در هکتار و متوسط حجم آب مصرفی را ۷۶۲۵ متر مکعب در هکتار تعیین نمود. لشنی‌زند و همکاران (Lashanizand et al., 2015) شاخص بهره‌وری مصرف آب یونجه در حوضه آبخیز هنام الشتر را ۱/۸۵ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان کل آب مصرفی این محصول را ۹۸۲۹/۷۱ مترمکعب در هکتار اندازه‌گیری کردند. غلامی و همکاران (Gholami et al., 2015) میزان بهره‌وری آب برای یونجه در سامانه آبیاری بارانی را بین ۰/۲۲ تا ۱/۷۶ و در سامانه آبیاری سطحی بین ۰/۱۲ تا ۱/۶۴ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش نمودند. در پژوهشی مشاهده گردید که کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در اقلیم خشک عربستان با اعمال کم‌آبیاری به صورت کاهش مقدار آب مصرفی، موجب کاهش علوفه تر و خشک شده اما بهره‌وری آب را افزایش می‌دهد (Li et al., 2017). کریمی و جلینی (Karimi and Jolaini, 2017) بهره‌وری آب کشاورزی در محصولات مهم زراعی دشت مشهد را مورد بررسی قرار دادند و با توجه به شاخص‌های بهره‌وری آب تعیین شده برای محصول یونجه، کشت یونجه را با مصرف آب بالا و بازده اقتصادی پائین دانستند و بیان نمودند که بایستی از الگوی کشت منطقه حذف شود. چرا که این کار هم باعث کاهش مصرف و استحصال آب شده و هم متضمن منافع اقتصادی بالا برای کشاورزان و بهره‌برداران کشاورزی می‌باشد. قدمی فیروزآبادی و سیدان (Ghadami Firouzabadi and Seyedan, 2019) در طی پژوهشی بر روی واکنش ارقام مختلف یونجه در برابر تنش آبی، به این نتیجه رسیدند که برخی ارقام با بستن روزنه‌های خود تعرق را کاهش و از این طریق موجب افزایش بهره‌وری آب می‌شوند. فرح‌زا و همکاران (Farahza et al., 2020) به ارزیابی بهره‌وری آب فیزیکی و اقتصادی محصولات زراعی در دشت مغان پرداختند و در مطالعه خود بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محصول یونجه را به ترتیب برابر ۰/۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ۹۷ تومان بر متر مکعب تعیین و گزارش نمودند که بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی آب محصول یونجه از لحاظ هر دو نوع شاخص بهره‌وری در سطح نسبتاً ضعیفی قرار دارند. صفوی و همکاران (Safavi et al., 2022) اثر سطوح مختلف آبیاری قطره‌ای تیپ بر عملکرد و بهره‌وری آب ارقام یونجه گرمسیری را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که عملکرد علوفه تر و خشک با تنش آبی، کاهش و درصد علوفه خشک افزایش یافته است، همچنین بیش‌ترین عملکرد و بهره‌وری علوفه خشک به ترتیب ۱۲/۴ تن در هکتار و ۰/۹۴ کیلوگرم

(Mobtaker et al., 2011). یونجه به عنوان مهم‌ترین گیاه علوفه‌ای خانواده لگومینوز به شمار می‌رود. این گیاه با نام علمی *Medicago sativa* L. به علت غنی بودن از پروتئین، کلسیم، ویتامین، خوش خوراک بودن و درصد کم سلولز در ردیف بهترین گیاهان علوفه‌ای قرار می‌گیرد که به آن طلای سبز لقب داده‌اند (Moinizadeh et al., 2017). بنابراین یونجه دارای جایگاه ویژه‌ای در تغذیه دام و به ویژه در دامداری‌های مدرن و صنعتی می‌باشد (Behnamfar et al., 2014). کشور ایران دارای ۶۴۰ هزار هکتار اراضی زیر کشت یونجه است که معادل ۵/۴۱ درصد از کل سطح زیر کشت محصولات زراعی و ۶۲/۸ درصد از کل سطح زیر کشت نباتات علوفه‌ای می‌باشد. میزان تولید یونجه در کشور حدود ۵/۸ میلیون تن برآورد شده که معادل ۷/۸۸ درصد از کل میزان تولید محصولات زراعی و ۳۱/۷ درصد از کل میزان تولید نباتات علوفه‌ای می‌باشد (Ghaderpour et al., 2017). شرایط اقلیمی متنوع ایران امکان کشت یونجه را در بسیاری از نقاط کشور فراهم ساخته است. بویژه در استان زنجان یونجه یکی از محصولات شاخص تولیدی با سطح زیر کشت حدود ۳۶ هزار هکتار (معادل حدود ۵/۶۳ درصد کل سطح زیر کشت یونجه ایران) می‌باشد و حدود ۲۸۵ هزار تن یونجه (معادل ۴/۹ درصد از کل یونجه تولیدی کشور) از مزارع مذکور برداشت می‌شود و از این حیث استان زنجان در جایگاه ویژه‌ای قرار دارد. (Iran Ministry of Agriculture-Jahad, 2021). مطالعات مختلفی با هدف ارائه راهکار برای ارتقای عملکرد تولید و بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه توسط پژوهشگران داخلی و خارجی صورت گرفته است. پژوهش‌های پیشین عمدتاً در مزارع آزمایشی و در کرت‌های کنترل شده انجام شده است (Berrada, 2005; Carter et al., 2013; Li et al., 2017; Del Pozo et al., 2017; Darapuneni et al., 2020; Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2021).

یکی از اساسی‌ترین مشکلات مربوط به تولید محصولات علوفه‌ای به ویژه یونجه، مصرف بالای آب و کمبود منابع آب است. از طرفی مدیریت نامناسب آبیاری در سالیان گذشته، این مشکل را شدیدتر نموده است (Goudarzi et al., 2021). بنابراین یونجه نیز از این امر مستثنی نبوده و تولید بهینه آن در شرایط کم آبی امکان پذیر نیست. از ویژگی‌های بیولوژیکی قابل توجه این گیاه نسبت به آب می‌توان بازدهی بالای مصرف آب، ریشه‌های عمیق، ماهیت چند ساله و توانایی پایداری تولید در زمان خشک‌سالی‌های دوره‌ای را نام برد (Rogers et al., 2016). با این وجود افزایش تولید علوفه یونجه تابعی از تبخیر و تعرق گیاه بوده و با افزایش مصرف آب رابطه خطی دارد (Li and Su, 2017; Shewmaker et al., 2013). براساس گزارش‌های متعدد، بسته به شرایط آب و هوایی و میزان تولید، نیاز آبی یونجه در طول دوره رشد بین ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر در سال است. لذا، با توجه به نیاز آبی بالای این محصول باید حداکثر استفاده ممکن از قابلیت‌های گیاه برای کاهش

بر مترمکعب گزارش نمودند.

مطالعات گذشته بهره‌وری مصرف آب محصول یونجه بیش‌تر با بهره‌گیری از آزمایش‌های مزرعه‌ای در کرت‌های کنترل‌شده به بررسی اثر متقابل تیمارهای مختلف نظیر سامانه و سطح کفایت آبیاری، ارقام مختلف بذور، انواع متفاوت و مقدار مصرفی کودهای شیمیایی و بیولوژیکی و سایر عوامل مرتبط با تولید پرداخته شده است. لذا نیاز به پژوهش‌های میدانی که وضع موجود بهره‌وری و عوامل اثرگذار بر مصرف آب و تولید محصول یونجه را به صورت گسترده و در مقیاس بزرگ نظیر یک دشت یا استان در برگیرد، احساس می‌شود. همچنین ارائه و ارزیابی راهکارهای مدیریتی ساده و قابل اجرا توسط کشاورزان با هدف افزایش بهره‌وری مصرف آب در شرایط واقعی مزرعه تحت کشت، در این تحقیقات کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با توجه به غیر قابل تغییر بودن دور آبیاری و حجم آب ورودی به مزارع یونجه و نظام‌های بهره‌برداری سنتی از منابع آب در دسترس، راهکار پیشنهادی ارتقای بهره‌وری، مدیریت آبیاری توسط کشاورز صرفاً از طریق بهینه نمودن تعداد ساعات آبیاری متناسب با شدت جریان آب ورودی مزارع بود. در این راستا در سال اول تحقیق، وضع موجود بهره‌وری مصرف آب در ۱۱ مزرعه منتخب یونجه واقع در ۴ شهرستان (زنجان، ابهر، خرمدره و خداآینده) از استان زنجان با توزیع مکانی مناسب مورد مطالعه قرار گرفت. سپس در دومین سال اجرای پژوهش، اثربخشی راهکار اصلاح برنامه‌ریزی آبیاری در مزرعه و بطور مشخص اصلاح برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط واقعی مزرعه به منظور بهبود بهره‌وری مصرف آب کشاورزی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

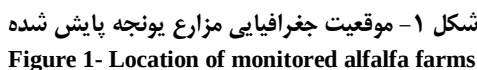
منطقه مورد مطالعه

استان زنجان در شمال باختر فلات ایران قرار گرفته است. وسعت استان برابر ۲۲۱۶۴ کیلومتر مربع و ۱/۴۳ درصد کل کشور را شامل می‌شود. استان زنجان دارای ۸ شهرستان، ۱۹ بخش و ۱۲۱۰ آبادی است که از این تعداد، ۹۷۸ آبادی دارای سکنه و بقیه خالی از سکنه می‌باشند. از نظر توپوگرافی استان زنجان منطقه‌ای است کوهستانی که بصورت فلات مرتفعی خودنمایی می‌نماید و در اثر تجزیه رودخانه جلگه‌های حاصلخیز مستقلى را تشکیل داده است. ناهمواری‌های شهرستان در این مقوله به کوه‌های زنجان شمالی و کوه‌های زنجان جنوبی تقسیم گردیده است، که از نظر تقسیمات جغرافیایی، رشته کوه‌های زنجان شمالی ادامه رشته کوه‌های البرز و کوه‌های زنجان جنوبی جزئی از رشته کوه‌های منفرد مرکزی است. جهت کوه‌ها بطور طبیعی از شمال غربی به جنوب شرقی ممتد بوده و دره زنجان‌رود برزخی را میان رودخانه قزل اوزن سفلی و علیا بوجود آورده است. میانگین

بارندگی سالانه در سطح استان ۳۲۳ میلی‌متر و میانگین دما ۹ تا ۱۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن در اقلیم نیمه‌خشک قرار گرفته است. مهم‌ترین حوضه آبخیز استان زنجان حوضه رودخانه قزل اوزن با مساحت حدود ۱۸۴۷۵ کیلومتر مربع می‌باشد که پس از سیراب نمودن باغات و مزارع در محل شهرستان منجیل در استان گیلان با رودخانه شاه‌رود قزوین تلاقی یافته و سپیدرود را شکل می‌دهند. قرار گرفتن استان زنجان در حوضه سفیدرود بزرگ ضرورت مدیریت بهینه مصارف آبی را به خصوص در بخش کشاورزی نمایان می‌سازد. شکل ۱ محدوده استان زنجان به همراه مزارع آزمایشی در نقاط مختلف محدوده مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

مشخصات مزارع آزمایشی

بر اساس آخرین آمار ارائه شده از سوی سازمان جهادکشاورزی استان زنجان حدود ۳۶ هزار هکتار از اراضی زراعی استان زنجان به کشت یونجه اختصاص دارد. به منظور انجام مطالعه حاضر، ابتدا در سال اول تحقیق تعداد ۱۱ مزرعه یونجه با مجموع مساحت ۲۷/۹۵ هکتار در اراضی کشاورزی استان زنجان انتخاب گردید (شکل ۱). با توجه به اینکه اکثر مزارع یونجه در منطقه مورد مطالعه مجهز به سیستم آبیاری بارانی شده‌اند، لذا تنوع سیستم‌های آبیاری در طرح تحقیقاتی حاضر نیز متناسب با شرایط واقعی بود. تعداد دو مزرعه با روش آبیاری سطحی و نه مزرعه دیگر نیز مجهز به سامانه آبیاری بارانی انتخاب شدند.



شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب

حجم آب آبیاری

$$V=3.6 \sum_{i=1}^n Q_i \times t_i \quad (1)$$

در رابطه (۱)، V حجم کل آب مصرف شده در طول فصل آبیاری (مترمکعب)، Q_i شدت جریان آب ورودی به مزرعه در آبیاری نوبت i ام

این مزارع در اراضی زراعی ۴ شهرستان (زنجان، ابهر، خرمدره و خدابنده) از استان زنجان با توزیع مکانی مناسب، واقع شده‌اند. در سال دوم اجرای پژوهش حاضر، به منظور ارزیابی میدانی راهکارهای بهبود بهره‌وری مصرف آب، تعداد دو مزرعه انتخاب و راهکارهای بهبود بهره‌وری مصرف آب اجرا شد. راهکارهای بهبود عمدتاً متمرکز بر مدیریت آبیاری بود. هر مزرعه به دو قسمت تقسیم شد. بخشی از مزرعه در شرایط واقعی (مدیریت کشاورز) و بخش دوم نیز در شرایط کنترل شده (اعمال راهکارهای بهبود) قرار گرفت. در قطعات کنترل شده برنامه آبیاری بهینه و با قابلیت اجرایی و قابل فهم برای کشاورز پیاده شد. اصلاح برنامه آبیاری از طریق اعمال ساعات آبیاری بهینه متناسب با شدت جریان ورودی مزارع انجام گرفت. با توجه به اینکه عواملی نظیر دور آبیاری و دبی ورودی در برخی مزارع با منابع آبی از نوع مشاعی، تحت کنترل کشاورز نمی‌باشد، به منظور ساده و قابل درک بودن راهکار اعمال شده برای کشاورز و همچنین ضمانت اجرایی بالا، مدیریت آبیاری صرفاً از طریق بهینه نمودن تعداد ساعات آبیاری انجام گرفت. همچنین برنامه تغذیه‌ای متناسب با خصوصیات کیفی خاک مزارع تهیه و در قطعات کنترل شده اعمال شد. مشخصات مزارع آزمایشی برای فازهای اول (۱۰۱ تا ۱۱۱) و دوم (۲۰۱ و ۲۰۲) در **جدول ۱** ارائه شده است. همچنین در **جدول ۲** نیز مشخصات مربوط به برنامه آبیاری اجرا شده در مزارع آزمایشی فاز دوم اجرای طرح را نشان می‌دهد.

(لیتر بر ثانیه) و t_i زمان آبیاری در نوبت t_m (ساعت) می‌باشد.

راندمان کاربرد آب (E_a)

راندمان کاربرد آب (E_a) عبارت است از نسبت آب ذخیره شده در ناحیه ریشه به کل مقدار آب وارد شده به مزرعه، که در این پژوهش حداقل در سه نوبت در فصل آبیاری در مزارع منتخب اندازه‌گیری شده است. در هر نوبت رطوبت خاک قبل از آبیاری، رطوبت حد ظرفیت زراعی و جرم مخصوص ظاهری خاک در ابتدای اندازه‌گیری‌های میدانی اندازه‌گیری شد. عمق توسعه ریشه نیز در هر نوبت اندازه‌گیری و ثبت گردید. مقدار عمق آب آبیاری نیز از نسبت حجم آب ورودی به مزرعه بر مساحت مزرعه محاسبه شده است. در نهایت راندمان کاربرد آب آبیاری از طریق رابطه زیر محاسبه شد.

$$E_a = \frac{\rho_b(\theta_{(FC)} - \theta_{(i)}) \times D_{rz}}{D_{app}} \quad (2)$$

در رابطه فوق، E_a راندمان کاربرد آب آبیاری (درصد)، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، $\theta_{(FC)}$ درصد رطوبت وزنی در نقطه ظرفیت زراعی، $\theta_{(i)}$ درصد رطوبت وزنی پیش از

آبیاری نوبت t_m ، D_{rz} عمق توسعه ریشه یونجه (میلی‌متر) و D_{app} عمق آب آبیاری (میلی‌متر) است.

شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD)

شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (CPD) نسبت مقدار محصول تولید شده به مقدار حجم آب مصرفی می‌باشد. آب مورد نیاز مزارع از دو طریق بارندگی و آبیاری تأمین می‌شود. لذا شاخص بهره‌وری فیزیکی آب با اعمال اثر بارندگی در فرآیند تأمین آب مورد نیاز گیاه، از رابطه ۳ تعیین می‌گردد:

$$CPD(Ir+P) = \frac{T_p}{Tw(Ir+P)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، $CPD(Ir+P)$ شاخص بهره‌وری فیزیکی آب (کیلوگرم بر متر مکعب)، T_p مقدار عملکرد تولیدی محصول (کیلوگرم در هکتار)، P حجم بارشی که در طول فصل آبیاری صرف تأمین آب مورد نیاز گیاه شده است (متر مکعب) و $Tw(Ir+P)$ حجم آب کاربردی (متر مکعب در هکتار) می‌باشد.

جدول ۱- ویژگی‌های عمومی مزارع آزمایشی

Table 1- General properties of the experimental farms

کد	نام روستا	موقعیت	مساحت (هکتار)	شدت جریان ورودی (لیتر بر ثانیه)	روش آبیاری
Code	Name of village	Location	Area (ha)	Inflow rate (Lit/S)	Irrigation method
101	اسفجین Sfajin	X: 253770 Y: 4072680	10.15	17.8	بارانی Sprinkler
102	رجعین Rajein	X: 214664 Y: 4115170	3.65	8.7	بارانی Sprinkler
103	دیزج آباد Dizajabad	X: 286123 Y: 4055990	1.16	6.3	بارانی Sprinkler
104	یامچی Yamchi	X: 253271 Y: 4073870	2.95	8.16	بارانی Sprinkler
105	کوه زین Kohzin	X: 325193 Y: 4026360	0.33	27	سطحی surface
106	زنجان Zanjan	X: 332878 Y: 4006670	0.45	38	سطحی surface
107	زنجان Zanjan	X: 339366 Y: 4009751	6.94	37.7	بارانی Sprinkler
108	نظرقلی Nazagholi	X: 291768 Y: 4004300	0.77	10.26	بارانی Sprinkler
109	نظرقلی Nazagholi	X: 290744 Y: 4005000	0.51	12	بارانی Sprinkler
110	گوندیره Gondareh	X: 288430 Y: 4005790	0.81	8.63	بارانی Sprinkler
111	آق بلاغ سفلی Aghbelagh Sofla	X: 265392 Y: 4006550	0.23	6	بارانی Sprinkler
201	سرچم Sarcham	X: 758757 Y: 4112931	3.6	9	بارانی Sprinkler
202	سلطانیه Soltaniyeh	X: 305491 Y: 4033185	2.7	26	بارانی Sprinkler

جدول ۲- مشخصات برنامه آبیاری اجرا شده در مزارع آزمایشی- فاز ۲

Table 2- Specifications of irrigation program implemented in the experimental farms- phase 2

کد	نوع مزرعه	بخش	زمان پس از اولین آبیاری	شدت جریان ورودی	فواصل آبیاری	نوبت آبیاری	زمان آبیاری	عمق آبیاری
Code	Farm type	Section	Time after first Irrigation (day)	Inflow discharge (Lit/S)	Irrigation intervals (day)	Irrigatio n events	Irrigation time (hr)	Irrigation depth (mm)
201	شرایط واقعی	1	30	9	---	1	100	90
		2	190-240	9	7	7	75	67.5
		3	240-365	9	7	18	100	90
		4	---	---	---	---	---	---
	شرایط کنترل شده	1	30	9	---	1	80	72
		2	190-240	9	7	7	30	27
		3	240-330	9	7	13	45	40.5
		4	330-365	9	7	5	30	27
202	شرایط واقعی	1	235-270	26	10	4	16	55.5
		2	270-300	26	7	2	20	69.3
		3	300-330	24	7	9	16	51.2
		4	330-365	24	7	2	12	38.4
	شرایط کنترل شده	1	235-270	26	10	4	12	41.6
		2	270-300	26	7	4	16	55.5
		3	300-330	24	7	4	16	51.2
		4	330-365	24	7	4	12	38.4

جدول ۳- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب و خاک مزارع یونجه

Table 3- Some physical and chemical characteristics of water and soils in alfalfa farms

آب						خاک			
Water						Soil			
کد	شوری	اسیدیته	سدیم	کلر	بافت	شوری	مواد آلی	پتاسیم	فسفر
Code	S	pH	Na	Cl	Texture	S	OM	K	P
101	1175	7.53	6.10	0.59	clay	1.59	3.63	242	17.2
102	2070	7.64	10.40	3.55	clay	1.71	3.05	190	13.3
103	508	7.87	1.20	2.05	sandy clay loam	3.22	2.18	192	9.8
104	759	7.65	4.10	0.40	sandy clay loam	1.40	2.67	283	14.4
105	364	7.66	0.39	2.65	clay loam	1.64	2.96	295	12.1
106	656	7.73	3.50	0.64	silty clay loam	1.49	3.11	278	14.6
107	482	7.15	1.39	2.05	silty clay	1.89	2.41	228	10.6
108	498	7.31	1.21	1.94	sandy loam	0.96	3.44	170	8.9
109	496	7.22	1.14	1.95	sandy clay loam	1.22	3.66	215	9.5
110	580	7.44	1.17	2.00	silty clay loam	1.51	2.53	191	13.7
111	464	7.75	0.41	2.85	silty clay loam	1.33	2.58	227	10.4
201	2870	7.64	10.40	13.40	silty clay	4.77	0.54	186	9.1
202	526	7.46	1.55	0.58	silty clay	2.32	1.36	311	14.3

شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی آب (BPD و NBPD)

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (BPD) شامل نسبت سود ناخالص به دست آمده به ازای هر واحد حجم آب به کار برده شده بر حسب میلیون ریال بر متر مکعب می‌باشد، که از طریق رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$BPD = \frac{TR}{Tw_c} \quad (4)$$

در رابطه فوق، TR مجموع درآمد کسب شده از محصول به ازای هر واحد آب مصرفی (میلیون ریال) و Tw_c حجم آب به کار برده شده (مترمکعب در هکتار) برای تولید محصول است.

شاخص بهره‌وری اقتصادی آب (NBPD) شامل نسبت سود خالص حاصل به ازای هر واحد حجم آب به کار برده شده بر حسب میلیون ریال بر متر مکعب می‌باشد، که از طریق رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

$$NBPD = \frac{NB}{Tw_c} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، NB سود خالص حاصل از فروش محصول (میلیون ریال) و Tw_c حجم آب به کار برده شده (مترمکعب در هکتار) برای تولید محصول می‌باشد.

هزینه‌های تولید محصول از قبیل هزینه‌های کاشت (آماده‌سازی زمین، تهیه بذر، کشت بذر، کود حیوانی و...)، هزینه‌های داشت (تهیه کود و سم، کارگری، آب‌بها، هزینه حامل‌های انرژی و...)، هزینه‌های برداشت (کارگری، ماشین آلات و حمل و نقل)، هزینه اجاره زمین و تعمیر و نگهداری سامانه آبیاری به صورت مستقل برای هر مزرعه تعیین شد. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر، قیمت فروش یونجه در سال‌های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ ملاک محاسبات شاخص‌های بهره‌وری اقتصادی قرار گرفته است.

نتایج و بحث

اجزای بهره‌وری

مقادیر پارامترهای مرتبط با بهره‌وری مصرف آب شامل حجم آب آبیاری، راندمان کاربرد، عملکرد محصول، هزینه‌های تولید، سود ناخالص و خالص به دست آمده برای ۱۱ مزرعه پایش شده در فاز اول (پایش وضع موجود بهره‌وری مصرف آب) در جدول ۴ ارائه گردیده است. مقدار حجم آب آبیاری از ۹۸۴۹ تا ۲۰۵۷۶ متر مکعب در هکتار متغیر می‌باشد. میانگین حجم آب آبیاری در هر هکتار حدود ۱۴۲۵۰ متر مکعب اندازه‌گیری شد. حداکثر مصرف آب حدود ۲/۱ برابر بیش از حداقل مصرف آب بوده که این موضوع نشان دهنده تفاوت‌های چشم گیر بین مدیریت آبیاری اعمال شده توسط زارعین در مزارع یونجه می‌باشد. مشخص است بخش زیادی از مقدار آب برداشت شده به وسیله گیاه مصرف شده و بخشی نیز عموماً از طریق تلفات نفوذ عمقی به چرخه هیدرولوژیکی حوضه باز می‌گردد. مقایسه حجم آب آبیاری بین

دو سامانه آبیاری پایش شده نیز نشان می‌دهد، میانگین آب آبیاری به ازای هر هکتار کشت یونجه در اراضی با روش‌های آبیاری سطحی برابر با ۱۷۸۰۶ متر مکعب و در اراضی مجهز به سامانه‌های آبیاری بارانی معادل ۱۳۴۶۰ متر مکعب در هکتار می‌باشد. این در حالی است که نیاز آبی خالص محصول یونجه در دشت زنجان و ابهر برابر ۷۱۶۰ متر مکعب در هکتار و در دشت خداپنده معادل ۷۲۹۰ متر مکعب در هکتار برآورد شده است. بر اساس نتایج حاصل شده، آبیاری بی‌رویه در مزارع یونجه وجود دارد بطوری که تغییر سامانه آبیاری از سنتی به نوین منجر به کاهش مصرف آب نشده است. میانگین راندمان کاربرد آب در مزارع یونجه پایش شده معادل ۶۴ درصد، بیش‌ترین راندمان برابر ۸۲ درصد و کم‌ترین راندمان برابر با ۳۸/۳ درصد برآورد شد. میانگین راندمان کاربرد در مزارع با روش آبیاری سطحی ۵۰ درصد و در مزارع با روش آبیاری بارانی ۶۷ درصد محاسبه شد. تجهیز مزارع به سامانه‌های آبیاری بارانی عمدتاً با انگیزه و هدف کاربرد شدت جریان‌های آب کم و همچنین کاهش هزینه‌های کارگری انجام می‌گیرد. متأسفانه به دلیل پیاده نمودن برنامه آبیاری غلط و سنتی، کاهش در حجم آب آبیاری مشاهده نمی‌گردد. مطابق جدول ۴، حداقل و حداکثر عملکرد محصول یونجه در مزارع پایش شده به ترتیب برابر ۶/۵ و ۱۴/۱ تن در هکتار و میانگین عملکرد تولیدی برابر ۱۰/۴ تن در هکتار به دست آمد. میانگین عملکرد در مزارع با روش آبیاری سطحی برابر ۱۰/۳۴ تن در هکتار و در مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی معادل ۱۰/۳۸ تن در هکتار حاصل شد. ملاحظه می‌گردد، میزان عملکرد یونجه در سیستم‌های مختلف آبیاری نزدیک به هم بوده و به میزان جزئی عملکرد یونجه در روش آبیاری بارانی نسبت به روش آبیاری سطحی بیش‌تر بود. بررسی رابطه میان حجم آب آبیاری و میزان عملکرد محصول نیز نشان می‌دهد، در محدوده حجم آب خالص مصرفی ۷۵۰۰ تا ۸۰۰۰ متر مکعب در هکتار میزان عملکرد تولید محصول (عملکرد بالای ۱۰ تن در هکتار) مناسب و قابل قبول بوده و با افزایش آن افزایش چشم‌گیری در میزان عملکرد تولید مشاهده نمی‌شود. حداقل و حداکثر سود خالص به دست آمده از مزارع به ترتیب برابر ۵۹ و ۱۸۱ میلیون ریال در هکتار و میانگین سود خالص حاصل از مزارع پایش شده برابر ۱۲۰/۸ میلیون ریال در هکتار برآورد گردید.

در جدول ۵ اجزای بهره‌وری محاسبه شده در فاز دوم طرح برای دو مزرعه آزمایشی آورده شده است. حجم آب مصرفی در دو مزرعه یونجه با وجود اینکه هر دو مزرعه مجهز به سیستم آبیاری بارانی بودند، در وضعیت کاملاً متفاوت نسبت به هم قرار دارد. به دلیل عدم اعمال برنامه صحیح آبیاری و بطور صحیح‌تر آبیاری بی‌رویه و غیراصولی و نامتناسب با نیاز واقعی در مزرعه ۲۰۱، عمق آب آبیاری بیش از حد نیاز یونجه بوده و منجر به بالا رفتن قابل ملاحظه حجم آب مصرفی شده است.

جدول ۴- آب آبیاری، عملکرد، هزینه‌ها، سود ناخالص و سود خالص در مزارع آزمایشی

Table 4- Irrigation water, production, costs, gross revenue and net income in experimental farms

کد	آب آبیاری	راندمان کاربرد	عملکرد	هزینه‌ها	سود ناخالص	سود خالص
Code	Irrigation water (m ³ /ha)	Application Efficiency (%)	Total product (ton/ha)	Costs (million Rials/ha)	Gross revenue (million Rials/ha)	Net income (million Rials /ha)
101	9849	78	8.1	88	178	90
102	18535	61	11.8	100	236	136
103	11731	77.5	7.2	99	158	59
104	15295	69	9.3	96	198	102
105	15035	62	9.8	103	215	112
106	20576	38.3	10.9	82	238	156
107	10326	82	13.3	95	265	170
108	10361	75	10.6	92	212	120
109	15247	50.4	6.5	96	161	65
110	18411	48.0	14.1	100	281	181
111	11382	65	12.6	114	252	138

راندمان کاربرد آب در قطعات آزمایشی مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ به ترتیب ۳۸ و ۹ درصد افزایش یافت. افزایش راندمان کاربرد در هر دو مزرعه عمدتاً از طریق کاهش تلفات نفوذ عمقی میسر شد. مقدار عملکرد محصول در دو مزرعه ۲۰۱ و ۲۰۲ به ترتیب برای شرایط واقعی مزرعه ۹/۸ و ۱۱/۵ و برای قطعات کنترل شده ۹/۲ و ۱۱/۹ تن در هکتار برآورد گردید. از لحاظ عملکرد محصول، اختلاف چشم‌گیری بین شرایط واقعی مزرعه و قطعات کنترل شده ملاحظه نمی‌شود. با این حال در مزرعه اول حدود ۶/۱ درصد افت محصول و در مزرعه دوم حدود ۳/۵ درصد افزایش محصول در قطعات کنترل شده نسبت به شرایط واقعی مزرعه ثبت گردید. با توجه به گستردگی عوامل دخیل در عملکرد محصول نظیر کیفیت خاک، تراکم کشت، آفات و بیماری‌ها، مدیریت تغذیه و... نمی‌توان وضعیت عملکرد تولیدی را صرفاً مرتبط با حجم آب مصرفی دانست. مقدار سود خالص به دست آمده برای شرایط واقعی مزرعه و قطعات کنترل شده در مزرعه اول، به ترتیب ۲۱۶/۵ و ۱۷۳ میلیون ریال در هکتار و در مزرعه دوم، ۲۴۹/۶ و ۲۶۳ میلیون ریال در هکتار محاسبه شد.

برنامه آبیاری اعمال شده در بیش‌تر مزارع به صورت سنتی و با نیاز واقعی مزرعه تناسب نداشت. به منظور تحلیل دقیق‌تر این موضوع، عمق آب آبیاری به صورت روزانه محاسبه و با مقدار نیاز آبی واقعی گیاه مورد مقایسه قرار گرفت. نیاز آبی واقعی گیاه نیز بر اساس اطلاعات اقلیمی سال انجام پژوهش و سایر اطلاعات مورد نیاز از قبیل مشخصات فیزیکی خاک و مشخصات گیاهی با استفاده از نرم‌افزار Cropwat تعیین شد. شکل ۲ نمودارهای مقایسه‌ای بین دو شاخص فوق را در ۱۱ مزرعه مورد بررسی در فاز اول پژوهش حاضر نشان می‌دهد.

بطوری که علاوه بر تلفات تبخیر و بادبردگی، تلفات بالای آب از نوع نفوذ عمقی در مزرعه مذکور مشاهده می‌گردد. در مقابل و در مزرعه ۲۰۲ وضعیت مصرف آب تقریباً نزدیک به مقدار نرمال و مورد انتظار بر اساس نیاز آبی واقعی مزرعه می‌باشد. در این مزرعه، برنامه آبیاری تقریباً اصولی و متناسب با تغییرات نیاز آبی در طول فصل کشت اعمال شده است. یکی از دلایل مهم بالا بودن مصرف آب در مزرعه اول، عدم وجود محدودیت آب قابل دسترس بود بطوری که کشاورز برنامه آبیاری دلخواه را بدون در نظر گرفتن نیاز آبی واقعی گیاه، پیاده می‌نمود. این در حالی است که شرایط مزرعه دوم کاملاً متفاوت بود و تناسب بین سطح کشت شده و حجم آب در دسترس وجود داشت. با توجه به اینکه تغییر عواملی نظیر دبی آب ورودی به مزرعه و دور آبیاری برای کشاورز دشوار بوده و از ضمانت اجرایی کم‌تری برخوردار می‌باشد، لذا اصلاح برنامه آبیاری از طریق تغییر تعداد ساعات کارکرد آبپاش در قطعه‌های آزمایشی انجام گرفت. در مزرعه ۲۰۱ مدت زمان آبیاری مزرعه به کم‌تر از نصف کاهش یافت. ساعات آبیاری در قطعات کنترل شده مزرعه ۲۰۲ نیز نسبت به قطعات دارای شرایط واقعی این مزرعه تنها در دوره ابتدایی فصل به میزان حدود ۲۵ درصد کاهش داده شد. بر این اساس ملاحظه می‌گردد، با اعمال برنامه آبیاری اصلاح شده در قطعات کنترل شده حجم آب مصرفی در قطعات آزمایشی مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ نسبت به واقعی (مدیریت کشاورز)، کاهش ۵۷ و ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد. مقدار راندمان کاربرد آب در وضع موجود مزرعه ۲۰۱ بسیار کم‌تر از حد پتانسیل و قابل انتظار از سیستم‌های آبیاری بارانی کلاسیک می‌باشد در حالی که در مورد مزرعه ۲۰۲ وضعیت بهتر بوده و مقدار راندمان کاربرد قطعه شاهد نزدیک به مقدار پتانسیل است (به ترتیب ۳۷ و ۷۶ درصد برای مزارع اول و دوم). با اجرای راهکارهای توصیه شده، مقدار

جدول ۵- آب آبیاری، عملکرد، هزینه‌ها، سود ناخالص و سود خالص در شرایط واقعی و کنترل شده

Table 5- Irrigation water, production, costs, gross revenue and net income under actual and controlled conditions

کد	آب مصرفی	راندمان کاربرد	عملکرد	هزینه‌ها	سود ناخالص	سود خالص
Code	Irrigation water (m ³ /ha)	Application Efficiency (%)	Total product (ton/ha)	Costs (million Rials/ha)	Gross revenue (million Rials/ha)	Net income (million Rials/ha)
201	شرایط واقعی					
	21696	37	9.8	274	490.5	216.5
	Actual conditions					
	شرایط کنترل شده					
202	9225	75	9.2	286	457.5	172.0
	Control conditions					
	شرایط واقعی					
	8981	76.0	11.5	324	573.6	249.6
	Actual conditions					
	شرایط کنترل شده					
	7467	85	11.9	331	594.0	263.0
	Control conditions					

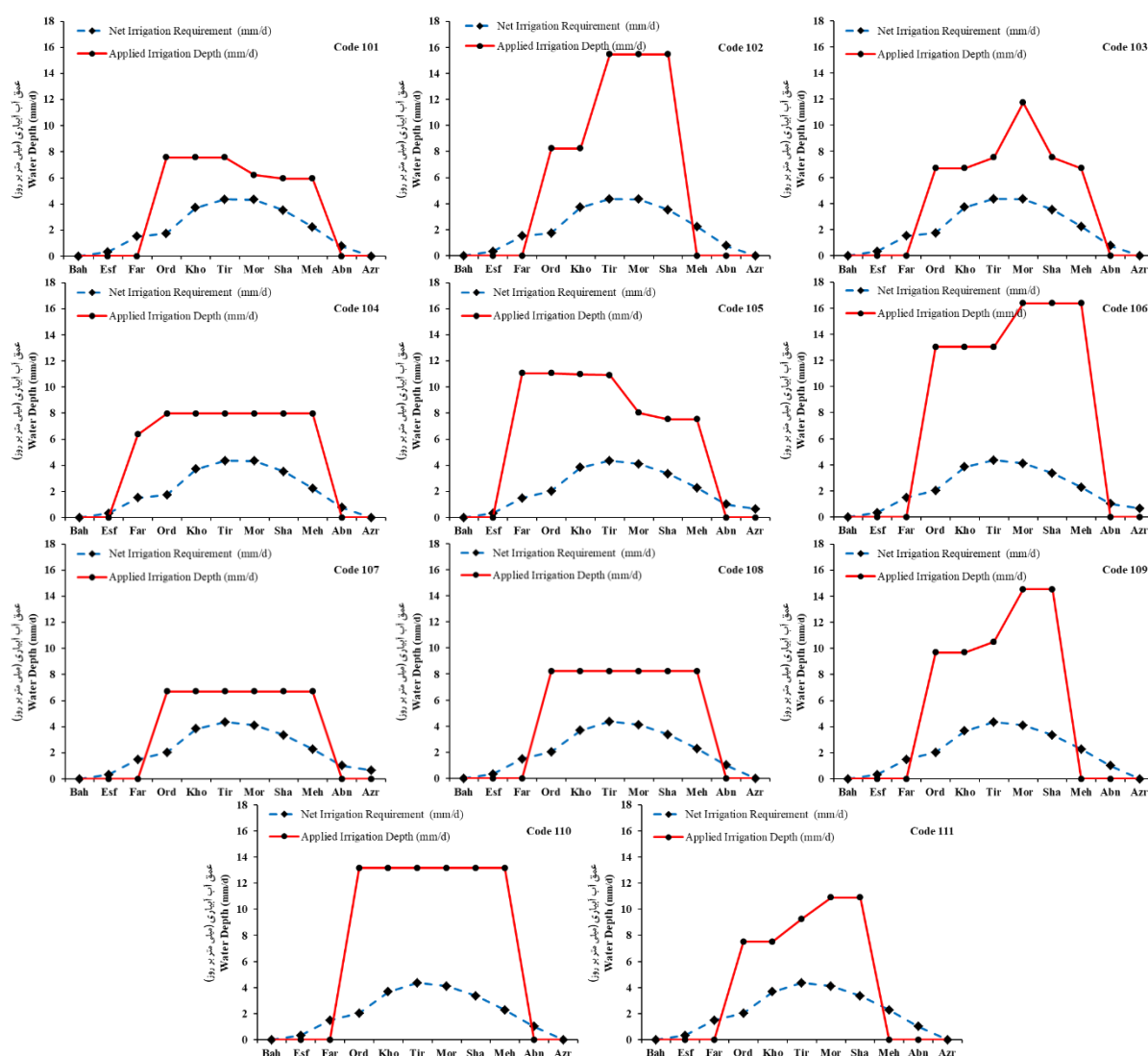
بهره‌وری فیزیکی مصرف آب

شکل ۴ مقادیر شاخص کارایی مصرف آب (CPD) برای ۱۱ مزرعه یونجه پایش شده در فاز اول مطالعات را نمایش می‌دهد. حداقل و حداکثر مقدار شاخص CPD برای مزارع مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۴۲ و ۱/۲۸ و بطور میانگین برابر با ۰/۷۹ کیلوگرم بر متر مکعب محاسبه گردید. شاخص کارایی مصرف آب تحت تاثیر اثر متقابل دو عامل حجم آب آبیاری و عملکرد محصول می‌باشد. مقدار مطلوب برای این شاخص زمانی قابل حصول خواهد بود که مدیریت مناسب و بهینه در مصرف آب و همچنین سایر مدیریت مناسب تغذیه اعمال گردد. بررسی همبستگی بین آب مصرفی و شاخص کارایی مصرف آب نشان می‌دهد، با بالا رفتن حجم آب آبیاری، مقدار شاخص کارایی مصرف آب تقریباً روند کاهشی دارد. بطوری‌که افزایش ۱۰۰۰ متر مکعبی حجم آب مصرفی بطور میانگین موجب کاهش ۰/۰۴ کیلوگرم بر متر مکعبی شاخص کارایی مصرف آب شده است. از سوی دیگر با افزایش مقدار عملکرد به میزان ۱ تن در هکتار، مقدار کارایی مصرف آب به میزان ۰/۰۷ کیلوگرم بر متر مکعب افزایش می‌یابد. همچنین بررسی کارایی مصرف آب به تفکیک نوع سیستم آبیاری نشان می‌دهد، میانگین کارایی مصرف آب در اراضی دو مزرعه تحت پوشش سیستم آبیاری سطحی ۰/۵۹ کیلوگرم بر متر مکعب و در مزارع مجهز به سیستم آبیاری

مطابق نمودارهای ارائه شده، عمق آبیاری در اواسط فصل رشد بیش‌تر از نیاز واقعی محصول یونجه بوده و در بیش‌تر مزارع اختلاف بین این دو شاخص چشم‌گیر می‌باشد. بطور کلی برنامه آبیاری در بیش‌تر مزارع نسبتاً ثابت و از انعطاف‌پذیری کم‌تری برخوردار می‌باشد. در اواخر دوره آبیاری با توجه به کاهش آبدی‌ها در بیش‌تر مزارع، کاهش عمق آب آبیاری اعمال شده مشاهده می‌شود. عمده این اختلاف در اواسط دوره رشد (اردیبهشت تا مهرماه) ملاحظه می‌شود؛ بطوری‌که بیش‌ترین اختلاف مربوط به مزرعه ۱۰۶ بوده که در مهر ماه به میزان ۱۴/۱ میلی‌متر در روز آبیاری مازاد صورت گرفته است. در برخی مزارع شاهد مدیریت مناسب آبیاری هستیم از جمله مزرعه با کد ۱۰۷ که مناسب‌ترین برنامه آبیاری را دارا می‌باشد. در **شکل ۳** نمودارهای مربوط به مقایسه برنامه آبیاری در شرایط واقعی و کنترل شده در دو مزرعه آزمایشی فاز دوم مطالعه، نمایش داده شده است. هدف از برنامه آبیاری اعمال شده در فاز دوم طرح، نزدیک نمودن عمق آب آبیاری به نیاز خالص آبی گیاه (البته با لحاظ نمودن مقدار راندمان کاربرد آب پتانسیل) بود. با مقایسه نتایج ارائه شده دستیابی به هدف مذکور به وضوح مشاهده می‌گردد. مدیریت بکار گرفته شده در مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ به ترتیب منجر به کاهش ۵۵ و ۱۱ درصدی عمق آب آبیاری در شرایط کنترل شده نسبت به واقعی شده است. اختلاف موجود بین دو منحنی در شرایط کنترل شده، مربوط به تلفات آبیاری می‌باشد.

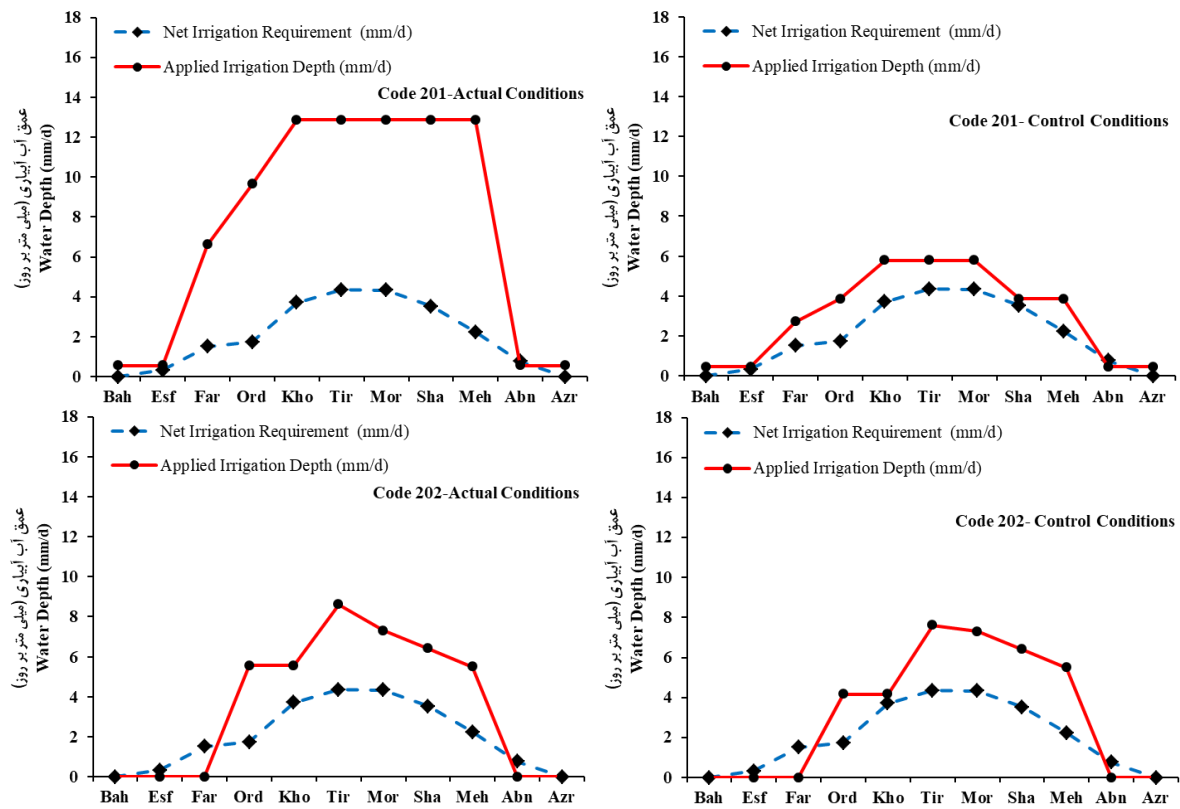
شکل ۵ مقادیر شاخص CPD محاسبه شده برای دو مزرعه آزمایشی در فاز دوم مطالعه را تحت شرایط واقعی و کنترل شده نشان می‌دهد. اعمال راهکارهای بهبود و بطور مشخص مدیریت آبیاری مناسب منجر به کاهش حجم آب آبیاری و در نهایت افزایش قابل توجه کارایی مصرف آب در قطعات کنترل شده گردیده است. مقدار شاخص مذکور در قطعات کنترل شده نسبت به شرایط واقعی در مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ به ترتیب ۱۱۹ و ۲۵ درصد افزایش داشته است. لازم به ذکر است کیفیت آب آبیاری در قطعات کنترل شده و واقعی یکسان بود. از سوی دیگر شاخص‌های کیفی خاک در هر دو قطعه اندازه‌گیری و تا حد امکان سعی گردید از این نظر نیز شرایط قطعات مذکور نزدیک به هم باشد.

بارانی برابر با ۰/۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. به عبارت دیگر کارایی مصرف آب در اراضی تحت پوشش سیستم آبیاری بارانی حدود ۲۴ درصد بیش‌تر از مزارع با روش آبیاری سطحی است. نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر هم‌راستا با نتایج مطالعات پیشین می‌باشد. به عنوان نمونه، حیدری (Heydari, 2011) مقدار متوسط شاخص کارایی مصرف آب یا همان بهره‌وری فیزیکی محصول خشک یونجه را در منطقه کرمان، با مصرف ۷۶۲۵ متر مکعب و عملکرد ۱۱/۱ تن در هکتار، ۱/۴۶ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش نموده است. همچنین نتایج مطالعه بهنام‌فر و همکاران (Behnamfar et al., 2014) نشان داد که میزان کارایی مصرف آب (علوفه خشک) یونجه مابین ۰/۵ تا ۰/۸ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.



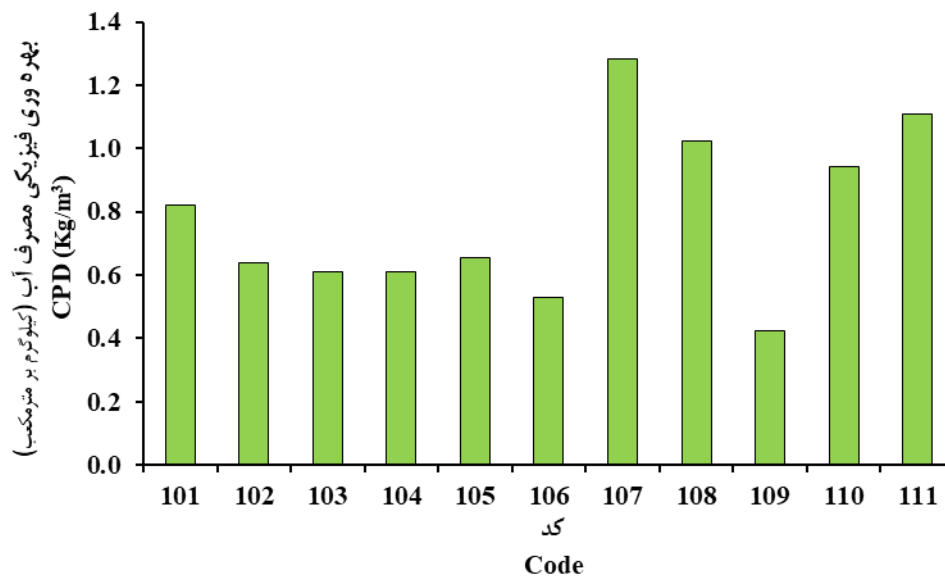
شکل ۲- مقایسه نیاز خالص آبیاری و عمق آب آبیاری در شرایط واقعی و کنترل شده - فاز ۱

Figure 2- Comparison of net irrigation requirement and applied water depth under actual and controlled conditions-phase 1



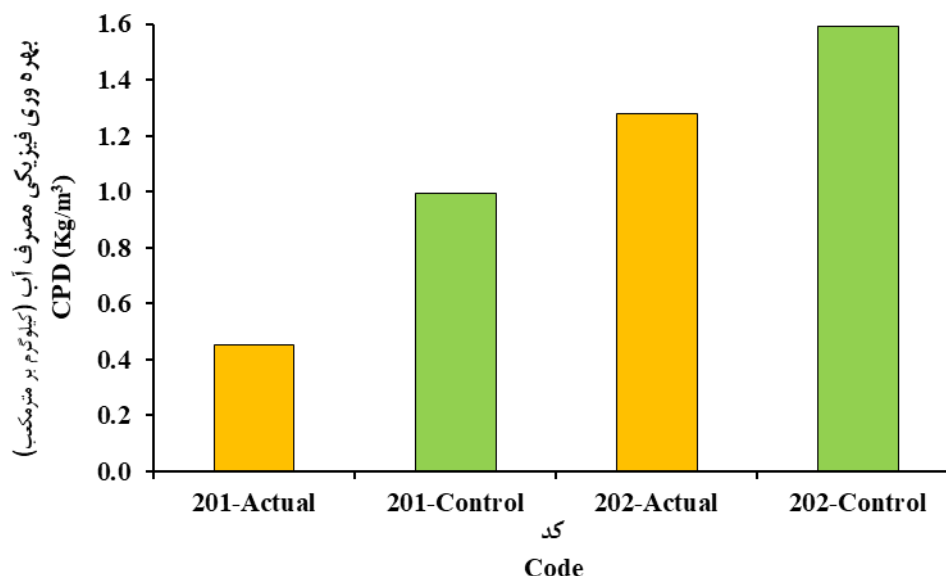
شکل ۳- مقایسه نیاز خالص آبیاری و عمق آب آبیاری در شرایط واقعی و کنترل شده - فاز ۲

Figure 3- Comparison of net irrigation requirement and applied water depth under actual and controlled conditions-phase 2



شکل ۴- مقادیر شاخص CPD در مزارع آزمایشی

Figure 4- The values of CPD indicator in experimental farms



شکل ۵- مقادیر شاخص CPD در شرایط واقعی و کنترل‌شده

Figure 5- The values of CPD indicator under actual and controlled conditions

افزایش ۶۰۰ ریالی سود خالص به ازای کاهش ۱۰۰۰ متر مکعب آب آبیاری می‌باشد. میانگین شاخص سود خالص در مزارع با حجم آب آبیاری کمتر از ۱۲ هزار متر مکعب در هکتار، حدود ۱۱ هزار ریال بر متر مکعب به دست آمد. در مزارع با حجم آب آبیاری بالاتر از ۱۵ هزار متر مکعب در هکتار، مقدار شاخص NBPD بطور متوسط حدود ۷ هزار ریال بر متر مکعب برآورد شد. مقادیر مربوط به شاخص NBPD محاسبه شده برای دو مزرعه آزمایشی در فاز دوم پژوهش در شکل ۹ قابل مشاهده است. کاهش محسوس حجم آب آبیاری در قطعات کنترل‌شده مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲، به ترتیب منجر به کاهش ۱۷ درصدی و افزایش ۵/۳ درصدی شاخص NBPD در این قطعات نسبت به شرایط واقعی مزرعه شده است.

آزمون معنی‌داری

به منظور مطالعه دقیق‌تر اثر نوع روش آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در ۱۱ مزرعه پایش‌شده فاز اول مطالعه و همچنین تحلیل آماری نتایج حاصل از قطعات کنترل‌شده و واقعی در فاز دوم طرح، آزمون معنی‌داری بین مقادیر شاخص‌های بهره‌وری محاسبه‌شده با استفاده از روش آزمون T مستقل انجام شد. **جدول ۶** و **۷** به ترتیب نتایج آزمون‌های معنی‌داری مربوط به نوع روش و مدیریت آبیاری را نشان می‌دهند. مطابق **جدول ۶** ملاحظه می‌شود، بین مقادیر شاخص‌های حجم آب مصرفی، CPD، BPD و NBPD در مزارع با روش آبیاری سطحی و بارانی، اختلاف معنی‌داری در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد وجود ندارد. مطابق **جدول ۷**، اختلاف بین مقادیر شاخص‌های CPD و BPD به دست آمده در دو شرایط کنترل‌شده و واقعی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. با این وجود اختلاف بین مقادیر شاخص

بهره‌وری اقتصادی مصرف آب

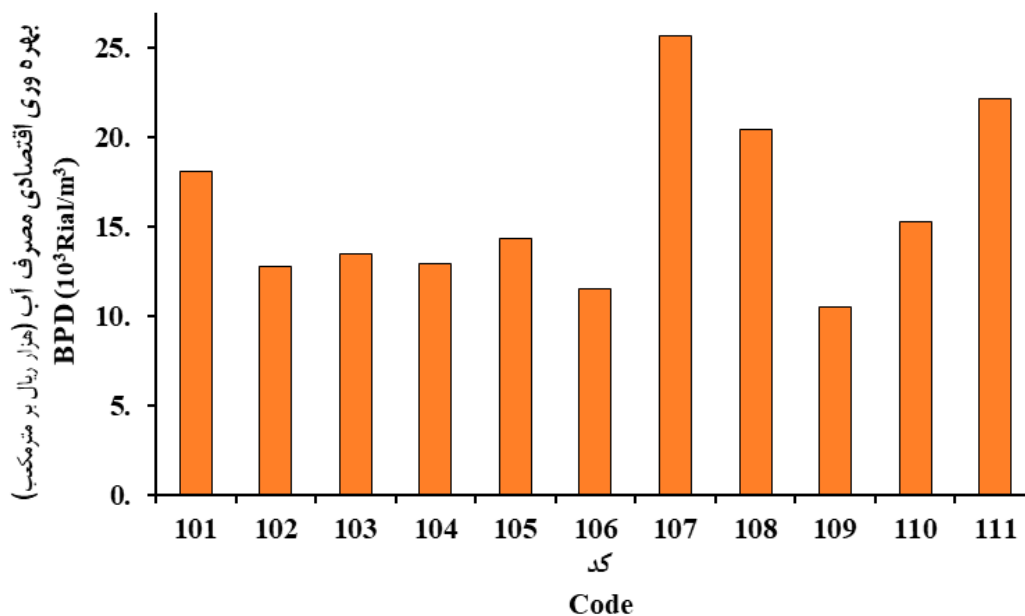
مقادیر شاخص سود ناخالص به ازای واحد حجم آب آبیاری (BPD) برای ۱۱ مزرعه پایش شده در **شکل ۶** ارائه شده است. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار BPD برای مزارع یونجه به ترتیب برابر با ۱۰/۵ و ۲۵/۷ هزار ریال بر مترمکعب می‌باشد. میانگین این شاخص نیز در مزارع مورد بررسی ۱۶/۱ هزار ریال بر متر مکعب محاسبه شد. میانگین BPD به دست آمده برای مزارع با روش آبیاری سطحی و بارانی به ترتیب برابر ۱۲/۹ و ۱۶/۸ هزار ریال بر متر مکعب به دست آمد. مجهز نمودن مزارع به سامانه آبیاری بارانی منجر به افزایش ۳۰/۲ درصدی سود ناخالص به ازای هر واحد حجم آب آبیاری شده است. در **شکل ۷** مقادیر شاخص BPD به دست آمده برای دو مزرعه مربوط به فاز دوم تحقیق، تحت شرایط واقعی مزرعه و کنترل‌شده نشان داده شده است. با کاهش حجم آب مصرفی در قطعات کنترل‌شده مزارع ۲۰۱ و ۲۰۲ مقدار شاخص BPD به ترتیب ۶/۸ درصد کاهش و ۳/۵ درصد افزایش یافت. **شکل ۸** مقادیر شاخص سود خالص به ازای هر واحد حجم آب مصرفی (NBPD) را برای ۱۱ مزرعه پایش شده نشان می‌دهد. کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار شاخص NBPD به ترتیب ۴/۳ و ۱۶/۴ هزار ریال بر مترمکعب تعیین شد. میانگین این شاخص نیز در مزارع پایش شده ۸/۹ هزار ریال بر مترمکعب تعیین شد. میانگین شاخص NBPD در مزارع با روش آبیاری سطحی برابر با ۷/۵ هزار ریال بر متر مکعب و در مزارع مجهز به سامانه آبیاری بارانی ۹/۲ هزار ریال بر متر مکعب برآورد شد. بررسی تغییرات شاخص NBPD نسبت به حجم آب آبیاری در مزارع پایش شده نشان می‌دهد، با افزایش میزان حجم آب آبیاری، مقدار شاخص سود خالص روند کاهشی نسبی داشته است. بررسی‌ها مؤید

NBPD حاصل از قطعات کنترل شده و واقعی در سطوح ۹۵ و ۹۹ درصد معنی دار نبود.

نتیجه گیری

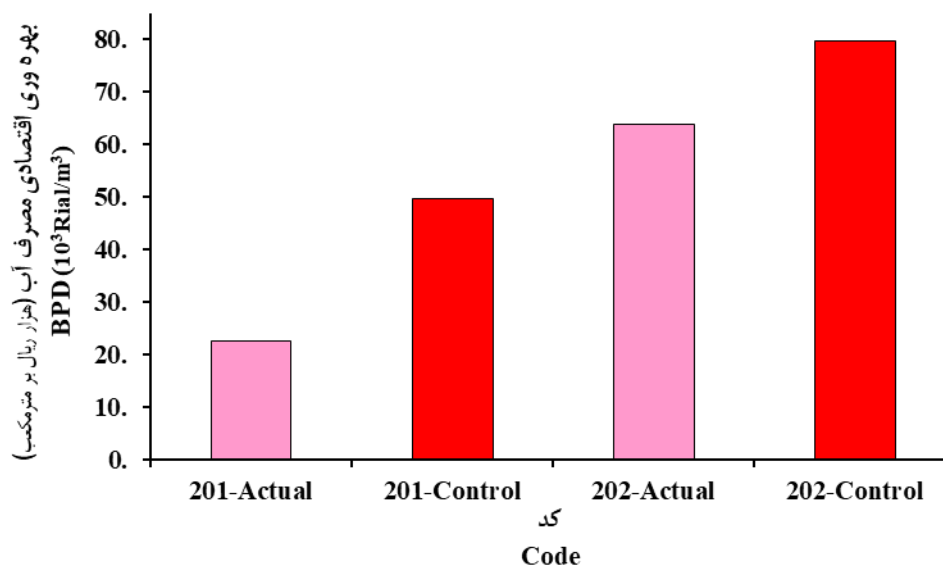
در سال های اخیر توسعه سامانه های نوین آبیاری به عنوان راهکار

مهم به منظور ارتقای بهره وری مصرف آب کشاورزی شناخته شده است. با این وجود به نظر می رسد نتایج مورد انتظار به دلایلی از جمله عدم دانش کافی کشاورزان و نبود نظارت علمی مستمر بر بهره برداری از این سامانه ها، محقق نشده است.



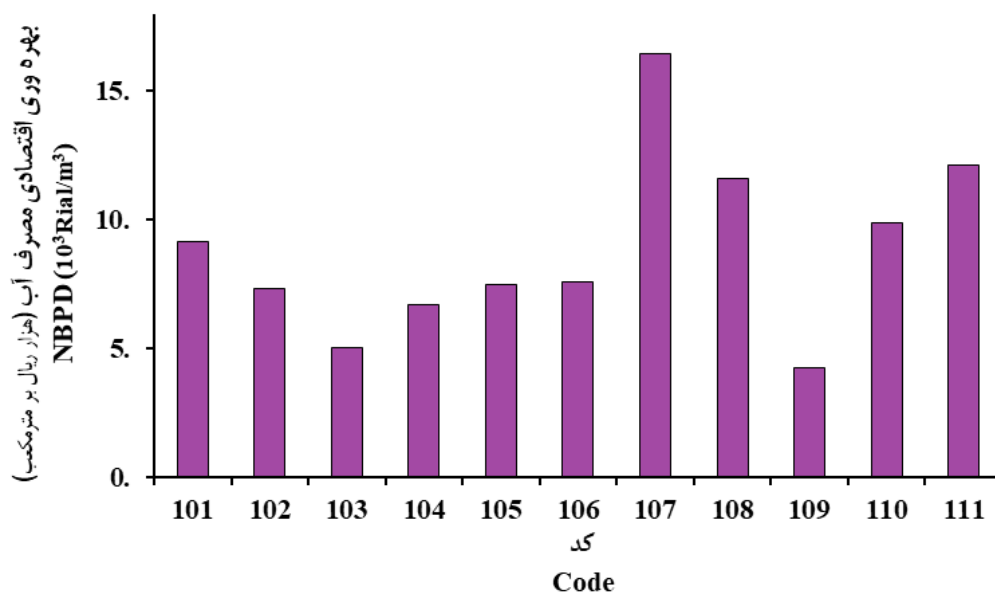
شکل ۶- مقادیر شاخص BPD در مزارع آزمایشی

Figure 6- The values of BPD indicator in experimental farms



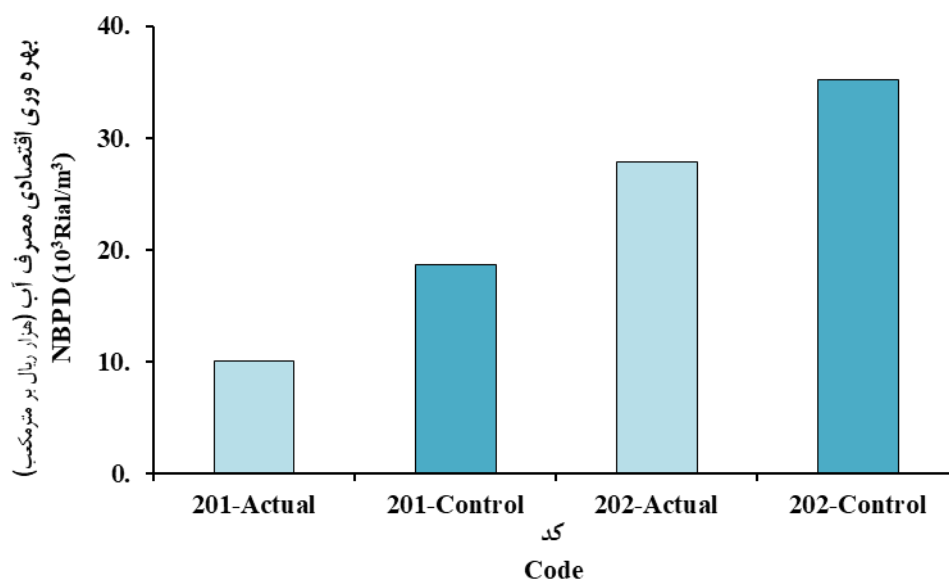
شکل ۷- مقادیر شاخص BPD در شرایط واقعی و کنترل شده

Figure 7- The values of BPD indicator under actual and controlled conditions



شکل ۸- مقادیر شاخص NBPDP در مزارع آزمایشی

Figure 8- The values of NBPDP indicator in experimental farms



شکل ۹- مقادیر شاخص NBPDP در شرایط واقعی و کنترل شده

Figure 9- The values of NBPDP indicator under actual and controlled conditions

حال با قابلیت اجرایی بالا بر ارتقای بهره‌وری مصرف آب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، حجم آب آبیاری در مزارع یونجه بیش‌تر از نیاز واقعی گیاه بوده و با وجود مجهز بودن بیش‌تر مزارع یونجه به سامانه آبیاری بارانی، حجم آب آبیاری قابل توجه می‌باشد.

در این تحقیق، مدیریت آبیاری و اثر آن بر شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در مزارع یونجه که عمدتاً مجهز به روش آبیاری بارانی بودند، مورد مطالعه قرار گرفت. در مرحله اول، برنامه آبیاری اعمال شده توسط کشاورزان و وضع موجود شاخص‌های بهره‌وری پایش شد. در مرحله دوم، اثر اصلاح برنامه آبیاری به عنوان تکنیک ساده و در عین

جدول ۶- آزمون معنی‌داری بین شاخص‌های بهره‌وری در روش‌های آبیاری سطحی و بارانی

Table 6- Significance test between productivity indicators under surface and sprinkler irrigation methods

شاخص Indicator	میانگین (Mean)		انحراف معیار (Standard deviation)		درجه آزادی Degrees of freedom	معنی‌داری Significance
	آبیاری سطحی Surface irrigation	آبیاری بارانی Sprinkler irrigation	آبیاری سطحی Surface irrigation	آبیاری بارانی Sprinkler irrigation		
آب مصرفی Water consumption ($10^3\text{m}^3/\text{ha}$)	17.81	13.46	3.92	3.48	9	0.149 ^{ns}
بهره وری فیزیکی مصرف آب CPD (Kg/m^3)	0.59	0.83	0.08	0.28	9	0.283 ^{ns}
سود ناخالص به ازای حجم آب مصرفی BPD ($10^3\text{Rial}/\text{m}^3$)	12.93	16.82	1.94	5.08	9	0.333 ^{ns}
سود خالص به ازای حجم آب مصرفی NBPD ($10^3\text{Rial}/\text{m}^3$)	7.51	9.16	0.08	3.85	9	0.573 ^{ns}

^{ns} No statistically significant difference, * Significance at 95% level, and ** Significance at the 99% level

جدول ۷- نتایج آزمون معنی‌داری بین شاخص‌های بهره‌وری در شرایط واقعی و کنترل‌شده

Table 7- Results of significance test between productivity indicators under actual and controlled conditions

شاخص Indicator	میانگین (Mean)		انحراف معیار (Standard deviation)		درجه آزادی Degrees of freedom	معنی‌داری Significance
	شرایط واقعی Actual conditions	شرایط کنترل شده Control conditions	شرایط واقعی Actual conditions	شرایط کنترل شده Control conditions		
آب مصرفی Water consumption (m^3/ha)	15.34	8.35	8.99	1.24	2	0.039*
بهره وری فیزیکی مصرف آب CPD (Kg/m^3)	0.86	1.29	0.59	0.42	2	0.0494*
بهره وری اقتصادی مصرف آب BPD ($10^3\text{Rial}/\text{m}^3$)	43.24	64.57	29.18	21.19	2	0.0491*
بهره وری NBPD ($10^3\text{Rial}/\text{m}^3$)	18.88	26.93	12.59	11.72	2	0.176 ^{ns}

^{ns} No statistically significant difference, * Significance at 95% level, and ** Significance at the 99% level

مرحله دوم پژوهش نشان داد، با مدیریت مناسب آبیاری از طریق اصلاح مدت زمان آبیاری می‌توان حجم آب آبیاری را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش و بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی را بهبود بخشید. با توجه به نتایج حاصل شده از یک سو و وضعیت موجود کم آبی در بیش‌تر دشت‌های کشور از سوی دیگر، نظارت علمی بر بهره‌برداری از سامانه‌ها آبیاری و همچنین ترویج گسترده و پیوسته شیوه‌های صحیح برنامه‌ریزی آبیاری به شدت احساس می‌شود.

نتایج آزمون معنی‌داری نیز نشان داد، اختلاف معنی‌داری بین مقادیر شاخص‌های بهره‌وری در دو روش آبیاری وجود ندارد. متأسفانه برنامه آبیاری در مزارع از انعطاف کم‌تری برخوردار بوده و متناسب با تغییرات نیاز آبی در طول فصل نمی‌باشد. به نظر می‌رسد الگوی اشتباه در مدیریت آبیاری مزارع یونجه در منطقه تثبیت شده است و بیش‌تر مزارع در وضعیت بیش آبیاری قرار دارند. مطابق نتایج به دست آمده، اختلاف قابل توجهی بین عملکرد محصول در مزارع وجود ندارد و شاخص‌های بهره‌وری بیش‌تر متاثر از حجم آب آبیاری می‌باشند. نتایج

منابع

- Abbasi, F., Abbasi, N., & Tavakoli, A. (2017). Water productivity in agriculture: challenges and perspectives. *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 141-144. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.67121>
- Amini, A., Porhemmat, J., & Sedri, H. (2020). Investigating the physical and economic efficiency of water in major

- crops in the Talvar Watershed, Kurdistan, Iran. *Watershed Engineering and Management*, 12(2), 481-491. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.123085.1534>
3. Angus, J.F., Herwaarden, A., Howe, G.N., & Van, H.A. (1991). Productivity and break crop effects of winter-growing oilseeds. *Animal Production Science*, 31(5), 669-677.
4. Bahrami, M., Khalilain, S., Mortazavi, S.S., & Asaadi, M.A. (2019). Evaluation of physical productivity of water agricultural in selected provinces in Iran (Case study: wheat crop). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 12(6), 1511-1518. (In Persian with English abstract)
5. Balik, M., Grismer, M.E., & Tod, L. (2001). Reduced run off irrigation of alfalfa in Imperial Valley, California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 127, 123-130. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2001\)127:3\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2001)127:3(123))
6. Behnamfar, K., Siadat, S.A., Bakhshandeh, A.M., Kashefipour, S.M., Alemi saied, Kh., & Jafari, A.A. (2014). Evaluation of Impact of Water Deficit on Yield and Water Use Efficiency of Four Cultivars Alfalfa (*Medicago sativa*) in Khuzestan Conditions – Ahvaz. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*, 37(3), 63-71. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.25885952.1393.37.3.7.9>
7. Berrada, A. (2005). Alfalfa response to water deficit using subsurface drip irrigation. *Technical bulletin (Colorado Agricultural Experiment Station); TB-05-1*, 1-21. <http://hdl.handle.net/10217/39158>
8. Carter, C.M., Garcia, A.G.Y., Islam, M.A., & Hansen, K. (2013). *Effect of deficit irrigation on water use and water use efficiency of alfalfa*. In: Proceeding of American Society of Agricultural and Biological Engineers, Kansas City, Missouri. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=44069>
9. Cetin, O., & Bilgel, L. (2002). Effects of different irrigation methods on shedding and yield of cotton. *Agricultural Water Management*, 54(1), 1-15. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00138-X)
10. Darapuneni, M.K., Lauriault, L.M., Vanleeuwen, D.M., & Angadi, S.V. (2020). Influence of irrigation regimes on alfalfa dry matter yield and water productivity in a semiarid subtropical environment. *Irrigation and Drainage*, 69(5), 1063-1071. <https://doi.org/10.1002/ird.2490>
11. Del Pozo, A., Ovalle, C., Espinoza, S., Barahona, V., Gerding, M., & Humphries, A. (2017). Water relations and use efficiency, plant survival and productivity of nine Alfalfa (*Medicago sativa* L.) cultivars in dryland Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 4, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.12.002>
12. Ehsani, M., & Khaledi, H. 2003. Agricultural water efficiency. *Irrigation and Drainage Committee*, 82, 1-109. (In Persian)
13. Fan, Y., Wang, C., & Nan, Z. (2014). Comparative evaluation of crop water use efficiency, economic analysis and net household profit simulation in arid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 146, 335-345. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.001>
14. Farahza, M.N., Nazari, B., Akbari, M.R., Naeini, M.S., & Liaghat, A. (2020). Assessing the physical and economic water productivity of annual crops in Moghan plain and analyzing the relationship between physical and economic water productivity. *Irrigation and Water Engineering*, 11(2), 166-179. (In Persian with English abstract). http://www.waterjournal.ir/article_120729.html#:~:text=10.22125/IWE.2020.120729
15. Foster, T., Brozović, N., Butler, A.P., Neale, C.M.U., Raes, D., Steduto, P., & Hsiao, T.C. (2017). AquaCrop-OS: An open source version of FAO's Crop water productivity model. *Agricultural Water Management*, 181, 18-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.015>
16. Ghadami Firouzabadi, A. (2012). Technical evaluation of low pressure irrigation pipe (Hydro flume) and comparison with traditional and sprinkler irrigation systems. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 4(3), 108-113.
17. Ghadami Firouzabadi, A., & Seyedan, S.M. (2019). Evaluation of irrigation water productivity and economic analysis of alfalfa production in sprinkler and surface irrigation systems. *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 10(37), 136-149. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/iwe.2019.95880>
18. Ghaderpour, O., Rafiee, S., & Sharifi, M. (2017). Analysis and modeling of energy and cost of alfalfa production using adaptive neural fuzzy inference system in Bukan city. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 48(1), 179-190. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijbse.2017.61573>
19. Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noory, H. (2015). Investigation of irrigation water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (Case study: Qazvin plain). *Journal of Irrigation Sciences and Engineerin*, 41(1), 17-30. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/jise.2018.13447>
20. Goudarzi, M., Akbari, M., & Hedayatipour, A. (2021). The efficiency of water consumption in the production of alfalfa fodder in the conditions of farmers in Central Province. *Fodder and Animal Feed Promotional Magazine*, 2(1), 87-95. (In Persian)
21. Hamdi Ahmadabadi, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., & Ghaderpour, R. (2019). Investigation of in the capita water consumption variation in Iran based on the past two-deca diet. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(1): 77-87. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.246084.667795>
22. Heidari Sharif Abad, H., & Dari, M.G. (2001). *Forage Plants (Nyamdaran)*. Publications and Research Institute of Forests and Rangelands.

23. Heydari, N. (2011). Determination and evaluation of water use efficiency of some major crops under farmers management in Iran. *Journal of Water and Irrigation Management*, 1(2), 43-57. (In Persian with English abstract)
24. Heydari, N. (2014). Water productivity in agriculture: challenges in concepts, terms and values. *Irrigation and Drainage*, 63(1), 22-28. <https://doi.org/10.1002/ird.1816>
25. Howell, T.A., Evitt, S.R., & Tolk, J.A. (2001). *Irrigation systems and management to meet future food/fiber needs and to enhance water use efficiency*. In Proceedings of the INIFAP-ARS Joint Meeting; A Frame Work for Cooperation. Rio Bravo. Tamaulipas, Mexico and Weslaco, Texas, USA: 10-14.
26. Jafari, M.M., Ojaghlo, H., & Zare, M. (2020). Groundwater level fluctuation simulation using support vector machines and adaptive neuro fuzzy inference system (Case study: Maragheh plain). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(14), 942-956. (In Persian with English abstract)
27. Karimi, B., Karimi, N., Shiri, J., & Sanikhani, H. (2022). Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 157-172. [https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y\(0123456789\(\),-vol\(V0\)123456789\(\),-volV\)](https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y(0123456789(),-vol(V0)123456789(),-volV))
28. Karimi, M., & Jolaini, M. (2017). Evaluation of agricultural water productivity indices in major field crops in Mashhad plain (technical note). *Journal of Water and Sustainable Development*, 4(1), 133-138. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v4i1.52783>
29. Keshavarz, A., & Dehghanisani, H. (2012). Water productivity index and solutions for future agricultural activities in Iran. *Economic Strategy*, 1(1), 199-233. (In Persian with English abstract)
30. Lashanzand, M., Payamani, K., & Vyskarami, E. (2015). Investigating actual schema in agricultural using water surface, case study: Honam watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(4), 400-406. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2015.100822>
31. Li, M., Liu, Y., Yan, H., & Sui, R. (2017). Effects of irrigation amount on alfalfa yield and quality with a center-pivot system. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 60(5), 1633-1644. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=48474>
32. Li, Y., & Su, D. (2017). Alfalfa water use and yield under different sprinkler irrigation regimes in North arid regions of China. *Sustainability* 9(8): 1380. <https://doi.org/10.3390/su9081380>
33. Liu, J., Zehnder, A.J.B., & Yang, H. (2008). Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale. *Global Nest Journal*, 10(3), 295-300.
34. Mobtaker, H.G., Akram, A., Keyhani, A., & Mohammadi, A. (2011). Energy consumption in alfalfa production: A comparison between two irrigation systems in Iran. *African Journal of Plant Science*, 5(1), 47-51.
35. Modir Shanechi, M. (2006). *Production and Management of Forage Plants*. Published Astan Quds Razavi 1-448. (In Persian)
36. Mofidian, S.M.A., Agha Shahi, A.R., & Moghadam, A. (2013). Quantitative and qualitative forage yield of cold-region alfalfa ecotypes of Iran. *Seed and Plant Journal*, 1-29(4), 745-729.
37. Moinizadeh, M., Piri, I., Tavasoli, A., & Shojaei, S. (2017). Study of quantitative and qualitative forage yield of alfalfa cultivars (*Medicago sativa* L.) in different harvest in Khash region. *Journal of Applied Research of Plant Ecophysiology*, 3(2), 127-140. (In Persian). <http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-223-fa.html>
38. Naroua, I., Rodríguez, L., & Calvo, R.S. (2014). Water use efficiency and water productivity in the Spanish irrigation district "Río Adaja". *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 2(12), 484-491. <https://doi.org/10.15739/IJAPR.021>
39. Nazari, B., Liaghat, A., Akbari, M.R., & Keshavarz, M. (2018). Irrigation water management in Iran: Implications for water use efficiency improvement. *Agricultural Water Management*, 208, 7-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.003>
40. Ojaghlo, H., Sohrabi, T., Abbasi, F., & Javani, H. (2020). Development and evaluation of a water flow and solute transport model for furrow fertigation with surge flow. *Irrigation and Drainage*, 69, 682-695. <https://doi.org/10.1002/ird.2478>
41. Qi, W., Zhang, Z., Wang, C., & Huang, M. (2021). Prediction of infiltration behaviors and evaluation of irrigation efficiency in clay loam soil under Moistube® irrigation. *Agricultural Water Management*, 248, 106756. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106756>
42. Rogers, M.E., Lawson, A.R., & Kelly, K.B. (2016). Lucerne yield, water productivity and persistence under variable and restricted irrigation strategies. *Crop and Pasture Science*, 67(5), 563-573. <https://www.publish.csiro.au/cp/cp15159#:~:text=https%3A%2F%2Fdoi.org%2F10.1071%2FCP15159>
43. Safavi, M., Asareh, A., Khorramian, M., Khodadadi dehkordi, D., & Egdernezhad, A. (2022). Effect of different levels of tape irrigation on yield and water productivity of tropical Alfalfa cultivars. *Journal of Water and Soil Science - Isfahan University of Technology*, 26(1), 211-222. (In Persian). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4081-fa.html>
44. Salvador, R., Martínez-Cob, A., Caverio, J., & Playán, E. (2011). Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro Basin (Spain): Crops and irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 98(4), 577-587. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.10.003>

45. Seckler, D., Baker, R., & Amarasinghe, U.A. (1999). Water scarcity in the twenty-first century. *International Journal of Water Resources Development*, 15(1-2), 29-42.
46. Sepahvand, M. (2009). Comparing water need, water productivity and its economic productivity for wheat and canola in western Iran for rainy years. *Iranian Journal of Water Research*, 3(4), 63-68. (In Persian with English abstract)
47. Shewmaker, G.E., Allenand, R.G., & Neibling, W.H. (2013). *Alfalfa Irrigation and Drought*. University of Idaho College of Agriculture and Life Science: Moscow, ID, USA.
48. Solat, S., Alinazari, F., Maroufpoor, E., Shiri, J., & Karimi, B. (2021). Modeling moisture bulb distribution on sloping lands: Numerical and regression-based approaches. *Journal of Hydrology*, 601, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126835>
49. Undersander, D., Cosgrove, D., Cullen, E., Rice, M.E., Renz, M., Sheaffer, C., Shewmaker, G., & Sulc, M. (2011). *Alfalfa Management Guide*. Wisconsin American Society of Agronomy. <https://www.agronomy.org/files/publications/alfalfa-management-guide.pdf>
50. Zamani, O., Mortazavi, S.A., & Balali, H. (2015). Economical water productivity of agricultural products in Bahar Plain, Hamadan. *Journal of Water Research in Agriculture*, 28(1), 51-62. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2015.101065>
51. Zhang, J., Qian Wang, Q., Pan Pang, X., Peng Xu, H., Juan Wang, J., Na Zhang, W., & Gang Guo, Z. (2021). Effect of partial root-zone drying irrigation (PRDI) on the biomass, water productivity and carbon, nitrogen and phosphorus allocations in different organs of alfalfa. *Agricultural Water Management*, 243(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106525>
52. Zhang, Q., Liu, J., Liu, X., Li, S., Sun, Y., Lu, W., & Ma, C. (2020). Optimizing water and phosphorus management to improve hay yield and water- and phosphorus-use efficiency in alfalfa under drip irrigation. *Food Science and Nutrition*, 8(5), 2406-2418. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1530>
53. Zibayi, M. (2007). Factors affecting continuity in using sprinkler irrigation systems in Fars Province, comparison of logistic regression and discriminant analysis. *Iranian Journal of Agricultural Economics*, 1(2), 183-194. (In Persian)



Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain)

M. Goodarzi^{1*}, J. Ghadbeiklou², A. Ghadiri³, M.A. Khodshenas⁴

Received: 06-12-2022

Revised: 10-01-2023

Accepted: 17-01-2023

Available Online: 17-01-2023

How to cite this article:

Goodarzi, M., Ghadbeiklou, J., Ghadiri, A., & Khodshenas, M.A. (2023). Determining the optimal cropping pattern based on the multiple objectives of water, energy, food and economic profit indices (Case study: Markazi province- Farahan plain). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 187-202. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233>

Introduction

Water is one of the most important factors of development in human societies, water scarcity, specially fresh water which is one of the main limitation for agricultural, economic and social development in most developing countries. Providing and implementing an optimal cropping pattern, in addition to better management of water and soil resources, can lead to reducing production risk, increasing the ability to deal with crises, improving employment, better management of providing services to farmers, and providing the possibility of expanding agro-based industries. In many regions of the world, including in Iran, many studies have been done to improve the cropping pattern in different regions. Despite the existing problems in designing and implementing the appropriate cropping pattern in the plains, modifying the cropping pattern based on scientific principles and emphasizing the reduction of water consumption while reducing water consumption provides the possibility of sustainable agriculture and in terms of economic and social aspects. Implementing an optimized cropping pattern in the Farahan Plain is an undeniable necessity to preserve national resources. This study was conducted with the objective of optimizing the cropping pattern in the area, taking into account multiple criteria.

Methodology

In this research, considering the importance of determining the cropping pattern based on the multiple objectives of the decision makers, it was tried to determine the optimal cropping pattern by using mathematical programming and fuzzy logic by establishing a compromise between the objectives of the cropping pattern. The model considered for this study was in the framework of the goal of the maximum ideal distance (Fuzzy Composite Distance). Also, in order to use water resources sustainably, scenarios of cropping patterns are presented based on different conditions of water resources uses. Based on the basin's water resource stability, an optimal cropping pattern was developed to address the conditions of normal water resource exploitation, as well as sustainable and unsustainable scenarios. Each scenario corresponds to a specific period. To achieve this, a multi-objective planning approach was utilized, integrating water, food, energy, and economic profit indicators. The resulting optimal cropping pattern considers stable water resource utilization during normal, drought, and wet periods, ensuring sustainable conditions.

1- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.godarzi@areeo.ac.ir)

2 and 4- Scientific Member, Soil and Water Department, Markazi Agricultural and Resources Research and Training Center, AREEO, Arak, Iran

3- Researcher, Seed and Plant Improvement Research Department, Markazi Agricultural and Resources Research and Training Center, AREEO, Arak, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.79946.1233](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233)

Results and Discussion

The results showed that the amount of water consumed by the optimal cropping pattern compared to the existing cropping pattern under normal, drought and wet conditions is reduced by 23.2, 29.2 and 18.1%, respectively. On the other hand, compared to the existing cropping pattern, the amount of calories produced by the optimal cropping pattern under normal, drought and wet conditions increases by 51.7, 61.9 and 45.2%, the average energy efficiency increases by 40.9, 42.8 and 35.8% and the net profit productivity increases by 43.3, 30.9 and 44.2 %, respectively. Based on the obtained results, it can be seen that in the optimal cropping pattern in drought conditions, the cultivated area of crops such as potatoes, onions, tomatoes, grain corn, sugar beets, beans, alfalfa and watermelons should reach to the zero or be at the lowest possible level. In normal and drought conditions, the cultivated area of these crops should be minimal. On the other hand, the area under cultivation of crops such as fodder sorghum, fodder corn, saffron, cumin, camellia and medicinal plants should be increased and the cultivation of these crops should be promoted at the region. Also, regarding horticultural products, the cultivated area of walnut, apple, peach, apricot and almond orchards should be minimized and replaced with plants such as grapes, oleaster, jujube, barberry, rose, and figs.

Conclusion

Based on the obtained results, it was found that the use of the optimal cropping pattern derived from the indicators of water, food, energy and economic profit is completely superior and preferred over the existing cropping pattern and single purpose optimal cropping pattern. In order to achieve sustainable water resource management, it is recommended to modify the cropping pattern during drought, normal, and wet periods based on the suggested optimal cropping pattern. The existing cropping pattern currently falls short in terms of achieving the four objectives of water, food, energy, and economic profit. Therefore, it is crucial to develop main plans and strategies in the Farahan Plain that align with the implementation of the proposed optimal cropping pattern. By doing so, it will be possible to optimize the allocation of water resources and achieve improved outcomes in terms of water availability, food production, energy efficiency, and economic profitability.

Keywords: Cropping pattern, Food, Optimization, Productivity, Water

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۱۸۷-۲۰۲

تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بست آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی (مطالعه موردی استان مرکزی- دشت فراهان)

مصطفی گودرزی^{۱*} - جواد قدیک لو^۲ - عادل غدیری^۳ - محمدعلی خودشناس^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده

ارائه و اجرای یک الگوی کشت بهینه علاوه بر مدیریت بهتر منابع پایه آب و خاک، امکان کشاورزی پایدار را فراهم نموده و از لحاظ جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی یک ضرورت انکارناپذیر است. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی چند هدفه، برای پیوند شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی در دشت فراهان و در سال ۱۴۰۰ اجرا شد. الگوی کشت بهینه برای شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به گونه‌ای ارائه شد که بهره‌برداری از منابع آب در شرایط پایدار صورت پذیرد. نتایج حاصل نشان داد، مقدار آب مصرفی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۲۳، ۲۹ و ۱۸ درصد نسبت به الگوی کشت موجود کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار کالری تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۵۲، ۶۲ و ۴۵ درصد، متوسط بهره‌وری انرژی ۴۱، ۴۳ و ۳۶ درصد و سود خالص تولیدی ۴۳، ۳۱ و ۴۴ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب بایستی الگوی کشت در دوره‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی مطابق الگوی بهینه پیشنهادی تغییر یابد. بنابراین، با توجه به اینکه الگوی کشت موجود کمترین انطباق را برای رسیدن به اهداف چهارگانه کاهش مصرف آب، افزایش تولید غذا، کاهش مصرف انرژی و افزایش سود اقتصادی دارد، برنامه‌ریزی‌های کلان در این دشت بایستی در راستای اجرای الگوی کشت بهینه پیشنهادی تدوین گردد.

واژه‌های کلیدی: آب، الگوی کشت، بهره‌وری، بهینه‌سازی، غذا

مقدمه

آب یکی از مهمترین عوامل رشد و توسعه در جوامع بشری است، کمبود آب به ویژه آب باکیفیت یکی از علل عدم توسعه کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی در اکثر کشورهای در حال توسعه است. در اقتصاد مبتنی بر کشاورزی لزوم برنامه‌ریزی همه جانبه به منظور استفاده از منابع تولید برای دست یافتن به بیشترین بازده اقتصادی امری ضروری است. هدف اصلی در هر نوع کشاورزی باید به سمت بالا بردن بهره‌وری سوق یابد تا بتواند کمبودهای ناشی از افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی

را جبران نماید (Mohammadian et al., 2008). با توجه به نامناسب بودن پراکندگی زمانی و مکانی ریزش‌های جوی در ایران و پایین بودن راندمان آبیاری در کشاورزی، آب به عنوان محدودکننده‌ترین عامل تولید در بخش کشاورزی می‌باشد. به علت گستردگی پهنه مرزی کشورمان و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون، رسیدن به الگوی کشت مناسب که از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به ویژه عامل محدودکننده آب بدست آورد، ضرورتی انکارناپذیر است (Hasan Panah et al., 2014). با افزایش روزافزون جمعیت و

۱- استادیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: m.godarzi@areeo.ac.ir

۲ و ۴- مربیان پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک،

۳- محقق، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

به تناسب افزایش نیاز به مواد غذایی و با توجه به محدودیت منابع آبی و زمین‌های مستعد جهت افزایش تولید و همچنین کمبود منابع آبی و وقوع پدیده تغییر اقلیم، تغییر در سیستم فعلی و یا بهبود الگوی کشت جهت بالا بردن و استفاده از منابع آب امری ضروری است. ارائه و اجرای یک الگوی کشت بهینه علاوه بر مدیریت بهتر منابع پایه آب و خاک می‌تواند منجر به کاهش ریسک تولید، افزایش قابلیت مقابله با بحران‌ها، ایجاد اشتغال، مدیریت بهتر ارائه خدمات به بهره‌برداران و فراهم شدن امکان گسترش صنایع مرتبط با تولیدات کشاورزی گردد. در بسیاری از مناطق دنیا از جمله در ایران جهت بهبود الگوی کشت در مناطق مختلف تحقیقات و مطالعات زیادی انجام شده است. زنگ و همکاران (Zeng et al., 2010) به منظور مدیریت منابع آب کشاورزی لیانگ ژو، در استان گانسو چین، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه به تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که راه حل ارائه شده توسط برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه در مقایسه با برنامه‌ریزی خطی چند هدفه می‌تواند نتایج بهتری را در برنامه‌ریزی و راه حل‌های بهینه به مدیران جهت تصمیم‌گیری ارائه دهد.

رگولوار و گوارو (Regulwar and Gurav, 2013) در مطالعه‌ای با استفاده از برنامه‌ریزی خطی فازی چند هدفه در ۵ منطقه مختلف از دهلی که در شرایط آب و هوایی متفاوت و در فصل‌های مختلفی از سال واقع بودند، اهداف مختلفی چون سود خالص تولید محصول، اشتغال و بهره‌برداری از کودهای آلی را حداکثر و الگوی بهینه کشت را برای این اهداف همراه با یک برنامه‌ریزی پایدار برای آبیاری با توجه به مسائل اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ارائه دادند.

پورسامانی (Poursamani, 2018) در مطالعه‌ای به تعیین الگوی کشت محصولات زراعی با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی ترتیبی و تأکید کارایی اقتصادی مصرف آب و کشاورزی پایدار در دشت تربت جام پرداخته است. در این مطالعه تدوین الگوی کشت متناسب با ظرفیت‌ها و قابلیت‌های منابع تولیدی دشت‌های زراعی گام ضروری در جهت نیل به توسعه پایدار بخش کشاورزی معرفی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی باعث کاهش مصرف مقادیر نهاده‌های تولید می‌شود. همچنین محصولات چغندر قند و پنبه در منطقه مورد مطالعه فاقد توجیه اقتصادی بوده و لذا در الگوی کشت مورد بررسی کنار گذاشته می‌شوند.

الگفی و همکاران (El Gafy et al., 2017) در تحقیقی که در کشور مصر روی ۱۹ محصول انجام دادند، الگوی کشت بهینه از منظر کاهش مصرف آب و انرژی و افزایش سود خالص در سناریوهای بدون پیوند و همراه با پیوند را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور، از سناریوهای مختلفی نظیر حداکثر سازی شاخص پیوند آب، انرژی و غذا، حداقل سازی مصرف آب، حداقل سازی مصرف انرژی و بهینه‌سازی سود خالص استفاده نمودند. نتایج نشان داد الگوی کشت همراه با پیوند

آب، انرژی و غذا نتایج مطلوب‌تری به همراه دارد. عوض‌یار و همکاران (Avazyar et al., 2018)، در تحقیقی بهینه‌سازی الگوی کشت جهت افزایش بازده آبیاری در اراضی پایاب ملاصدرا در استان فارس را مورد ارزیابی قرار دادند. به این منظور، از روش‌های برنامه‌ریزی خطی قطعی (DLP)، برنامه‌ریزی خطی با محدودیت‌های تصادفی (CCLP)، جهت ارائه‌ی یک الگوی بهینه کشت توأم با عدم قطعیت استفاده نمودند. نتایج نشان داد که با بهینه‌سازی الگوی کشت سود ناخالص سالانه زارعین در منطقه به میزان ۵۴ درصد افزایش یافته و سالانه بیش از ۱ میلیون مترمکعب نیز در مصرف آب‌های زیرزمینی صرفه‌جویی خواهد شد.

مفتاح هلقی و همکاران (Meftah Halaghi et al., 2020)، در تحقیقی بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از برنامه‌ریزی آرمانی را در حوضه آبریز قره‌سو مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش ضمن مقایسه دو روش برنامه‌ریزی خطی معمولی و برنامه‌ریزی آرمانی، الگوی کشت بهینه و میزان برداشت بهینه از منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز قره‌سو را تعیین نمودند. نتایج نشان داد که الگوی کشت بهینه پیشنهادی حاصل از مدل برنامه‌ریزی خطی متعارف باعث کاهش مصرف آب در دو شهرستان گرگان و کردکوی به ترتیب به میزان ۱۹/۶ و ۸/۸ درصد شده و در عین حال سود حاصل از تولید محصولات کشاورزی در شهرستان‌های گرگان و کردکوی به ترتیب ۱۲/۶ و ۱۰/۴ درصد افزایش می‌یابد. در صورتیکه مدل برنامه‌ریزی آرمانی الگوی کشت بهینه را با افزایش ۵ درصد سود در هر دو شهرستان، همراه با کاهش ۴۶ و ۴۷ درصد مصرف آب به ترتیب در دو شهرستان گرگان و کردکوی ارائه می‌دهد.

پناهی و فلسفیان (Panahi and Falsafian, 2021)، در تحقیقی به بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات کشاورزی در دشت شبستر با توجه به محدودیت آب پرداختند. برای این منظور از الگوهای برنامه‌ریزی خطی و آرمانی تحت سناریوهای مختلف حداکثر سازی سود و حداقل سازی مصرف آب بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که اجرای الگوی بهینه کشت با هدف حداکثر سازی سود باعث گردید که میزان سود کشاورز و مصرف آب به ترتیب ۳۸۲/۲ و ۴۴/۳ درصد افزایش و تحت هدف حداقل سازی مصرف آب، میزان سود کشاورز و مصرف آب به ترتیب ۹۰/۶ و ۲۲/۸۷ درصد کاهش یابد. اما در اجرای الگوی بهینه کشت با هدف دستیابی هم‌زمان به حداکثر سود و حداقل مصرف آب، ملاحظه شد که میزان سود ۱/۱ درصد افزایش و میزان مصرف آب ۴/۷۱ درصد کاهش می‌یابد.

عارفی‌نیا و احمدآلی (Arefinia and Ahmadaali, 2021)، در تحقیقی بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت را در استان‌های شرق کشور بر اساس ردیابی آب انجام دادند. در این تحقیق از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای بهینه‌سازی الگوی کشت محصولات زراعی با اهداف

و انگور و بر اساس سود اقتصادی اسطوخودوس، آویشن و گل‌گاوزبان اولویت اول کشت در سطح منطقه می‌باشند.

علیرغم مشکلات موجود در راستای طراحی و اجرای الگوی کشت مناسب در سطح دشت‌ها، اصلاح الگوی کشت بر اساس اصول علمی و با تأکید بر کاهش مصرف آب ضمن کاهش مصرف آب امکان کشاورزی پایدار را فراهم نموده و از لحاظ جنبه‌های اقتصادی و اجتماعی یک ضرورت انکارناپذیر است و بایستی در راستای حفظ منابع ملی نسبت به اجرای آن اقدام نمود. لذا، با توجه به ضرورت حفاظت از منابع آب و مصرف صحیح آن در بخش کشاورزی که عمده‌ترین مصرف‌کننده آب محسوب می‌گردد و رسیدن به کشاورزی پایدار، این تحقیق با هدف بهینه‌سازی الگوی کشت در دشت فراهان با در نظر گرفتن معیارهای چندگانه اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

دشت فراهان واقع در استان مرکزی دارای چهار دهستان (فرمهین، فشک، خنجین و تلخاب) و ۶۸ پارچه آبادی و دارای دو شهر فرمهین و خنجین است. دشت فراهان از طرف شمال و شرق به شهرستان تفرش و آشتیان، از جنوب به شهرستان اراک و از غرب به شهرستان کیمجان محدود می‌شود. مساحت این دشت حدود ۱۴۹۹ کیلومترمربع است که ۵۶۷۳۰ هکتار اراضی منابع طبیعی و ۹۳۱۷۰ هکتار اراضی مستثنیات (۴۱۰۰۰ هکتار اراضی دیم، ۲۷۰۰۰ هکتار آیش دیم، ۱۴۱۷۰ هکتار اراضی زیر کشت آبی، ۸۰۰۰ هکتار آیش آبی، ۲۵۰۰ هکتار باغات آبی و ۵۰۰ هکتار باغ دیم) است. دشت فراهان با مختصات جغرافیایی $35^{\circ}49'$ و $33^{\circ}49'$ درجه و $47^{\circ}49'$ تا $33^{\circ}49'$ طول شرقی و $33^{\circ}49'$ تا $33^{\circ}49'$ عرض شمالی، بخش نسبتاً وسیعی از حوضه آبخیز کویر میقان را به خود اختصاص داده است. شیب متوسط منطقه حدود ۱۰/۷ درصد و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۷۵۰ متر است. متوسط بارندگی سالانه و متوسط دمای سالانه منطقه مورد مطالعه به ترتیب معادل ۲۷۰ میلی‌متر و ۱۳/۲ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین، سطح وسیعی از منطقه دارای بافت خاک لومی رسی و لومی رسی سیلتی است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.

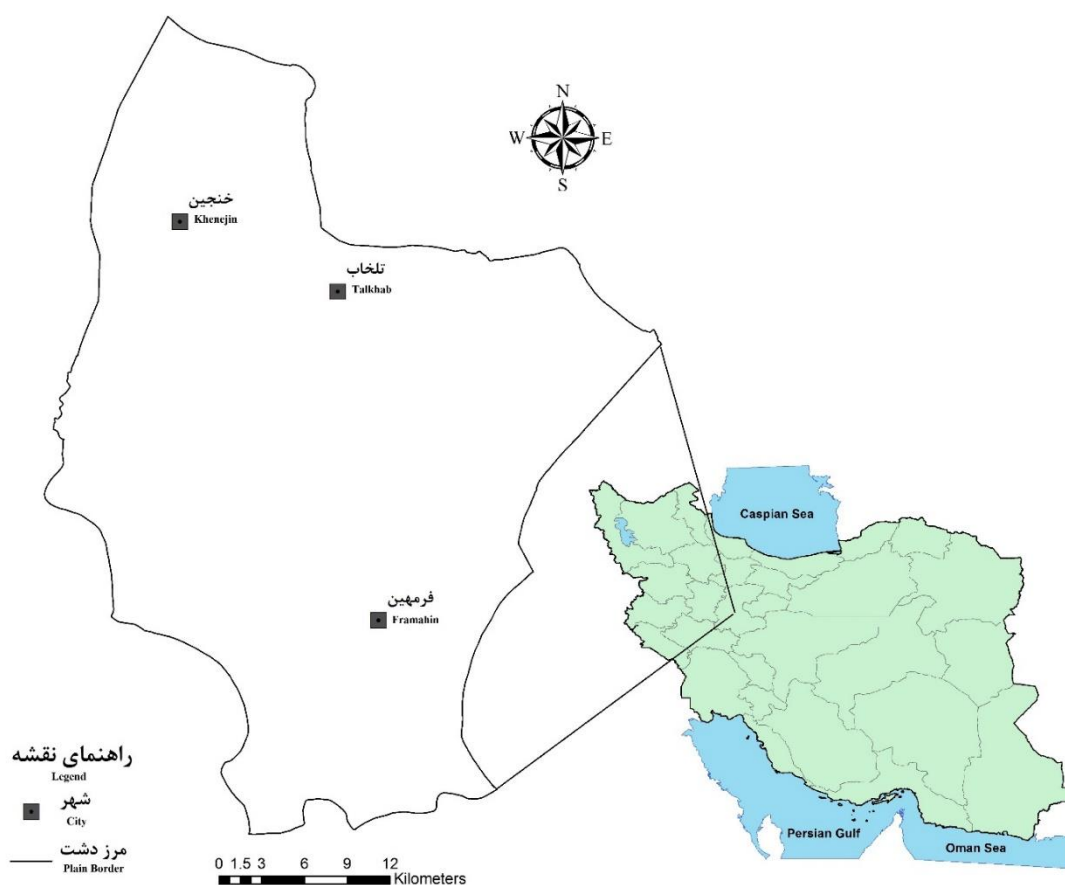
حداکثر کردن ارزش اقتصادی ردپای آب و حداقل کردن ردپای آب آبی در قالب چهار سناریو استفاده شد. نتایج نشان داد در صورت اجرای الگوی کشت بهینه چنانچه منطقه مورد مطالعه از منظر قید امنیت آبی به ترتیب در شرایط بحران متعادل، متوسط و شدید قرار داشته باشد، میزان تولید به ترتیب ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد میزان فعلی و به‌طور میانگین باعث صرفه‌جویی به ترتیب ۵۵، ۴۰ و ۳۰ درصدی منابع آبی منطقه می‌شود.

هوشمند و همکاران (Hooshmand et al., 2021)، در تحقیقی چهار مدل هیبریدی بر مبنای بیشینه‌سازی نرخ بازدهی اقتصادی و کمینه‌سازی ریسک انتخاب الگوی کشت بهینه را مورد ارزیابی قرار دادند. مدل‌ها بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی و حل مسئله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات و به‌صورت چندهدفه انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده در تمام مدل‌ها بیانگر افزایش بازدهی اقتصادی با افزایش سطح ریسک‌پذیری سیستم در انتخاب الگوی کشت‌های بهینه بود.

سیاسر و سالاری (Siasar and Salari, 2021)، در تحقیقی از الگوریتم ازدحام ذرات چند هدفه آشوبناک در تعیین الگوی کشت بهینه دشت سیستان در شرایط بهینه و کم‌آبیاری استفاده نمودند. نتایج نشان داد که الگوی کشت فعلی منطقه بهینه نبوده و با اجرای الگوی پیشنهادی مدل، سود حاصل به‌ازای واحد سطح زیر کشت، افزایش خواهد یافت. همچنین، با کاهش ۲۵ درصدی آب مصرفی شبکه، مقدار بازده برنامه‌ای ۱۴/۵ درصد و با کاهش ۵۰ درصدی آب مصرفی، مقدار بازده برنامه‌ای ۴۱/۵ درصد کاهش می‌یابد.

صالحی شفا (Salehi Shafa, et al., 2022)، در تحقیقی به بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه با دو تابع هدف سود خالص و مصرف آب کشاورزی به صورت مجزا برای دشت شهریار تهران پرداختند. نتایج نشان داد با توجه به مساحت کشت و حجم آب مصرفی بهینه محصولات انگور، انار، پیاز، سبزیجات و گلابی در هر ناحیه، سود خالص آن‌ها مناسب و ایده‌آل است و انگور بهترین محصول ممکن در میان آن‌ها می‌باشد. سیاست بهره‌برداری بهینه از منابع آبی منجر به کاهش سطح زیر کشت، حجم آب مصرفی بهینه و حجم نیاز آبی در کل محدوده مورد مطالعه نسبت به حالت فعلی به اندازه ۲۰/۴۴، ۴۹/۷۱ و ۳۵/۲ درصد می‌شود.

گودرزی (Goodarzi, 2022)، در تحقیقی به رتبه‌بندی محصولات قابل کشت در دشت فراهان با استفاده از معیارهای چندگانه و روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) پرداخت. بدین منظور با استفاده از روش AHP محصولات قابل کشت بر اساس چهار شاخص آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی و نیز ترکیب این چهار شاخص رتبه‌بندی شدند. نتایج بدست‌آمده نشان داد بر اساس معیار آب مصرفی به ترتیب سه محصول زعفران، زیره و کاملینا، بر اساس معیار کالری تولیدی به ترتیب سه محصول سورگوم علوفه‌ای، سیب‌زمینی و ذرت علوفه‌ای، بر اساس انرژی مصرفی به ترتیب سه محصول سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای



شکل ۱- موقعیت دشت فراهان در استان و کشور
Figure 1- Location of the Farahan plain in the province and country level

با برقراری مصالحه بین اهداف الگوی کشت بهینه تعیین گردد. الگوی در نظر گرفته شده برای این تحقیق در چارچوب هدف حداکثر مسافت آرمانی است، که فرم عمومی آن به صورت زیر می‌باشد (Jones and Barnes 2014؛ Mohammadi et al., 2012):

$$\text{Max: } \lambda = \left[\sum_{j=1}^m W_j \lambda_j^p \right]^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{Subjected to:} \\ &\lambda_j (Z_j^{\text{Max}} - Z_j^{\text{Min}}) + Z(X^*) \leq Z_j^{\text{Max}} \\ &\text{When } Z_j^{\text{Max}} \text{ is best} \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z(X^*) - \lambda_j (Z_j^{\text{Max}} - Z_j^{\text{Min}}) \geq Z_j^{\text{Min}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\text{When } Z_j^{\text{Min}} \text{ is best} \\ &A_{hi} X_i \leq b_h \end{aligned} \quad (4)$$

در این تحقیق، به منظور تعیین الگوی کشت مناسب با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی از هم‌بست^۱ شاخص‌های انرژی، غذا، سود اقتصادی و آب مصرفی استفاده گردید و میزان مساحت تحت کشت هر محصول مشخص شد. با توجه به اهمیت شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی در سطح منطقه مورد مطالعه و به طور کلی شرایط کشور ایران، از این اهداف به عنوان اهداف چندگانه برای بهینه‌سازی استفاده شد. بدین منظور از رویکرد برنامه‌ریزی چند هدفه، برای هم‌بست شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی استفاده گردید. با توجه به اینکه این اهداف نامتجانس هستند، لذا لازم است تا به گونه‌ای متجانس گردند. در برنامه‌ریزی‌ها و تصمیم‌گیری‌هایی که معیارهای تصمیم‌گیری از مقیاس‌های نامتجانسی برخوردارند می‌توان از منطق فازی برای همجنس کردن آنها استفاده نمود. در این تحقیق با توجه به اهمیت تعیین الگوی کشت بر اساس اهداف چندگانه تصمیم گیرندگان، سعی شد که با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و منطق فازی

$$\text{Minimize: } E = \sum E_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\dots,N \quad (9)$$

$$\text{Maximize: } Cal = \sum Cal_i Y_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\dots,N \quad (10)$$

که در این روابط W کل آب مصرفی توسط تمامی گیاهان (m^3)، N تعداد گیاهان، CWR_i آب مصرفی توسط گیاه i ام (m) و X_i مساحت اختصاص یافته به گیاه i ام (m^2)، Y_i عملکرد گیاه i (Ton/ha)، NB سود خالص ($Toman/ton$)، P_{ci} قیمت گیاه i ($Toman/ton$)، C_i هزینه تولید گیاه i ($Toman/ha$)، که شامل هزینه‌های پمپاژ نیز می‌باشد، E_i کارایی انرژی برای تولید در هر هکتار محصول i ام، E انرژی کل مصرفی برای تولید، Cal_i مقدار کالری تولیدی هر تن از گیاه i ام و Cal کل کالری غذایی تولید شده توسط محصولات الگوی کشت می‌باشد.

در این پژوهش، اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، عملکرد محصول، هزینه‌های تولید (شامل هزینه آماده‌سازی زمین، هزینه نهاده‌ها، هزینه نیروی انسانی و هزینه‌های مربوط به برداشت محصول) و قیمت فروش محصولات، از داده‌ها و اطلاعات پایگاه داده‌های سازمان جهاد کشاورزی استان مرکزی و مرکز آمار ایران (آمارنامه کشاورزی ۱۳۹۹) و اطلاعات هواشناسی از اداره هواشناسی استان مرکزی اخذ شد. برای محاسبه شاخص اقتصادی از معادلات زیر استفاده گردید.

$$GB = Y \times P \quad (11)$$

$$NB = GB - TC \quad (12)$$

که در این رابطه GB ارزش ناخالص تولیدی بر حسب ریال در هکتار، Y عملکرد محصول بر حسب کیلوگرم در هکتار، P قیمت هر کیلوگرم محصول بر حسب ریال، TC کل هزینه تولید بر حسب ریال در هکتار و NB سود خالص تولیدی بر حسب ریال در هکتار می‌باشد. بدین منظور کلیه هزینه‌های مربوط به تولید محصول شامل هزینه آماده‌سازی زمین (شخم، دیسک، بذرپاشی و غیره)، نهاده‌ها (کود، سم، بذر و غیره)، آب بهاء، عملیات آبیاری، نیروی انسانی، حمل و نقل، اجاره زمین، هزینه‌های مربوط به برداشت محصول و قیمت فروش هر محصول در هر هکتار تعیین و با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ سود خالص تعیین شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد از مزارع در سطح دشت از روش آبیاری سطحی استفاده می‌کنند و عمدتاً هزینه‌های

$$X_i \geq 0 \quad (5)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad I=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, 4 \quad h=1, 2, \dots, q \quad (6)$$

که در این روابط X_i سطح زیر کشت محصول i ام و λ_j مسافت تا حد آرمانی هدف j ام عبارت از متغیرهای تصمیم الگو هستند که باید مقادیر بهینه آنها پس از حل آن به دست آیند. رابطه ۱ تابع هدف الگو است که در آن λ جمع مرکب آرمانی اهداف مورد نظر در مطالعه است که هدف حداکثر کردن آن است. در این رابطه w_j وزن هدف j و P عامل تعادلی اهداف است. این عامل به نوعی درجه جانشینی^۱ بین اهداف را مشخص می‌کند. P برابر ۱ به معنی بیشترین درجه جانشینی و P برابر با ۳ به معنی کمترین درجه جانشینی بین اهداف است. روش کار در تعیین وزن اهداف به این صورت بود که از روش تحلیل سلسله مراتبی (Goodarzi 2022; Saaty 1980)، استفاده شد و برتری یک هدف بر هدف دیگر به صورت کمی مشخص شد که این کمیت همان وزن اهداف می‌باشد. روابط ۴ و ۵ تابع عضویت اهداف یاد شده در الگوی مطالعه را مشخص می‌کنند. در این روابط Z_j^{max} و Z_j^{min} به ترتیب حداقل و حداکثر هدف j ام، $Z_j(X^*)$ مقدار بهینه هدف و X^* جواب بهینه است و اختلاف Z_j^{max} و Z_j^{min} را با عنوان حد تحمل تعریف می‌کنند. رابطه ۴ برای اهدافی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مقدار آرمانی آنها حداقل شدن متغیر هدف مربوطه (آب و انرژی) است در حالی که رابطه ۵ برای عضویت اهداف آرمانی حداکثر شدن (کالری و سود اقتصادی) در نظر گرفته می‌شود. مجموع روابط ۳ تا ۵ مشروط بر محدودیت‌های فنی در قالب رابطه ۶ در نظر گرفته می‌شوند. در این رابطه، A_{hi} ضریب فنی^۲ i امین محصول برای h امین محدودیت (منابع تولید) و b_{hi} موجودی h امین محدودیت (منابع تولید) در الگو است. برای تشکیل توابع عضویت چهار هدف بیان شده یعنی حداقل مصرف آب، حداکثر تولید غذا، حداقل مصرف انرژی و حداکثر سود اقتصادی، ابتدا باید مقادیر بهینه برای هر یک از اهداف را مطابق روابط زیر تعیین نمود.

$$\text{Minimize: } W = \sum CWR_i X_i \text{ for } i=1,2,3,\dots,N \quad (7)$$

$$\text{Maximize: } NB = \sum_{i=1}^n [Y_i P_{ci} - C_i] X_i \quad (8)$$

اهداف می‌گذارد بیشتر شده و بنابراین امکان جانشینی و مصالحه بین اهداف کمتر می‌گردد.

۲- منظور از ضرایب فنی در الگوهای برنامه‌ریزی ریاضی عبارت از مقادیر واحد مورد استفاده از هر یک از نهاده‌ها (مقدار آب در واحد سطح، مقدار کود شیمیایی در واحد سطح، مقدار زمین اشغال شده در واحد زمان و غیره) مرتبط با مقیاس در نظر گرفته شده برای هر یک از آنها است.

۱- درجه جانشینی عبارت است از میزانی که از تحقق یک هدف برای دستیابی به هدف دیگر بایستی صرف‌نظر شود. در این مطالعه این جانشینی با تکیه بر وزن اهداف تعیین شده، مسافت بهینه‌سازی شده تا حد آرمانی برای هر هدف و مصالحه صورت گرفته بین آنها در فضای محدودیت‌های حاکم، صورت می‌گیرد. هر چه عامل تعادلی بزرگتر باشد تأثیری که تغییرات جانشینی بین اهداف بر جمع موزون مسافت آرمانی

شد (Allen et al., 1998). به منظور تعیین نیاز آبیاری گیاه (IWR) بایستی مقدار بارش مؤثر (P_e) را تعیین نمود که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌گردد (USDA, 1967):

$$P_e = P_{tot} \frac{125 - 0.2P_{tot}}{125} \text{ for } P_{tot} < 250 \text{ mm} \quad (15)$$

$$P_e = 125 + 0.1P_{tot} \text{ for } P_{tot} > 250 \text{ mm} \quad (16)$$

که در این رابطه P_e بارش مؤثر (mm) و P_{tot} بارش کل (mm) می‌باشد. بر این اساس به منظور محاسبه نیاز آبیاری از رابطه زیر استفاده شد:

$$IWR = CWR - P_e \quad (17)$$

در مورد شاخص امنیت غذایی نیز مقدار کالری تولید شده به ازای هر کیلوگرم از محصول مورد نظر در مقدار عملکرد آن محصول در هر هکتار ضرب شد و مقدار کالری کل تولید شده برای آن محصول محاسبه گردید. همچنین برای محاسبه شاخص انرژی مصرفی در تولید محصولات از رابطه کارایی انرژی استفاده گردید. به منظور محاسبه انرژی ورودی و خروجی از هم ارز انرژی نهاده‌ها یا استانداردها (جدول ۱) که در واقع بیان کننده میزان محتوای انرژی می‌باشد که در فرآیند تولید وارد یا خارج می‌شود، استفاده شد. به عنوان مثال هم ارز در نظر گرفته شده برای هر ساعت کار انسان برای شرایط کار در مزرعه ۱/۹۶ مگاژول می‌باشد که معادل با میزان انرژی مصرفی توسط آنها است.

این روش شامل آماده‌سازی زمین است در این تحقیق، صرفاً هزینه آب بهاء، و عملیات آبیاری در نظر گرفته شده است. به منظور تعیین نیاز آبی و نیاز آبیاری محصولات مختلف در دشت مورد مطالعه از روش فائو پنمن مانتیت با استفاده از روابط زیر استفاده گردید (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (18)$$

که در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل (mm/day)، R_n تابش خالص بر روی سطح گیاه (MJ/m²/day)، T متوسط دمای روزانه در ارتفاع ۲ متری (°C)، u_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار (kPa/°C)، G چگالی شار حرارتی (MJ/m²/day) و γ ثابت فیزیومتری (kPa/°C) می‌باشد. پس از تعیین مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس داده‌های هواشناسی بلندمدت منطقه، مقدار نیاز آبی هر گیاه (CWR) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$CWR = K_c \times ET_0 \quad (19)$$

که در این رابطه CWR نیاز آبی گیاه (mm/day) و K_c ضریب گیاهی می‌باشد. ضریب K_c به نوع گیاه و مرحله رشد گیاه (مرحله اولیه، مرحله توسعه گیاه، مرحله میانی و مرحله پایانی) بستگی دارد و در این پژوهش از ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده

جدول ۱- ضرایب معادل انرژی نهاده‌ها در تولید محصولات کشاورزی

Table 1- Energy equivalent of inputs in the production of agricultural products

نهاده Inputs	ضریب انرژی (مگاژول) Equivalent Energy (MJ)	واحد Unit
نیروی کار Human Labour	1.96	ساعت hr
ماشین‌آلات Machinery	62.7	ساعت hr
سوخت دیزل Diesel Fuel	47.8	لیتر L
الکتریسیته Electricity	12	کیلووات ساعت kwh
کود نیتروژن Nitrogen Fertilizer	78.1	کیلوگرم kg
کود فسفات Phosphate Fertilizer	17.4	کیلوگرم kg
کود پتاسیم Potassium Fertilizer	13.7	کیلوگرم kg
کود حیوانی Manure	0.3	کیلوگرم kg
سموم شیمیایی Chemical pesticides	210	کیلوگرم kg
آب آبیاری Irrigation Water	1.02	مترمکعب m ³
بذر Seed	14.7	کیلوگرم kg

جدول ۲- جریان انرژی ورودی و خروجی در هر هکتار گندم

Table 2- Input and output energy flow per hectare for wheat

نهادها Inputs	واحد Unit	مقدار متوسط در هکتار Average amount per hectare	ضریب انرژی (مگاژول) Equivalent Energy (MJ)	هم ارز انرژی کل Total Equivalent Energy (MJ)
آب آبیاری Irrigation Water	مترمکعب m ³	5378	1.02	5485
کود ازت Nitrogen Fertilizer	کیلوگرم kg	120	78.1	9372
کود فسفات Phosphate Fertilizer	کیلوگرم kg	50	17.4	870
کود پتاس Potassium Fertilizer	کیلوگرم kg	30	13.7	411
سموم شیمیایی Chemical Pesticides	کیلوگرم kg	3	210	630
بذر Seed	کیلوگرم kg	300	14.7	4410
نیروی کار Human Labour	ساعت hr	100	1.96	196
سوخت دیزل Diesel Fuel	لیتر L	266	47.8	12715
ماشین آلات Machinery	ساعت hr	130	62.7	8151
الکتریسیته Electricity	کیلووات ساعت kwh	1123	12	13476
گندم Wheat	کیلوگرم kg	4200	13	54600
کاه Straw	کیلوگرم kg	7250	12.5	90625
مجموع انرژی ستاندها Total Input Energy	مگاژول MJ	56317		
مجموع انرژی خروجی Total Output Energy	مگاژول MJ	145225		
کارایی انرژی Energy Efficiency		2.58		

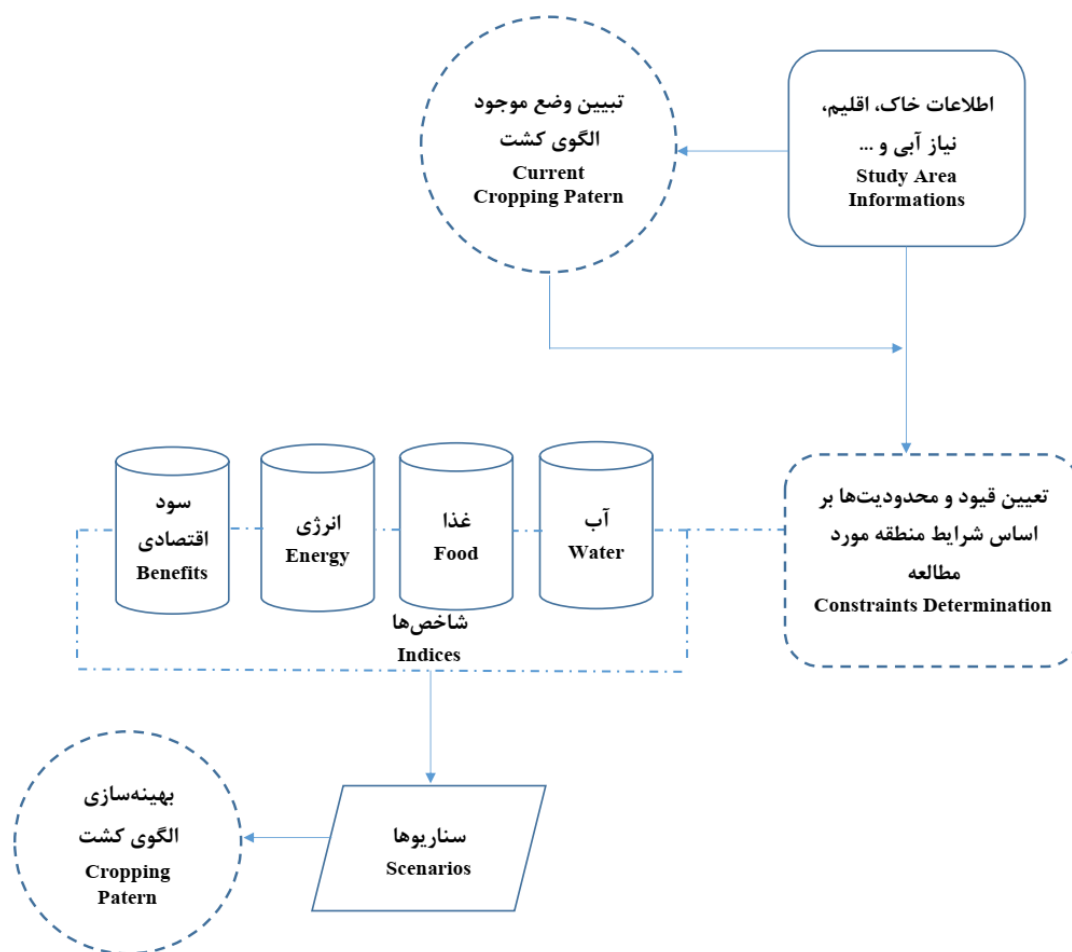
کشت، هزینه‌های کشت، و ...)، تبیین وضع موجود الگوی کشت براساس اطلاعات جمع‌آوری شده، تعیین قیود و محدودیت‌های بهینه‌سازی براساس شرایط منطقه مورد مطالعه، تعیین پارامترهای مربوط به اهداف چهارگانه بهینه‌سازی و نهایتاً بهینه‌سازی الگوی کشت برای سه سناریوی تعریف شده با استفاده از برنامه‌ریزی خطی چند هدفه در نرم‌افزارهای Lingo، MATLAB و EXCEL است. تحقق اهداف این مطالعه با توجه به حجم بالای اطلاعات ورودی و همچنین تعداد زیاد معادلات و متغیرها نیازمند انجام یک فرایند گسترده و پی در پی است که شمای کلی این فرایند در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مدل توابع هدف تحت تأثیر قیود و محدودیت‌های مختلف شامل قیود فنی، اقتصادی، اجرایی و غیره، با توجه به شرایط منطقه قرار می‌گیرند. قیود مذکور بر اساس نتایج گام اول یعنی مطالعات اولیه تعیین می‌گردد.

هم ارز در نظر گرفته شده برای نهادها نیز از محاسبه میزان انرژی مصرف شده برای تولید هر واحد از آنها به دست می‌آید. به عنوان مثال هم ارز در نظر گرفته شده برای هر لیتر گازوئیل ۴۷/۸ مگاژول می‌باشد (Heydari et al., 2012؛ Zamani et al., 2014؛ Kitani, 1999).

سپس کلیه پارامترهای مورد استفاده برای هر محصول در معادل انرژی مصرفی آن ضرب شده و بیلان انرژی ورودی و خروجی تعیین می‌گردد. در جدول ۲ نحوه انجام محاسبات جریان انرژی ورودی و خروجی در هر هکتار برای محصول گندم به عنوان نمونه ارائه شده است.

$$(۱۸) \quad \text{انرژی خروجی} / \text{انرژی ورودی} = \text{کارایی انرژی}$$

به طور کلی، فرایند بهینه‌سازی الگوی کشت در این مطالعه شامل جمع‌آوری آمار و اطلاعات مورد نیاز (اطلاعات هواشناسی، سطح زیر



شکل ۲- شمای کلی فرآیند بهینه‌سازی الگوی کشت در سطح منطقه

Figure 2- Overview of the process of optimizing the cropping pattern at the region

ایستابی سالیانه کنونی دشت، افزایش یابد. در این حالت محدودیت‌های برداشت از منابع شدت بیشتری می‌گیرد تا خسارات ناشی از خشکسالی به حداقل ممکن کاهش یابد. در این حالت میزان برداشت از منابع آب بایستی حداقل به میزان ۳۲ میلیون متر مکعب کاهش یابد.

▪ **سناریو سوم:** در این سناریو که در شرایط ترسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح آب زیرزمینی به اندازه ۲۵ درصد متوسط افت سطح ایستابی سالیانه کنونی دشت و معادل ۲۵ درصد روند ثابت حاضر در نظر گرفته می‌شود و نسبت به دو سناریوی دیگر محدودیت کمتری برای برداشت آب در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر میزان برداشت از آبخوان بایستی به میزان ۲۰ میلیون متر مکعب کاهش یابد.

به منظور بهره‌برداری پایدار از منابع آب سناریوهای الگوی کشت در شرایط مختلف بهره‌برداری از منابع آب ارائه می‌گردد. بر این اساس، با توجه به شرایط حوضه از لحاظ پایداری منابع آب الگوی کشت بهینه برای شرایطی که بهره‌برداری از منابع آب در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی است ارائه می‌گردد و در هر دوره از یکی از این سه سناریو استفاده می‌گردد. بدین منظور ۳ سناریو زیر در نظر گرفته شده و الگوی کشت بهینه برای هر یک از این سناریوها ارائه شد:

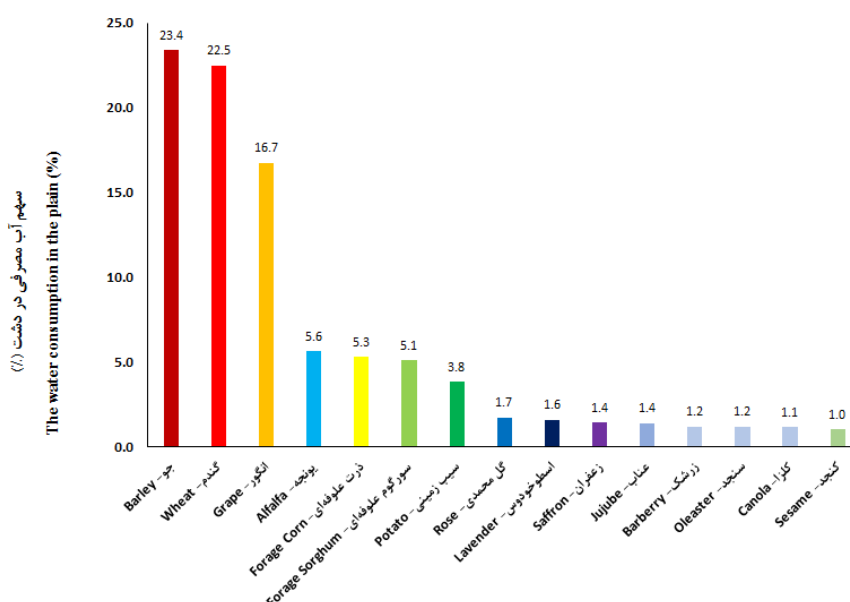
▪ **سناریو اول:** در این سناریو که در شرایط نرمال آب و هوایی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح ایستابی سالیانه صفر در نظر گرفته می‌شود و محدودیت‌ها در برداشت از آبهای زیرزمینی بیشتر می‌شود. به گونه‌ای که کسری مخزن آبخوان که معادل ۲۶ میلیون مترمکعب است صفر شود.

▪ **سناریو دوم:** در این سناریو که در شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد، افت سطح ایستابی منفی در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر برداشت از منابع آب باید در حدی کاهش یابد که سطح آب زیرزمینی به اندازه ۲۵ درصد متوسط افت سطح

نتایج و بحث

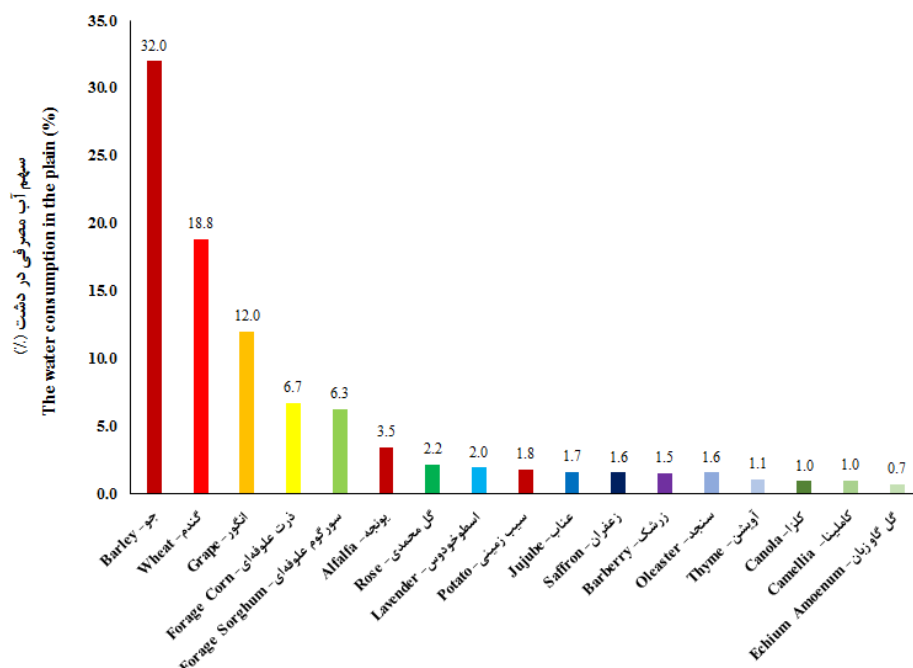
در جدول ۳ و ۴ خلاصه نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت برای سه سناریوی شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی با در نظر گرفتن چهار شاخص آب مصرفی، سود اقتصادی، انرژی مصرفی و کالری تولیدی ارائه شده است. نتایج حاصل نشان داد که با بهینه‌سازی الگوی کشت در هر سه سناریو به دلیل بهینه شدن سطح زیر کشت محصولات براساس شاخص‌های چهارگانه آب، انرژی، کالری و سود اقتصادی، مقادیر سود خالص و کالری تولیدی افزایش یافته و در مقابل آب مصرفی و انرژی مصرفی کاهش می‌یابد. بر این اساس، مقدار آب مصرفی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۲۳/۲، ۲۹/۲ و ۱۸/۱ درصد نسبت به الگوی کشت موجود کاهش می‌یابد. از طرفی مقدار کالری تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۵۱/۷، ۶۱/۹ و ۴۵/۲ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. همچنین، متوسط بهره‌وری انرژی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۴۰/۹، ۴۲/۸ و ۳۵/۸ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. در نهایت، مقدار سود خالص تولیدی الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی به ترتیب ۴۳/۳، ۳۰/۹ و ۴۴/۲ درصد نسبت به الگوی کشت موجود افزایش می‌یابد. لذا، الگوی کشت بهینه پیشنهادی در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی از نظر چهار شاخص آب مصرفی، امنیت غذایی، سود اقتصادی و بهره‌وری انرژی گزینه مناسب و برتر می‌باشد.

در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ سهم آب آبیاری مورد نیاز محصولات تحت کشت در الگوی کشت بهینه دشت فراهان برای محصولات عمده ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در شرایط نرمال با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۰۳۰۸۰۷۰ متر مکعب در سطح دشت که معادل ۲۳/۴ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و یونجه به ترتیب با ۲۲/۵، ۱۶/۷ و ۵/۶ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند. در شرایط خشکسالی نیز با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۲۹۹۵۷۵۰ مترمکعب در سطح دشت که معادل ۳۲ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و ذرت علوفه‌ای به ترتیب با ۱۸/۸، ۱۲ و ۶/۷ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند. در شرایط ترسالی با توجه به سطح زیرکشت بهینه تعیین شده، محصول جو با نیاز خالص آبیاری ۱۰۶۰۰۹۰۰ متر مکعب در سطح دشت که معادل ۲۲/۵ درصد کل حجم آب مورد نیاز برای آبیاری در دشت است، بیشترین سهم را از کل آب مصرفی دشت به خود اختصاص می‌دهد. بعد از آن سه محصول گندم، انگور و یونجه به ترتیب با ۱۷/۸، ۱۵/۷ و ۹/۳ درصد بیشترین سهم مصرف آب را در بین محصولات کشت شده در دشت به خود اختصاص می‌دهند.

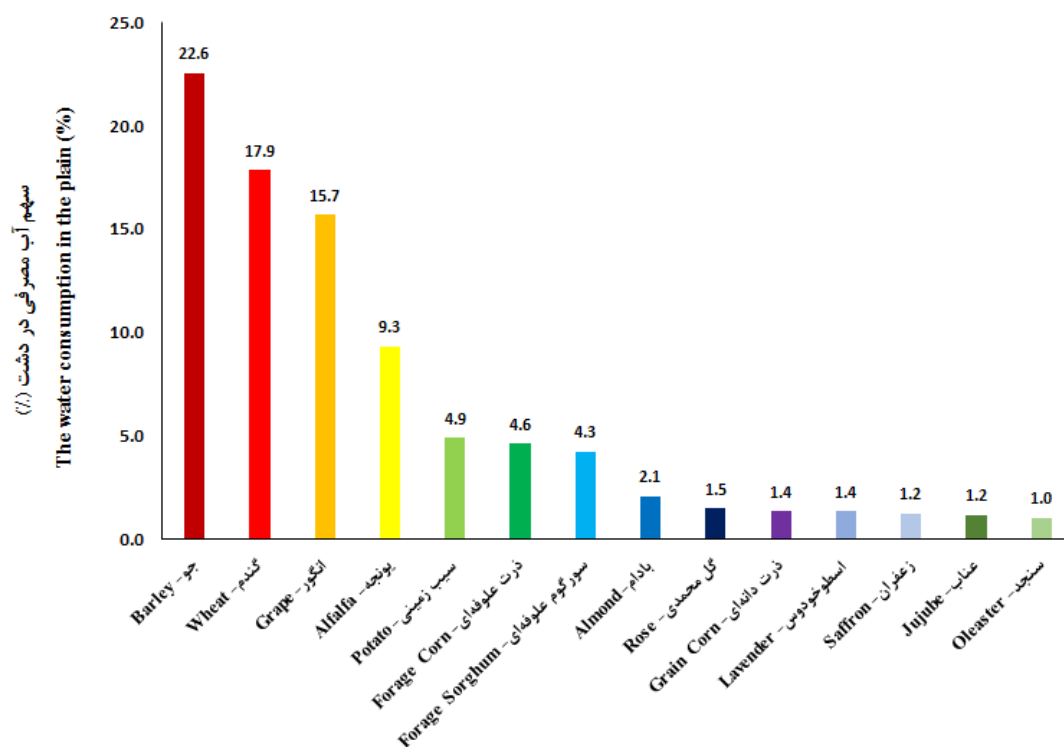


شکل ۳- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال

Figure 3- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under normal conditions



شکل ۴- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی
Figure 4- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under drought conditions



شکل ۵- سهم مصرف آب محصولات کشت شده در دشت فراهان در الگوی کشت بهینه در شرایط ترسالی
Figure 5- The water consumption of cultivated crops in the Farahan Plain in the optimal cropping pattern under wet conditions

جدول ۳- توزیع محصولات الگوی کشت در وضعیت موجود و شرایط بهینه سناریوهای مدیریتی (هکتار)
Table 2- Distribution of crops in the current state and optimal conditions of management scenarios (hectares)

محصول Crop	سطح زیر کشت در شرایط کنونی Current Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط ترسالی Wet Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط خشکسالی Drought Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط نرمال Normal Cultivated Area
یونجه Alfalfa	2207	515	165	291
آفتابگردان Sunflower	10	20	0	0
انگور Grape	745	1200	795	1200
بادام Almond	485	150	0	0
پیاز Onion	20	10	0	10
جو Baely	4868	4670	5725	4541
چغندر قند Sugar Beet	20	20	0	50
ذرت دانه‌ای Corn	10	110	0	40
ذرت علوفه‌ای Forage Corn	209	420	530	450
سیب‌زمینی Potato	455	315	100	230
عدس Lentils	1	50	70	74
گندم Wheat	3000	2836	2585	3353
لوبیا Bean	359	75	0	20
هندوانه Watermelon	100	50	0	20
نخود Pea	37	95	10	12
گلرنگ Safflower	10	65	85	50
کلزا Canola	46	120	140	180
گوجه Tomato	2	10	0	0
کنجد Sesame	5	98	20	103

منطقه ترویج گردد. همچنین در خصوص محصولات باغی بایستی سطح زیر کشت باغات گردو، سیب، هلو، زردآلو و بادام به حداقل رسیده و با محصولاتی مانند انگور، سنجد، عناب، زرشک، گل محمدی و انجیر جایگزین گردند. براساس نتایج به دست آمده، در جدول ۵ لیست محصولات جایگزین پیشنهادی در گروه‌های مختلف زراعی و باغی در دشت فراهان براساس الگوی کشت بهینه پیشنهادی ارائه شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که در الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی سطح زیر کشت محصولاتی مانند سیب‌زمینی، پیاز، گوجه، ذرت دانه‌ای، چغندر قند، لوبیا، یونجه و هندوانه بایستی به صفر و یا حداقل برسد و در شرایط نرمال و ترسالی نیز سطح زیر کشت این محصولات حداقل باشد. در مقابل سطح زیر کشت محصولاتی مانند سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای، زعفران، زیره، کاملینا و گیاهان دارویی افزایش یابد و کشت این محصولات در سطح

ادامه جدول ۳- توزیع محصولات الگوی کشت در وضعیت موجود و شرایط بهینه سناریوهای مدیریتی (هکتار)
 Table 2 Continued - Distribution of crops in the current state and optimal conditions of management scenarios (hectares)

محصول Crop	سطح زیر کشت در شرایط کنونی Current Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط ترسالی Wet Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط خشکسالی Drought Cultivated Area	سطح زیر کشت بهینه در شرایط نرمال Normal Cultivated Area
ارزن Millet	5	30	20	10
زعفران Saffron	14	300	335	320
گل محمدی Rose	7.5	235	300	250
زرشک Barberry	0	125	178	150
زیره Cumin	0	100	130	120
عناب Jujube	0	135	165	150
سنجد Oleaster	75	140	185	150
انجیر Fig	0	70	70	70
سیب Apple	49	10	0	0
هلو Peach	48	10	0	0
زردآلو Apriot	45	40	0	0
گردو Walnut	243	0	0	0
سورگوم علوفه‌ای Forage Sorghum	1	465	595	520
کاملینا Camelina	1	30	205	185
گل‌گاوزبان Echium	1	90	85	100
بابونه Chamomile	1	95	105	50
اسطوخودوس Lavender	1	200	250	220
آویشن Thyme	1	100	130	110
زوفا Hyssop	1	70	96	80

عوض‌یار و همکاران (Avazyar et al., 2018)، مفتاح هلقی و همکاران (Meftah Halaghi et al., 2020)، عارفی‌نیا و احمدآلی (Panahi and Arefinia and Ahmadaali, 2021)، پناهی و فلسفیان (Hooshmand et al., 2021)، هوشمند و همکاران (Salehi Shafa et al., 2022)، صالحی شفا و همکاران (2021)، همخوانی داشته و یافته‌های این تحقیق را تأیید می‌نماید.

نتایج این تحقیق نشان داد که سناریوهای پیشنهادی با کاهش مصرف آب موجب تعدیل افت سطح ایستابی آبهای زیرزمینی در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی شده و در عین حال در راستای رسیدن به کشاورزی پایدار می‌باشد. به عبارت دیگر ضمن کاهش مصرف آب میزان کالری تولیدی، بهره‌وری انرژی و سود اقتصادی نیز افزایش می‌یابد که با نتایج سایر تحقیقات انجام شده در این خصوص شامل

جدول ۴- مقادیر آب مصرفی، کالری تولیدی، بهره‌وری انرژی و سود خالص تولیدی در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی الگوی کشت

Table 3- Amounts of water, calories, energy efficiency and net profit in different scenarios of cropping pattern optimization

سناریو SCENARIO	سود خالص تولیدی Net Benefit (Toman)	بهره‌وری انرژی Energy Efficiency	کالری تولیدی Produced Calories (C)	آب مصرفی Water Consumption (m ³)
الگوی کشت کنونی Current Cropping Pattern	1.07626×10 ¹¹	2.37	2.18694×10 ¹¹	114.8
الگوی کشت بهینه در شرایط نرمال Normal Cropping Pattern	1.54283×10 ¹¹	3.34	3.31824×10 ¹¹	88.1
الگوی کشت بهینه در شرایط خشکسالی Drought Cropping Pattern	1.40955×10 ¹¹	3.39	3.54099×10 ¹¹	81.3
الگوی کشت بهینه در شرایط ترسالی Wet Cropping Pattern	1.55216×10 ¹¹	3.22	3.17577×10 ¹¹	94

جدول ۵- محصولات جایگزین پیشنهادی در دشت فراهان براساس الگوی کشت بهینه پیشنهادی

Table 4- Suggested alternative crops in Farahan Plain based on the proposed optimal cropping pattern

محصول در شرایط موجود Current Cultivated Crops	محصول جایگزین Alternative Crops
حبوبات (انواع لوبیا) Legumes (Beans)	عدس، نخود lentils, chickpeas
علوفه (یونجه) Forage (Alfalfa)	سورگوم علوفه‌ای، ذرت علوفه‌ای، جو، کاملینا، ارزن Fodder Sorghum, Fodder Corn, Barley, Camellia, Millet
غلات (گندم، ذرت) Cereals (Wheat, Corn)	جو، ارزن، کنجد، کاملینا، کلزا، گلرنگ Barley, Millet, Sesame, Camelina, Canola, Safflower
محصولات باغی Horticultural Products	انگور، سنجد، عناب، زرشک، گل محمدی، گیاهان دارویی Grapes, Oleaster, Jujube, Barberry, Rose, Medicinal Plants
سبزی و صیفی (هندوانه، پیاز، سیب‌زمینی، گوجه) Vegetables and Summer Crops	کشت گلخانه‌ای Greenhouse Cultivation

نتیجه‌گیری

مصرفی و سود اقتصادی می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که استفاده از الگوی کشت بهینه حاصل از شاخص‌های آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی بر الگوی کشت موجود و الگوی کشت تک هدفه کاملاً برتری داشته و دارای ارجحیت است. همچنین، به منظور بهره‌برداری بهینه از منابع آب بایستی الگوی کشت در دوره‌های خشکسالی، نرمال و ترسالی مطابق الگوی بهینه پیشنهادی تغییر یابد. بنابراین، با توجه به اینکه الگوی کشت موجود کمترین میزان اهداف چهارگانه آب، غذا، انرژی و سود اقتصادی را تأمین می‌کند، برنامه‌ریزی‌های کلان در این دشت بایستی در راستای اجرای الگوی کشت بهینه پیشنهادی تدوین گردد و تمام امکانات و ابزارهای حمایتی دولت در جهت اجرای الگوی کشت بهینه به کار گرفته شوند.

به طور کلی، نتایج این تحقیق نشان داد که در دشت فراهان کشاورزی پایدار انجام نمی‌شود، الگوی کشت موجود الگوی بهینه نمی‌باشد و کشاورزان به صورت بهینه از منابع آب و خاک و سایر نهاده‌های کشاورزی استفاده نمی‌کنند. این مسئله باعث شده که ضمن بهره‌برداری ناپایدار از منابع و به خطر افتادن این منابع در دشت، کشاورزان سود مناسبی نیز بدست نمی‌آورند و در راستای تأمین امنیت غذایی نیز گام بر نمی‌دارند. از این رو، یکی از مهمترین اقدامات برای رسیدن به کشاورزی پایدار در این دشت اصلاح الگوی کشت و بهینه‌سازی آن بر اساس شاخص‌های آب مصرفی، امنیت غذایی، انرژی

منابع

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Arefinia, A., & Ahmadaali, K. (2021). Multi-objective optimization of cropping pattern by emphasizing on water footprint in the eastern provinces of Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 188-198. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.1.16.6>
- Avazyar, M., & Ahmadpour Borazjani, M., & Ziaee, S. (2018). Determine optimal crop pattern with an emphasis on increasing the irrigation efficiency in lands of Mollasadra Dam in Fars province. *Water Engineering*, 11(36), 21-32. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1397.11.36.3.4>
- Azari, M., Ansari, H., Farid Hosseini, A., & Amirnejad, H. (2012). *Determining the pattern of optimal crop*

- production using linear programming, a case study in the east of Mazandaran province*. The first national conference on sustainable agriculture and natural resources, Tehran. (In Persian)
5. El Gafy, I., Grigg, N., & Reagan, W. (2017). Water-food-energy nexus index to maximize the economic water and energy productivity in an optimal cropping pattern. *Water International*, 42(4), 495-503. <https://doi.org/10.1080/02508060.2017.1309630>
6. Goodarzi, M. (2022). Prioritization of Arable Crops Using Multiple Criteria and Analytical Hierarchy Process (AHP) Method, Case Study: Markazi Province - Farahan Plain. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(3), 485-498. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.3.3.4>
7. Hasan Panah, D., Nikshad, Kh., Sui, A., & Karbalai Khayavi, H. (2014). *Program for optimizing the cultivation pattern of crops and garden crops in Ardabil province*. Technical Report, No. 38, Agricultural Research, Education and Extension Organization. (In Persian)
8. Heydari, M.D., Omid, M., Akram, A., Mebli, H., & Rajaeifar, M.A. (2012). Energy consumption in agricultural and livestock products of Iran: a review study. 8th National Congress of Agricultural Machine Engineering (Biosystem) and Mechanization of Iran, Mashhad. (In Persian)
9. Hooshmand, A., Mohammadzadeh, H., Kanooni, A., & Haghighi, A. (2021). Optimization of cultivation pattern based on risk management in the downstream irrigation network of Ardabil Yamchi Dam. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(4), 918-930. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.20087942.2021.15.4.15.5>
10. Jones, D., & Barnes, E.M. (2000). Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Journal of Agricultural System*, 65, 137-158. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00026-3)
11. Kitani, O. (1999). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, Volume V Energy and Biomass Engineering, Chapter 1 Natural Energy and Biomass, Part 1.3 Biomass Resources.
12. Meftah Halaghi, M., Ghorbani, K., Keramatzadeh, A., & Salarijazi, M. (2020). Crop pattern optimization by using Goal programming (case study: Gharesoo basin). *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(1), 163-180. (In Persian with English abstract) <https://dx.doi.org/10.22069/jwsc.2020.16875.3223>
13. Mohammadi, H., Boustani, F., & Kafilzadeh, F. (2012). Optimal cropping pattern using a multi-objectives fuzzy non-linear optimization algorithm: A case study. *Water and Wastewater*, 23(4), 43-55. (In Persian with English abstract)
14. Mohammadian, F., Alizadeh, A., Neyrizi, S., & Arabi, A. (2008). Development of a sustainable cropping pattern based on virtual water trade. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 2(1), 109-126. (In Persian with English abstract)
15. Nikoi, A. (2014). *Developing the national cropping pattern plan in pilot stage: Dasht village, Shahreza city, Esfahan Province*. Final Report. Agricultural Research, Education and Extension Organization. (In Persian)
16. Panahi, A., & Falsafian, A. (2021). Optimization of the crop cultivation in the Shabestar plain under water constraint. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 10(4), 36-48. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30495/wsrcj.2021.18079>
17. Poursamani, S. (2018). *Determining the optimal pattern of crop cultivation using the ideal planning method with an emphasis on the economic efficiency of water consumption and sustainable agriculture (case study: Torbat Jam plain)*. Master's thesis in the field of agricultural economics, Birjand University. (In Persian)
18. Regulwar, D.G., & Gurav, J.B. (2013). Two-phase multi objective fuzzy linear programming approach for sustainable irrigation planning. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(6), 642-651. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.56065>
19. Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation*. McGraw-Hill, New York. [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
20. Salehi Shafa, N., Babazadeh, H., Aghayari, F., & Saremi, A. (2022). Determining the optimal cultivation area and pattern of agricultural water consumption in order to manage multi-objective planning. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(1), 119-133. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.1.10.7>
21. Siasar, H., & salari, A. (2021). Optimization of Sistan plain cropping pattern using multi-objective chaotic particle swarm optimization Algorithm. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(5), 1006-1017. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.5.2.0>
22. USDA. (1967). *Irrigation water requirements*. Tech. Release No. 21, United States Dept. of Agr., Soil Manage, 59, 67-75.
23. Zamani, O., Ghaderzadeh, H., & Mortazavi, Sa. (2014). Cropping pattern system respect to sustainable agriculture and optimum use of energy "A case of Saqez County of Kurdistan Province". *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(1), 31-43.
24. Zeng, X., Kang, S., Li, F., Zhang, L., & Guo, P. (2010). Fuzzy multi-objective linear programming applying to crop area planning. *Agricultural Water Management*, 98(1), 134-142. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.08.010>



The Effect of Magnetized Saline Water on Yield and Yield Components of Strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Silva)

M. Khoshravesh^{1*}, M. Pourgholam-Amiji², F. Emami Ghara³

Received: 26-01-2023
Revised: 19-02-2023
Accepted: 23-02-2023
Available Online: 23-02-2023

How to cite this article:

Khoshravesh, M., Pourgholam-Amiji, M., & Emami Ghara, F. (2023). The effect of magnetized saline water on yield and yield components of strawberry (*Fragaria ananassa* cv. Silva). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 203-217. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.80814.1248>

Introduction

Considering the value of water in agriculture and the limitation of this important and vital resource and the existence of intermittent droughts in the country, saving in consumption and optimal use of available water seems necessary. Today, utilizing saltwater is considered one of the practical and effective approaches to minimize water consumption while achieving acceptable economic performance. Given the scarcity of freshwater sources, the utilization of unconventional water for strawberry cultivation holds significant economic importance. Through the application of innovative technologies, such as magnetic technology, the modification of these water sources can lead to increased quantitative and qualitative yields of agricultural products. Salinity stress, which alters the water and nutrient absorption patterns, directly impacts the plant's yield in terms of both quantity and quality. Strawberry is an important commercial product, and the quantitative and qualitative increase of its yield is emphasized from different aspects. The purpose of this research is to the effect of salinity stress under the influence of a magnetic field on the yield and yield components of the strawberry plant.

Materials and Methods

The purpose of this research was to investigate the effect of salinity stress under the influence of magnetic fields on the yield and yield components of strawberry plants. The factorial experiment was conducted in the form of a randomized complete block design with three replications in 2021 and 2022 in Neka city. The control treatment included full irrigation in all stages of plant growth with normal water (non-magnetic). The treatments include the type of irrigation water at two levels (Non-Magnetic Water (W1) and Magnetic Water (W2)), and water salinity was at three levels (0.86 dS/m (S1), 20 mM sodium chloride (S2), and 40 mM sodium chloride (S3)). The strawberry plant of the Silva cultivar was cultivated in 3 x 4-meter plots with a row spacing of 40 cm and a between the spacing of 40 cm. Magnetization of irrigation water was created by passing water through a permanent magnet with a magnetic field intensity of 0.3 Tesla. The salt used for salinity stress was laboratory sodium chloride. The used irrigation method was drip (tape), and the amount of irrigation water and irrigation cycle was done according to the needs of the plant. Soil moisture monitoring was used to calculate the amount of applied water.

Results and Discussion

The results of analysis of variance showed that the effect of the irrigation water type and different levels of water salinity on the length, diameter, number of fruits per plant, fruit weight, biomass and plant yield was significant at the 1% probability level. The effect of water salinity on the number of fruits per plant was significant at the 1% probability level and on the fruit length and fruit diameter at the 5% probability level. The interaction effect of irrigation water type and water salinity was also significant at the probability level of 1%. On average, during two years of strawberry cultivation with the application of a magnetic field, the length, diameter, number

1 and 3- Associate Professor and M.Sc. Graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)

2- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.80814.1248](http://doi.org/10.22067/jsw.2023.80814.1248)

of fruits per plant, fruit weight, biomass, and plant yield were increased by 9.76, 14.14, 23.05, 27.60, 27.08, and 28.36% respectively. The introduction of 20 and 40 mM sodium chloride resulted in a decrease in the physical characteristics of strawberry fruit and overall yield. The most significant reduction was observed in the number of fruits per plant at the salinity level of 40 mM sodium chloride, exhibiting a 56.69% decrease compared to the control treatment.

Conclusion

The growth of population and expansion of agriculture on one hand and the demand for more harvesting from limited water resources on the other hand, make it necessary to increase water productivity. Lack of water and competition for water resources has caused research to be done in order to reduce water consumption and preserve its resources. Therefore, searching for ways to reduce consumption and preserve water resources is of great importance. One of these methods is using magnetic water. The results of the research showed that the use of magnetic water technology caused a significant increase in the yield and yield components of strawberries compared to the control treatment. In addition, the salinity level of irrigation water had a significant impact on the yield and yield components of strawberries, with the highest yield observed in the treatment without salinity stress when using magnetic water technology. The findings of this study indicate that the application of magnetic water technology can enable the use of low salinity levels and lead to improved strawberry yield.

Keywords: Bush yield, Growth parameters, Magnetized water, Water salinity

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۰۳-۲۱۷

اثر آب شور مغناطیسی شده بر عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی
(*Fragaria ananassa* cv. Silva)

مجتبی خوش‌روش^{۱*} - مسعود پورغلام آمیجی^۲ - فائزه امامی قرا^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

چکیده

هدف از این پژوهش تأثیر تنش شوری تحت تأثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه توت‌فرنگی می‌باشد. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در شهرستان نکا انجام شد. تیمار شاهد شامل آبیاری کامل در تمام مراحل رشد گیاه و با آب معمولی (غیرمغناطیسی) بود. تیمارها شامل نوع آب آبیاری در دو سطح (آب غیرمغناطیسی (W1) و آب مغناطیسی (W2)) و شوری آب در سه سطح (۰/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر (S1)، ۲۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (S2) و ۴۰ میلی‌مولار کلرید سدیم (S3)) بود. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر نوع آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب بر طول، قطر، تعداد میوه در هر بوته، وزن میوه، زیست‌توده و عملکرد بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. به‌طور متوسط طی دو سال کشت توت‌فرنگی با اعمال میدان مغناطیسی، طول، قطر، تعداد میوه در هر بوته، وزن میوه، زیست‌توده و عملکرد بوته به‌ترتیب ۹/۷۶، ۱۴/۱۴، ۲۳/۰۵، ۲۷/۰۸ و ۲۸/۳۶ درصد افزایش نشان داد. با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار کلرید سدیم، خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی و عملکرد کاهش یافت. بیشترین کاهش مربوط به تعداد میوه در هر بوته در سطح شوری ۴۰ میلی‌مولار کلرید سدیم بود که نسبت به تیمار شاهد ۵۶/۶۹ درصد کاهش یافت. نتیجه نهایی این پژوهش نشان داد که با استفاده از فن‌آوری آب مغناطیسی می‌توان از سطوح کم شوری استفاده نمود و مقدار عملکرد توت‌فرنگی را بهبود بخشید.

واژه‌های کلیدی: آب مغناطیسی، پارامترهای رشدی، شوری آب، عملکرد بوته

مقدمه

ترکیبات فنولی و آنتوسیانین است (Dolatshah et al., 2015). سطح زیر کشت توت‌فرنگی در ایران ۵۷۱۸ هکتار با میانگین عملکرد ۱۱۸۳۱ کیلوگرم در هکتار و تولید کل کشور ۶۴۰۹۷ تن می‌باشد که به‌ترتیب استان‌های کردستان، مازندران و گلستان بیشترین تولید در کشور را دارند (Ahmadi et al., 2021). اما تولید توت‌فرنگی به‌وسیله دامنه‌ای از تنش‌های زنده و غیرزنده محدود می‌شود. اولین فرایندهایی که در گیاهان تحت تأثیر تنش‌های غیرزنده قرار می‌گیرند، فتوسنتز، پتانسیل اسمزی، هدایت روزنه‌ای و یا ترکیبی از این ویژگی‌ها می‌باشند که نهایتاً

توت‌فرنگی میوه‌ای خوشمزه با ارزش غذایی و سلامتی بالا و یک میوه تجاری مهم است که سطح زیر کشت و مصرف آن در جهان رو به افزایش است. میوه رسیده توت‌فرنگی دارای ترکیباتی نظیر پروتئین، فیبر، قندهایی مثل فروکتوز، گلوکز، ساکارز، اسیدهای آلی مثل اسید سیتریک و اسید مالیک، ویتامین‌های ث، آ، تیامین، ریبوفلاوین و نیاسین، عناصر معدنی مانند پتاسیم، کلسیم، فسفر و آهن و همچنین

۱ و ۳- به‌ترتیب دانشیار و دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

ممکن است به صورت تأثیر بر مورفولوژی و فیزیولوژی و مکانیزم‌های بیوشیمیایی، سلولی و مولکولی گیاهان دیده شوند (Rashid et al., 2014).

رشد جمعیت و گسترش کشاورزی از یک سو و تقاضای برداشت بیشتر از منابع محدود آب از سوی دیگر، افزایش بهره‌وری آب را ضروری می‌سازد. کمبود آب و رقابت بر سر منابع آب سبب شده که پژوهش‌هایی در راستای کاهش مصرف آب و حفظ منابع آن صورت گیرد. بنابراین جستجوی راه کارهایی جهت کاهش مصرف و حفظ منابع آب سالم از اهمیت بالایی برخوردار است (Dube et al., 2023). از طرفی تنش شوری از عوامل اصلی محدودکننده رشد رویشی و زایشی اکثر گیاهان می‌باشد و عاملی است که بر متابولیسم، آناتومی و مورفولوژی گیاه اثر می‌گذارد (Saied et al., 2005). توت‌فرنگی گیاهی حساس به شوری است که عملکرد آن بسته به رقم، از یک تا دو دسی‌زیمنس بر متر به بالا شروع به کاهش کرده و به ازای افزایش هر یک دسی‌زیمنس بر متر شوری، ۳۳ درصد کاهش عملکرد دارد (Maas and Hoffman, 1977). یکی از عوامل موثر در رشد و میزان عملکرد توت‌فرنگی کیفیت آب مصرفی و خاک مورد نیاز این گیاه می‌باشد و چنانچه غلظت کلریدسدیم افزایش یابد از عملکرد آن به شدت کاسته می‌شود. غلظت‌های بالای نمک در خاک یا آب آبیاری، اثرات نامطلوبی روی متابولیسم گیاه دارد. اثر تنش شوری روی گیاهان بستگی به غلظت نمک، مدت زمان قرار گرفتن در معرض تنش ژنوتیپ گیاه و عوامل محیطی از جمله دمای بالا و شرایط نوری دارد (Hassanuzzaman et al., 2013). یکی از پاسخ‌های متابولیکی معمول در برابر تنش شوری در بسیاری از گیاهان، تجمع مواد آلی محلول با وزن مولکولی کم می‌باشد. این مواد محلول، پلی‌ال‌های خطی (گلیسرول، مانیتول یا سوربیتول)، پلی‌ال‌های حلقوی (اینوسیتول یا پینیتول) و اسیدهای آمینه را شامل می‌شوند (Jouyban, 2012). غلظت بالای نمک کلریدسدیم در محلول غذایی باعث کاهش مقدار کل پروتئین محلول در برگ‌های توت‌فرنگی می‌شود در حالی که فعالیت پراکسیداز افزایش می‌یابد (Gulen et al., 2006). کف‌جن و پاولزیک (Keutgen and Pawelzik, 2008a) نشان دادند که غلظت بالای کلریدسدیم به میزان ۴۰ و ۸۰ میلی‌مول بر لیتر، آسکوربیک اسید و همچنین اسیدهای آمینه آزاد شامل پرولین، آسپاراژین، و گلوتامین را افزایش داد. همچنین پاسخ گیاهان به تنش شوری تحت تأثیر هورمون‌های گیاهی از جمله متیل‌جاسمونات، آبسزیک اسید و سایتوکینین قرار می‌گیرد (Yoon et al., 2009). از طرفی نقش اصلی آبسازیک‌اسید، تنظیم تعادل آب گیاه و ایجاد مقاومت اسمزی است (Muhammad Aslam et al., 2022).

لولایی و همکاران (Loulaei et al., 2013) به بررسی اثر متقابل شوری و کلرید کلسیم بر صفات کیفی و عملکرد توت‌فرنگی رقم گامروسا پرداختند. نتایج نشان داد که توت‌فرنگی در برابر تنش شوری

دارای مقاومت کمی بود؛ به طوری که با افزایش درجه شوری طول دمبرگ، تعداد میوه و وزن میوه کاهش یافت. همچنین نمک کلرید سدیم و کلرید کلسیم موجب افزایش میزان مواد جامد محلول در میوه شد. سیدلر فاطمی و همکاران (Seyedlor Fatemi et al., 2009) اثر تنش شوری بر روی توت‌فرنگی رقم سیلوا را بررسی و دریافتند که با افزایش غلظت کلریدسدیم، سطح برگ، تعداد برگ، تعداد میوه، وزن تر و خشک گیاه و در نتیجه عملکرد کاهش یافت. کف‌جن و پاولزیک (Keutgen and Pawelzik, 2008b) اثر تنش شوری بر روی دو رقم توت‌فرنگی السانتا و کرونا در شرایط آب‌کشت را بررسی و نشان دادند که با افزایش سطح شوری، وزن میوه به میزان ۲۶ درصد در رقم کرونا و ۴۶ درصد در رقم السانتا کاهش یافت. همچنین اندازه میوه تحت تأثیر عوامل شوری نیز کاهش یافت. نتایج تحقیق خیاط و همکاران (Khayyat et al., 2007) درباره اثر تنش شوری بر روی توت‌فرنگی رقم سیلوا نشان داد که تعداد میوه و به تبع آن عملکرد کل گیاه تحت تنش نسبت به گیاهان شاهد کاهش یافت. همچنین کاهش وزن میوه در مقایسه با تعداد میوه نسبت به تنش شوری حساسیت بیشتری نشان داد. کارلیداک و همکاران (Karlidag et al., 2011) با بررسی تنش شوری بر روی دو رقم توت‌فرنگی و A6 نشان دادند که با افزایش میزان شوری، محتوای نسبی آب برگ در هر دو رقم کاهش معنی‌دار داشت. یوسفی و همکاران (Yusefi et al., 2011) نشان دادند که با اعمال شوری در کل سیستم ریشه وزن تر و خشک میوه، طول میوه و عملکرد به طور معنی‌داری کاهش یافت. همچنین اعمال شوری ۳۰ میلی‌مولار به بخشی از ریشه سبب افزایش کیفیت میوه توت‌فرنگی بدون کاهش عملکرد شد. تاهان و اریس (Turhan and Eris, 2005) نشان دادند که اعمال شوری NaCl با غلظت‌های مختلف ۹، ۱۸ و ۳۵ میلی‌مولار در محیط ریشه به مدت ۱۰، هفته ویژگی‌های مورفولوژیکی و ترکیب یونی توت‌فرنگی رقم کاماروزا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. نتایج مطالعه دیگر پژوهشگران نشان داد که اسید استیک خارجی می‌تواند مقاومت به شوری را با افزایش فعالیت آنزیم آنتی‌اکسیدانی و محتوای هورمونی در گیاه توت‌فرنگی تسریع کند (Mirfattahi & Eshghi, 2023).

سینگ و همکاران (Singh et al., 2000) با اضافه کردن کلریدسدیم به محیط کشت قلمه‌های انگور دریافتند که با افزایش شوری، میزان قند افزایش یافت و بیان داشتند که این ماده در تنظیم پتانسیل اسمزی برگ‌ها نقش مهمی دارد. عمادی و همکاران (Emadi et al., 2009) با بررسی اثر تنش شوری بر روی گیاه چغندر قند در شرایط آب‌کشت، نشان دادند که با افزایش غلظت کلریدسدیم، تجمع پرولین در اندام‌های هوایی افزایش می‌یابد که این می‌تواند باعث بالا رفتن نسبی تحمل به تنش شوری در گیاه گردد. زمانی که گیاه در معرض تنش‌های زیستی و غیرزیستی قرار می‌گیرد، اولین واکنش آن کاهش فعالیت‌های متابولیکی طبیعی گیاه است که در نهایت باعث

حوزین و همکاران (Hozayn *et al.*, 2019) نشان دادند که آب مغناطیسی باعث افزایش ارتفاع گیاه، وزن تر و خشک و سطح برگ گندم شد. محمودی و همکاران (Mahmoudi *et al.*, 2016) در شرایط آب و هوایی مشهد دریافتند که قرار دادن بذر در میدان مغناطیسی موجب افزایش معنی‌دار ماده خشک شد. رستگار و صادقی لاری (Rastegari & Sadeghi-Lari, 2015)، اثر آب مغناطیسی بر جوانه‌زنی و خصوصیات رشد اولیه بذر گوج‌فرنگی را بررسی کردند. نتایج نشان داد که آبیاری با آب مغناطیسی اثرات معنی‌داری بر فاکتورهای مختلف مورد مطالعه داشته است. جوانه‌زنی بذرهای آبیاری شده با آب مغناطیسی در هر دو رقم ۹۴/۶ درصد بود؛ در حالی که درصد جوانه‌زنی در بذرهای شاهد ۹۰ و ۹۳ درصد به ترتیب در رقم سانسید و صادین مشاهده شد ایشان بیان کردند که کاربرد آب مغناطیسی منجر به بهبود کمی و کیفی رشد گیاهان خواهد شد.

پورغلام آمیجی و همکاران (Pourgholam-Amiji *et al.*, 2022) اثر آبیاری با پساب مغناطیسی تصفیه‌شده بر بهره‌وری آب ذرت را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که اثر نوع آبیاری و اختلاط آب و پساب بر بهره‌وری‌های بیولوژیکی، فیزیکی، علوفه تر و علوفه خشک معنی‌دار شد. به‌طور متوسط، آبیاری با پساب مغناطیسی در معرض میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا باعث افزایش معنی‌دار بهره‌وری‌های بیولوژیکی (۱۰/۳۳ درصد)، فیزیکی (۳۵/۹ درصد)، علوفه تر (۱۰/۰۷ درصد) و علوفه خشک (۱۱/۴۹ درصد) نسبت به پساب غیرمغناطیسی شد. همچنین تمامی پارامترهای ذکرشده با افزایش درصد پساب استفاده‌شده در آبیاری، افزایش یافت. زندی و همکاران (Zandi *et al.*, 2022) به بررسی اثر جیبرلیک‌اسید و میدان مغناطیسی بر ماندگاری توت‌فرنگی رقم سلوا در شرایط تنش دمایی پرداختند. از لحاظ اثر متقابل سه‌گانه تیمارهای پژوهش، بهترین تیمار مؤثر بر افزایش مدت زمان نگهداری توت‌فرنگی، تیمار ترکیبی مصرف ۵۰ میلی گرم در لیتر جیبرلیک‌اسید، میدان مغناطیسی ۱۰ تسلا و دمای ۸ درجه سلسیوس بود. شکرانی و همکاران (Shokrani *et al.*, 2011) اثر محلول کلریدسدیم مغناطیس‌شده را بر رشد و جوانه‌زنی گیاهچه خلر بررسی کردند. نتایج نشان داد که اثر آب مغناطیس‌شده روی افزایش درصد جوانه‌زنی، طول ریشه‌چه و طول ساقه‌چه معنی‌دار بود. با توجه به روند رو به کاهش منابع آب شیرین، استفاده از منابع آب نامتعارف و اصلاح آن با استفاده از فن‌آوری آب مغناطیسی ضروری است (Ramesh & Ostad-Ali-Askari, 2023). تاکنون در مورد اثر تنش شوری با استفاده از آب مغناطیسی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه توت‌فرنگی پژوهشی صورت نگرفته است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی استفاده از آب شور مغناطیسی‌شده بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه توت‌فرنگی می‌باشد.

کاهش رشد آن می‌گردد. در این شرایط، کاهش سنتز پروتئین‌های محلول برگ یکی از اولین اثرات منفی شرایط تنش است و یکی از علائم مشخص خسارت تنش در گیاه، کاهش غلظت پروتئین‌ها در برگ می‌باشد. نئوکلوئس و واسیلاکاکیس (Neocleous and Vasilakakis, 2007) با بررسی تأثیر تنش شوری، ناشی از کلریدسدیم روی تمشک قرمز مشاهده کردند که در اثر تنش شوری، میزان کلروفیل برگ‌های تمشک به‌طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. زاهدی و همکاران (Zahedi *et al.*, 2020) بیان کردند که تنش شوری منجر به کاهش عملکرد، پارامترهای کیفی میوه، رنگدانه‌های فتوسنتزی برگ، غلظت عناصر درشت مغذی و همچنین افزایش تنش اکسیداتیو در توت‌فرنگی شده و محلول‌پاشی ملاتونین همه این تغییرات را کاهش داد. علاوه بر این، ملاتونین منجر به افزایش عملکرد و کیفیت میوه توت‌فرنگی، به ویژه در گیاهانی که در شرایط شوری رشد می‌کنند، شد. بنابراین کم‌آبی و کاهش هزینه‌های بسیار بالای توسعه منابع آبی جدید و حفاظت محیط‌زیست، انگیزه استفاده از آب‌های نامتعارف را ضروری می‌سازد. این آب‌ها شامل دو گروه عمده پساب‌ها و آب‌های شور هستند که استفاده مستقیم از آن‌ها، مشکلات محیط زیستی و آلودگی خاک را سبب می‌شود؛ بنابراین یافتن راه‌های سریع‌تر و ارزاتر برای اصلاح این آب‌ها بسیار با اهمیت است. یکی از راهکارها استفاده از فناوری‌های نوین از جمله فناوری مغناطیسی به‌عنوان روش زیستی می‌تواند بسیار مفید باشد.

عبور آب از یک میدان مغناطیسی باعث تغییر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب مانند کشش سطحی، قابلیت حل نمک‌ها (Khoshrovesh *et al.*, 2018)، تغییر ساختار خوشه‌ای، زنجیره پیوند هیدروژنی مولکول‌ها، افزایش اثرات دوقطبی مولکول‌های آب و تغییر در ضریب شکست نور و اسیدیته آب می‌شود (Heidarpour *et al.*, 2016). تغییرات به‌وجود آمده به‌واسطه عبور آب از یک میدان مغناطیسی به عوامل بسیاری مانند شدت میدان مغناطیسی، جهت میدان، مدت زمان قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی، نرخ جریان محلول، کیفیت و pH آب بستگی دارد (Mostafazadeh-Fard *et al.*, 2011). قرار گرفتن گیاهان در میدان‌های مغناطیسی و یا عبور دادن آب مورد استفاده برای آبیاری آن‌ها از یک میدان مغناطیسی و پاسخ متفاوت گیاهان به شدت‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی می‌تواند راهی جهت افزایش کیفیت آب، کمیت و کیفیت محصول باشد. اثر آب مغناطیسی در افزایش رشد می‌تواند به افزایش رنگدانه‌های فتوسنتزی، ایندول (ایجاد ترکیبات آلی) و سنتز پروتئین‌ها نسبت داده شود (Celik *et al.*, 2008). برخی دیگر گزارش کرده‌اند که آب مغناطیسی ممکن است سبب افزایش نفوذپذیری غشای سلولی دانه، تغییر pH دو طرف غشای سلولی، افزایش فعالیت یون کلسیم و کاهش فعالیت موجودات ذره‌بینی مضر گردد (Biryukov *et al.*, 2005).

مواد و روش‌ها

این آزمایش در سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در مزرعه‌ای واقع در روستای میانگله شهرستان نکا (استان مازندران) با طول جغرافیایی ۵۳ درجه و ۳۲ دقیقه (°E) و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۶۷ دقیقه (°N) انجام شد. مطابق آمار درازمدت ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۱)، متوسط بارندگی سالانه منطقه ۴۷۰ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوا ۱۷/۶ درجه سانتی‌گراد است.

گیاه توت‌فرنگی رقم سیلوا در کرت‌هایی به ابعاد ۳ در ۴ متر با فاصله کشت روی ردیف ۴۰ سانتی‌متر و فاصله ردیف‌های ۴۰ سانتی‌متر کشت شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمار شاهد شامل آبیاری کامل در تمام مراحل رشد گیاه و با آب معمولی (غیرمغناطیسی) بود. تیمارها

شامل نوع آب آبیاری در دو سطح (آب غیرمغناطیسی (W1) و آب مغناطیسی (W2)) و شوری آب در سه سطح (۰/۸۶ دسی‌زیمنس بر متر (S1)، ۲۰ میلی‌مولار کلریدسدیم (S2) و ۴۰ میلی‌مولار کلریدسدیم (S3)) بود. مغناطیس نمودن آب آبیاری با عبور آب از میان یک آهن‌ربای دائمی با شدت میدان مغناطیسی ۰/۳ تسلا ایجاد شد (شکل ۱).

نمک مورد استفاده برای تنش شوری، کلریدسدیم آزمایشگاهی بود. تیمارهای شوری پس از گذشت چهل روز از شروع کشت، شروع و تا پایان کشت اعمال شد. خصوصیات شیمیایی آب چاه (قبل از عبور از میدان مغناطیسی) و آب مغناطیسی‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. عدم برقراری تعادل یونی به این دلیل است که برخی کاتیون‌ها و آنیون‌ها که مقدار قابل توجهی نداشتند، در جدول ذکر نشدند. فقط موارد اصلی که حائز اهمیت بالاتری بودند، قرار گرفتند. این کاتیون‌ها و آنیون‌ها شامل پتاسیم، سولفات و غیره بودند.



شکل ۱- دستگاه ایجاد میدان مغناطیس برای تیمارهای آب مغناطیسی
Figure 1- Magnetic field creation device for magnetic water treatments

جدول ۱- خصوصیات شیمیایی آب مورد استفاده

Table 1- Chemical characteristics of the water used

نوع منبع	EC	pH	Ca	Mg	Na	Cl	HCO ₃
Source type	(dS/m)						meq/l
آب چاه	0.86	7.2	12.6	1.3	4.4	2.4	9.7
Well water							
آب مغناطیسی‌شده	0.61	7.1	10.9	1.1	3.5	1.9	8.7
Magnetized water							

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

Table 2- Physical and chemical properties of farm soil

عمق	ذرات تشکیل‌دهنده خاک (%)			بافت خاک	ρ_b	pH	EC	کربن آلی	نیتروژن کل
(سانتی‌متر)	Soil-forming particles (%)			Soil texture	(g/cm ³)		(dS/m)	OC (%)	TN (%)
Depth (cm)	رس	سیلت	شن						
	Clay	Silt	Sand						
0-30	22.35	37.82	39.83	Loam	1.52	7.3	1.58	16.9	0.19

مواد گیاهی در داخل پاکت قرار گرفتند و در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و پس از ۴۸ ساعت با ترازوی دیجیتال وزن شدند. از کولیس دیجیتال برای اندازه‌گیری طول و قطر میوه‌ها استفاده شد. نتایج ویژگی‌های رنگ و سفتی میوه‌ها مربوط به کارهای بعدی است. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تحلیل آماری قرار گرفتند و مقایسه میانگین‌ها به روش آزمون دانکن انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و شوری آب بر خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی در **جدول ۳** ارائه شده است. با توجه به **جدول ۳**، اثر نوع آب آبیاری بر طول میوه، قطر میوه و تعداد میوه در هر بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. اثر شوری آب بر تعداد میوه در هر بوته در سطح احتمال یک درصد و بر طول میوه و قطر میوه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اثر متقابل نوع آب آبیاری و شوری آب نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

مقایسه میانگین اثرات نوع آب آبیاری و شوری آب بر خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی در **جدول ۴** نشان داده شده است. مقادیر طول میوه، قطر میوه و تعداد میوه در هر بوته در تیمار آب مغناطیسی بیشتر از تیمار آب غیرمغناطیسی شد و این افزایش در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد.

با اعمال میدان مغناطیسی، طول میوه در تیمارهای مغناطیسی در سال اول و دوم کشت به‌ترتیب ۸/۱۹ و ۳۳/۱۱ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایش داشت و این افزایش معنی‌دار بود. قطر میوه در تیمارهای مغناطیسی در سال اول و دوم کشت به‌ترتیب ۶۹/۲۲ و ۴۱/۲۳ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایش داشت و این افزایش معنی‌دار بود (**جدول ۴**). علت بهبود خصوصیات ظاهری میوه توت‌فرنگی در تیمار آب مغناطیسی می‌تواند مربوط به رشد ریشه و هدایت روزنه‌ای باشد که جذب عناصر غذایی را افزایش می‌دهد.

برای تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، قبل از شروع آزمایش و اعمال تیمارها، نمونه‌برداری از خاک مزرعه انجام شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در **جدول ۲** ارائه شده است. لازم به ذکر است که خاک مورد نظر مشکل تغذیه نداشت چون در تحقیقات قبلی اینجانبان، آزمایش‌های لازم انجام و نتایج آن منتشر شد. خاک منطقه هدف زراعی بوده و مدام تحت کشت قرار دارد.

روش آبیاری به کار برده شده، قطره‌ای نواری بود و میزان آب آبیاری و دور آبیاری بر اساس نیاز گیاه انجام شد. برای محاسبه مقدار آب کاربردی از پایش رطوبت خاک استفاده شد. عمق آب آبیاری مبتنی بر اندازه‌گیری رطوبت خاک و محاسبه کمبود رطوبت خاک در تیمار آبیاری کامل در بازه زمانی پنج‌روزه به شرح زیر برآورد شد. میزان رطوبت حجمی خاک در زمان آبیاری از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$\theta_{RI} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) * MAD \quad (1)$$

که در آن θ_{RI} میزان رطوبت حجمی خاک در زمان آبیاری، θ_{FC} میزان رطوبت در حد ظرفیت زراعی، θ_{PWP} میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (اندازه‌گیری رطوبت حجمی با روش مستقیم و بقیه با دستگاه صفحات فشاری) و MAD میزان تخلیه مجاز رطوبتی است. پایش رطوبت به صورت روزانه در هر سه سطح آبیاری انجام گرفت و کمبود رطوبت خاک (SMD) از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$SMD = \sum_{i=1}^n (\theta_{FC} - \theta_{BI}) * D_i \quad (2)$$

که D_i عمق لایه خاک و θ_{BI} رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری (اندازه‌گیری شده با روش مستقیم) می‌باشد. در این پژوهش مقادیر عملکرد و تعداد میوه در هر بوته، طول و قطر میوه، وزن خشک میوه و زیست‌توده اندازه‌گیری شد.

در برخی کارهای زراعی مثل برنج و ذرت، عملکرد دانه همان محصول نهایی است و اینجا منظور میوه یا همان توت‌فرنگی (میوه قرمز رنگ) است که همگان آن را می‌شناسند. زیست‌توده نیز در اینجا منظور بافت سبز گیاهی به غیر از محصول توت‌فرنگی است که بقایای تر و خشک آن مد نظر است. در طول مدت آزمایش، میوه‌های رسیده به‌طور منظم برداشت و وزن تازه آن‌ها یادداشت شد. برای این کار یک متر حاشیه کرت‌ها را حذف نموده و بقیه مساحت هر کرت برای محاسبه عملکرد در نظر گرفته شد (دو متر مربع). وزن میوه‌ها با استفاده از ترازوی حساس دیجیتالی اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک،

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب بر خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی

Table 3- Analysis of variance of the effect of the irrigation water type and different levels of water salinity on the physical characteristics of strawberry fruit

سال کشت Year of Cultivation	منابع تغییر Sources Change	درجه آزادی Degrees of freedom	تعداد میوه در هر بوته Number of fruits per plant	طول میوه Fruit length	قطر میوه Fruit diameter
۱۴۰۰ 2021	بلوک Block	2	3.55 ^{ns}	5.96 ^{ns}	4.03 ^{ns}
	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	1	488.78 ^{**}	939.18 ^{**}	763.55 ^{**}
	شوری آب water salinity	2	847.36 ^{**}	279.47 [*]	238.89 [*]
	نوع آب آبیاری × شوری آب Irrigation water type × water salinity	2	12.96 ^{**}	45.03 ^{**}	26.90 ^{**}
	خطا Error	10	0.37	1.02	0.89
	ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)	-	7.23	10.45	9.87
۱۴۰۱ 2022	بلوک Block	2	2.56 ^{ns}	5.62 ^{ns}	4.98 ^{ns}
	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	1	509.76 ^{**}	970.08 ^{**}	751.30 ^{**}
	شوری آب water salinity	2	815.22 ^{**}	250.12 [*]	211.59 [*]
	نوع آب آبیاری × شوری آب Irrigation water type × water salinity	2	13.50 ^{**}	50.09 ^{**}	31.88 ^{**}
	خطا Error	10	0.25	1.22	1.13
	ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)	-	5.67	12.24	10.89

^{**}، * و ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد، معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و عدم وجود اختلاف معنی‌دار

^{**}، * and ^{ns}: significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$, and non-significant, respectively

(جدول ۴)

در سال اول کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم، طول میوه به ترتیب ۸ و ۱۰/۸ درصد کاهش یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم، طول میوه به ترتیب ۸/۱ و ۱۱/۷۸ درصد کاهش یافت. بین سطوح شوری ۲۰ و ۴۰ میلی مولار اختلاف معنی‌داری در طول میوه وجود نداشت ولی در مقایسه با تیمار شاهد در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم در سال اول کشت، قطر میوه به ترتیب ۵/۴۹ و ۹/۰۱ درصد کاهش یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم، قطر میوه به ترتیب ۵/۴۱ و ۹/۴ درصد کاهش یافت. بین سطوح شوری ۲۰ و ۴۰ میلی مولار اختلاف معنی‌داری در قطر میوه وجود نداشت ولی در مقایسه با تیمار شاهد در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۴). نتایج این پژوهش با یافته‌های لی و همکاران (Li et al., 2002) مطابقت دارد. آن‌ها نشان دادند که تنش شوری در توت‌فرنگی باعث تأخیر در توسعه اندام‌های زایشی آن

آب مغناطیسی با افزایش نفوذ آب به غشای سلولی باعث جذب بیشتر آب و عناصر غذایی در سلول‌های ریشه می‌شود (Algozari and Yao, 2006). حبیبی و همکاران (Habiby et al., 2019) در پژوهشی نشان دادند که آب مغناطیسی باعث افزایش معنی‌دار ارتفاع گیاه ذرت نسبت به تیمار شاهد شده و این افزایش به واسطه سهولت جذب آب توسط گیاه و در نتیجه افزایش رشد رویشی می‌باشد.

مقادیر طول میوه، قطر میوه و تعداد میوه در هر بوته در سطوح مختلف شوری آب دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بود. حداکثر طول میوه، قطر میوه و تعداد میوه در هر بوته به ترتیب برابر ۴۱/۸۵، ۳۳/۶ میلی‌متر و ۱۸/۹۸ میلی‌متر و در تیمار با سطح شوری صفر حاصل شد. در سال اول کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم، تعداد میوه در هر بوته به ترتیب ۳۰/۲۷ و ۵۰/۰۵ درصد کاهش یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلرید سدیم، تعداد میوه در هر بوته به ترتیب ۲۹/۱۳ و ۵۶/۶۹ درصد کاهش یافت و این اختلاف در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود

و در نتیجه منجر به تولید گل‌ها و میوه‌های کمتری شد. کاهش رشد در شرایط تنش شوری نیز به دلیل وجود انواع تنش‌های اسمزی یا یونی است (Demkura et al., 2010). همچنین گزارش شده است که رشد اندام‌های زایشی توت‌فرنگی در اثر شوری کاهش می‌یابد (Garriga et al., 2015). افزودن شوری به محلول غذایی باعث تأثیر منفی بر رشد، عملکرد و توازن عناصر غذایی توت‌فرنگی شده که به دلیل اثر سوء سدیم و کلر بر رشد گیاه و کاهش پتانسیل اسمزی (افزایش هدایت الکتریکی) محلول غذایی در محیط کشت و کاهش جذب آب می‌باشد. تحت شرایط تنش شوری، تنش اسمزی باعث کاهش فتوسنتز و کاهش تولید کربوهیدرات و همچنین سبب توقف یا کند شدن انتقال جریان آب به سمت میوه‌ها شده و در نهایت اندازه میوه‌ها کاهش می‌یابد (Kanayama and Kochetov, 2015).

بر کلار و بورلی (Berkelaar and Beverley, 2000) گزارش

کردند که تحت شرایط تنش شوری، به دلیل وجود یون‌های سدیم و کلر و کند شدن سنتز دیواره سلولی، حجم ریشه کاهش یافته و کاهش طول و حجم ریشه در بوته توت‌فرنگی در نتیجه کاهش رشد اندام‌های هوایی و کاهش فتوسنتز در اثر تنش شوری است. افزایش غلظت نمک در محیط ریشه باعث کاهش پتانسیل آب در ریشه و به دنبال آن کاهش پتانسیل آب در برگ گیاه می‌شود. به واسطه چنین مکانیسمی آب کمتری توسط گیاه جذب شده و در نتیجه جریان آب به سمت میوه نیز کاهش می‌یابد. با توجه به این که بیش از ۹۰ درصد وزن میوه را آب تشکیل می‌دهد، بنابراین وزن میوه تابعی از مقدار آب موجود در آن است. در نتیجه با محدود شدن جریان آب به سمت میوه، اندازه و وزن آن کاهش می‌یابد (Hohjo et al., 2001). پاسخ فوری به تنش شوری، کاهش در میزان سطح برگ است که با افزایش غلظت شوری، گسترش سطح برگ متوقف می‌شود (Wang and Nil, 2000).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب بر خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی

Table 4- Comparison of the average effect of the irrigation water type and different levels of water salinity on the physical characteristics of strawberry fruit

سال کشت Year of Cultivation	عوامل Factor	تعداد میوه در هر بوته Number of fruits per plant	طول میوه Fruit length (mm)	قطر میوه Fruit diameter (mm)	
۱۴۰۰ 2021	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	مغناطیسی Magnetic	15.30 a	40.67 a	33.81 a
		غیرمغناطیسی Non-magnetic	12.47 b	37.59 b	29.53 b
	شوری آب (میلی مولار) water salinity (mill molar)	صفر Zero	18.96 a	41.75 a	33.28 a
		۲۰ 20	13.22 b	38.41 b	31.45 b
		۴۰ 40	9.47 c	37.24 b	30.28 b
۱۴۰۱ 2022	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	مغناطیسی Magnetic	14.97 a	41.17 a	35.12 a
		غیرمغناطیسی Non-magnetic	12.13 b	36.98 b	30.86 b
	شوری آب (میلی مولار) water salinity (mill molar)	صفر Zero	18.98 a	41.85 a	33.60 a
		۲۰ 20	13.45 b	38.46 b	31.78 b
		۴۰ 40	8.22 c	36.92 b	30.44 b

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

Averages with the same letters in each column are not significantly different based on the LSD test at the five percent probability level.

بر اجزای عملکرد توت‌فرنگی در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به این جدول، اثر نوع آب آبیاری و شوری آب بر وزن میوه، زیست‌توده و عملکرد بوته در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد؛ اثر متقابل نوع آب آبیاری و شوری آب نیز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد.

کاهش در میزان فعالیت سلول‌های مریستمی و جلوگیری از تولید شدن سلول‌ها نتیجه تغییر در روابط آبی گیاهان تحت تنش شوری است که سبب کاهش شاخص‌های رشدی گیاهان می‌شود (Idrees et al., 2011). نتایج تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و شوری آب

مقایسه میانگین اثرات نوع آب آبیاری و شوری آب بر وزن میوه، زیست توده و عملکرد توت فرنگی در جدول ۶ نشان داده شده است. مقادیر وزن میوه، زیست توده و عملکرد بوته در تیمار آب مغناطیسی بیشتر از تیمار آب غیرمغناطیسی شد و این افزایش در سطح احتمال پنج درصد معنی دار شد. با اعمال میدان مغناطیسی، وزن میوه در تیمارهای مغناطیسی در سال اول و دوم کشت به ترتیب ۲۹/۵۶ و ۲۵/۶۵ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی دار داشت. مقدار زیست توده در تیمارهای مغناطیسی در سال اول و دوم کشت به ترتیب ۲۵/۵۲ و ۲۸/۶۵ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی دار داشت. مقدار عملکرد بوته در تیمارهای مغناطیسی در سال اول و دوم کشت به ترتیب ۳۱/۴۷ و ۲۵/۲۶ درصد نسبت به تیمارهای غیرمغناطیسی افزایشی معنی دار داشت (جدول ۶). آب مغناطیسی با افزایش جذب آب و مواد غذایی محلول توسط ریشه، باعث افزایش تولید ماده‌ی غذایی و در نهایت عملکرد گیاه می‌شود (Nikbakht and Talei, 2019). با عبور آب از

میدان مغناطیسی، پیوندهای هیدروژنی و واندروالس بین مولکول‌های آب شکسته شده و در نتیجه کشش سطحی آب کاهش و حلالیت آب افزایش می‌یابد و در نتیجه املاح معدنی مورد نیاز گیاه در آب به خوبی حل شده و در نهایت افزایش کمیت محصول را سبب می‌شود (Khoshravesht and Kiani, 2015). یداللهی و همکاران (Yadollahi et al., 2022) گزارش کردند که آبیاری با آب مغناطیسی به طور متوسط باعث افزایش ۸/۶ درصدی عملکرد دانه و ۸/۷ درصدی بهره‌وری مصرف آب نخودفرنگی نسبت به آب غیرمغناطیسی شد. نیکبخت و همکاران (Nikbakht et al., 2014) نشان دادند که سطح برگ، وزن تر و بهره‌وری مصرف آب ذرت در تیمار آب مغناطیسی به ترتیب ۹/۵، ۸/۳ و ۹ درصد افزایش یافت. خوش‌روش و همکاران (Khoshravesht et al., 2021) نشان دادند که آب مغناطیسی با افزایش قدرت حلالیت آب، باعث افزایش فتوسنتز و رشد بذرهای آبیاری شده با آب مغناطیسی شده و جذب مواد غذایی از خاک نیز بیشتر خواهد شد.

جدول ۵- تجزیه واریانس اثر نوع آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب بر اجزای عملکرد توت فرنگی

Table 5- Analysis of variance of the effect of the irrigation water type and different levels of water salinity on the yield components of strawberry

سال کشت Year of Cultivation	منابع تغییر Sources Change	درجه آزادی Degrees of freedom	وزن میوه Fruit weight	زیست توده Biomass	عملکرد هر بوته Yield of each plant
۱۴۰۰ 2021	بلوک Block	2	4.93 ^{ns}	5.37 ^{ns}	3.37 ^{ns}
	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	1	437.20 ^{**}	2543.47 ^{**}	1552.08 ^{**}
	شوری آب water salinity	2	698.14 ^{**}	3620.11 ^{**}	2165.09 ^{**}
	نوع آب آبیاری × شوری آب Irrigation water type × water salinity	2	11.19 ^{**}	175.66 ^{**}	101.30 ^{**}
	خطا Error	10	0.19	2.08	1.30
	ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)	-	5.86	14.19	12.56
۱۴۰۱ 2022	بلوک Block	2	6.52 ^{ns}	7.12 ^{ns}	5.96 ^{ns}
	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	1	479.81 ^{**}	2680.08 ^{**}	1674.46 ^{**}
	شوری آب water salinity	2	759.80 ^{**}	3802.28 ^{**}	2306.64 ^{**}
	نوع آب آبیاری × شوری آب Irrigation water type × water salinity	2	10.45 ^{**}	201.77 ^{**}	119.62 ^{**}
	خطا Error	10	0.16	2.30	1.17
	ضریب تغییرات Coefficient of variation (CV)	-	5.52	14.67	11.32

^{**}، * و ^{ns} به ترتیب معنی داری در سطح احتمال یک درصد، معنی داری در سطح احتمال پنج درصد و عدم وجود اختلاف معنی دار

^{**}، * and ^{ns}: significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$, and non-significant, respectively

منافذ و خلل و فرج خاک نفوذ کرده و به اعماق پایین خاک منتقل نشدند.

مقادیر وزن میوه، زیست‌توده و عملکرد بوته در سطوح مختلف شوری آب دارای اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد بود (جدول ۶). حداکثر وزن میوه، زیست‌توده و عملکرد بوته به‌ترتیب برابر ۱۷/۵۷ گرم، ۲۵۳/۴۱ گرم و ۱۷۸/۵۴ گرم و در تیمار با سطح شوری صفر مشاهده شد. در سال اول کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار کلریدسدیم، وزن میوه به‌ترتیب ۱۱/۵۱ و ۲۳/۰۳ درصد کاهش یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار کلریدسدیم، وزن میوه به‌ترتیب ۱۱/۲۷ و ۲۳/۶۲ درصد کاهش یافت.

آب مغناطیسی با افزایش رطوبت در خاک و کاهش شوری پروفیل خاک باعث افزایش کمیت محصول خواهد شد. مصطفی‌زاده فرد و همکاران (Mostafazadeh-Fard et al., 2012) اثر آب مغناطیسی بر رطوبت عمق‌های مختلف خاک در آبیاری قطره‌ای را بررسی و گزارش نمودند که مقدار رطوبت خاک در تیمار آب مغناطیسی به‌طور متوسط ۷/۵ درصد بیشتر از تیمار آب غیرمغناطیسی بود. در شرایط آب مغناطیسی، مولکول‌های آب تحت تأثیر پیوندهای هیدروژنی و نیروهای واندروالس قرار گرفته و از آنجایی که در واکنش با یون‌ها بودند، آزاد شدند و آب را منسجم‌تر کردند. بنابراین مولکول‌های آب در شرایط مغناطیسی به راحتی به ذرات خاک چسبیده و به اعماق پایین خاک حرکت نکردند. این یعنی مولکول‌های آب مغناطیسی به راحتی به داخل

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر نوع آب آبیاری و سطوح مختلف شوری آب بر خصوصیات فیزیکی میوه توت‌فرنگی
Table 6- Comparison of the average effect of the irrigation water type and different levels of water salinity on the yield components of strawberry

سال کشت Year of cultivation	عوامل Factor	وزن میوه Fruit weight (gr)	زیست‌توده Biomass (gr)	عملکرد بوته Yield of each plant (gr)
۱۴۰۰ 2021	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	مغناطیسی Magnetic	17.81 a	219.08 a
		غیرمغناطیسی Non-magnetic	13.07 b	174.53 b
	شوری آب Water salinity (mill molar)	صفر Zero	17.45 a	253.41 a
		۲۰ 20	15.44 ab	193.72 b
		۴۰ 40	13.43 b	143.28 c
		۴۰ 40	13.43 b	143.28 c
	نوع آب آبیاری Type of irrigation water	مغناطیسی Magnetic	172.29 a	214.71 a
		غیرمغناطیسی Non-magnetic	13.76 b	166.89 b
۱۴۰۱ 2022	شوری آب Water salinity (mill molar)	صفر Zero	17.57 a	247.30 a
		۲۰ 20	15.59 ab	180.28 b
		۴۰ 40	13.42 b	144.82 c
		۴۰ 40	13.42 b	144.82 c

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

Averages with the same letters in each column are not significantly different based on the LSD test at the five percent probability level.

یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار کلریدسدیم، مقدار زیست‌توده به‌ترتیب ۲۷/۱ و ۴۱/۴۴ درصد کاهش یافت و اختلاف بین تمامی سطوح شوری در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶).

اختلاف وزن میوه بین دو سطح شوری صفر و ۲۰ میلی‌مولار معنی‌دار نشد ولی بین صفر و ۴۰ میلی‌مولار در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۶). مقدار زیست‌توده در سال اول کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار کلریدسدیم، به‌ترتیب ۲۳/۵۵ و ۴۳/۴۶ درصد کاهش

باز روی سطح برگ در شرایط تنش شوری کمتر از شرایط بدون تنش بود. بیشترین وزن خشک زیست توده در تیمار با سطح شوری صفر مشاهده شد. همچنین تیمار شوری، سبب کاهش معنی‌دار عملکرد میوه توت‌فرنگی در مقایسه با شرایط بدون تنش شد.

احمد و وانی (Ahmad and Wani, 2013) گزارش کردند که تحت شرایط تنش شوری، کاهش رشد اندام‌های هوایی به دلیل افزایش فعالیت هورمون آبسیدیک اسید یا کاهش تولید و انتقال سیتوکینین از ریشه به ساقه است که میزان ماده خشک کل گیاه را در اثر کاربرد آن کاهش می‌دهد. کلریسدیم موجود در محیط کشت، رشد رویشی و زایشی گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موجب کاهش وزن خشک آن‌ها می‌شود (Kaya et al., 2001). سعید و همکاران (Saied et al., 2005) بیان کردند که با ایجاد تنش شوری، به دلیل کاهش سطح برگ، محتوای هیدرات کربن برگ کاهش یافته و در نتیجه فتوسنتز نیز محدود می‌شود که می‌تواند عاملی برای کاهش عملکرد در گیاه شود.

نتیجه‌گیری

در بخش کشاورزی، محصولات حساس به شوری مانند توت‌فرنگی نیازمند مدیریت دقیق می‌باشد. بنابراین استفاده از فن‌آوری آب مغناطیسی در مقابله با تنش شوری می‌تواند به عنوان یکی از راه‌حل‌های این مشکل بررسی شود. در این پژوهش، اثر آب مغناطیسی بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه توت‌فرنگی تحت شرایط شوری آب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش نشان داد که استفاده از فن‌آوری آب مغناطیسی باعث افزایش معنی‌دار عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی نسبت به تیمار شاهد شد. همچنین شوری آب آبیاری نیز بر عملکرد و اجزای عملکرد توت‌فرنگی اثر معنی‌دار داشت و بیشترین عملکرد در تیمار بدون تنش شوری با استفاده از آب مغناطیسی حاصل شد. با استفاده از آب مغناطیسی می‌توان به عملکرد بیشتری دست یافت و اثرات ناشی از تنش شوری را تا حدی کاهش داد. بیشترین اثر منفی شوری بر تعداد میوه در هر بوته و کمترین اثر آن بر قطر میوه بود.

مقدار عملکرد بوته در سال اول کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلریسدیم، به ترتیب ۲۳/۱ و ۴۵/۲ درصد کاهش یافت. در سال دوم کشت با افزایش ۲۰ و ۴۰ میلی مولار کلریسدیم، مقدار عملکرد بوته به ترتیب ۲۲/۸ و ۴۶/۲ درصد کاهش یافت و این اختلاف بین تمامی سطوح شوری معنی‌دار بود (جدول ۶). نتایج عبدالطیف و چاوکسینگ (Abdwl Latif and Chaoping, 2011) با نتایج به دست آمده از این پژوهش مطابقت دارد. افزایش شوری در محلول غذایی با اثر بر روی پتانسیل اسمزی آب باعث محدود شدن جذب آب توسط گیاه می‌شود. اعمال EC بالا در محلول غذایی با اثرگذاری در کاهش جذب آب که در نتیجه کاهش پتانسیل اسمزی محلول غذایی است، باعث کاهش عملکرد و افزایش کیفیت می‌شود. کاهش وزن خشک اندام‌های هوایی و زیرزمینی در توت‌فرنگی رقم سیلوا تحت تنش شوری گزارش شده است. تغییر در تعداد، اندازه و باز و بسته شدن روزنه‌ها نیز یکی از آثار میکروسکوپی حاصل از وقوع تنش شوری در برگ گیاهان می‌باشد (Khayyat et al., 2009).

دولت‌شاه و همکاران (Dolatshah et al., 2015) اثر تنش شوری بر عملکرد و برخی ویژگی‌های فیزیکی و بیوشیمیایی توت‌فرنگی را بررسی کردند و نشان دادند که مقدار عملکرد، وزن تک میوه و تعداد میوه در تیمارهای ۷/۵ و ۱۵ میلی مولار کلریسدیم نسبت به تیمار شاهد تفاوت معنی‌داری نداشت. میزان کاهش عملکرد میوه، وزن تر تک میوه و تعداد میوه در تیمار شاهد نسبت به تیمار ۲۵ میلی مولار نمک طعام به ترتیب ۴۸/۹، ۲۵/۲ و ۳۲ درصد بود. آن‌ها بیان کردند که کاهش عملکرد توت‌فرنگی بیش از آن که ناشی از کاهش طول میوه باشد مربوط به کاهش قطر میوه، وزن میوه و تعداد میوه در بوته می‌باشد. مظلومی و همکاران (Mazloomi et al., 2011) بررسی کردند که با افزایش شوری آب، مقدار عملکرد به مقدار بیشتری کاهش یافت. آن‌ها نشان دادند که بیشترین کاهش عملکرد با کاربرد شوری، در وزن خشک اندام هوایی و کمترین کاهش در وزن خشک ریشه مشاهده شد. عثمان‌پور و همکاران (Osmanpour et al., 2021) نشان دادند که شاخص‌های رشدی، عملکرد و برخی ویژگی‌های میوه توت‌فرنگی در اثر تنش شوری کاهش می‌یابد. آن‌ها نشان دادند که تعداد روزنه‌های

منابع

1. Abdwl Latif, A.A., & Chaoping, H. (2011). Effect of Arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and yield of tomato grown under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 127, 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.020>
2. Ahmad, P., & Wani, M.R. (Eds.). (2013). *Physiological mechanisms and adaptation strategies in plants under changing environment*. Springer Science and Business Media, Vol. 2. Springer New York Heidelberg Dordrecht London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8591-9>
3. Ahmadi, K., Ebadzadeh, H. R., Hatami, F., Mohammadnia Afrozi, Sh., Abbas Taleghani, R., Yari, Sh., & Kalantari, M. (2021). *Agricultural statistics for the year 2019-2020*. Publications of the Technology and Information and Communication Center of the Ministry of Jihad Agriculture, Volume 3: 164 pp. (In Persian with English abstract)
4. Algozari, H., & Yao, A. (2006). *Effect of the magnetizing of water and fertilizers on some chemical parameters of*

- soil and growth of maize. M.Sc. Thesis. University of Baghdad, Baghdad, Iraq.
5. Berkelaar, E., & Beverley, H. (2000). The relationship between morphology and cadmium accumulation in seedling of two durum wheat cultivars. *Canadian Journal of Botany*, 78, 381–387. <https://doi.org/abs/10.1139/b00-015>
6. Biryukov, A.S., Gavrikov, V.F., Nikiforov, L.O., & Shcheglov, V.A. (2005). New physical methods of disinfection of water. *Journal of Russian Laser Research* 26(1): 1913-1925. <https://doi.org/10.1007/s10946-005-0002-8>
7. Rashid, B., Husnain, T., & Riazuddin, S. (2014). Genomic approaches and abiotic stress tolerance in plants. In *Emerging technologies and management of crop stress tolerance* (pp. 1-37). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800876-8.00001-1>
8. Celik, O., Atak, C., & Rzakulieva, A. (2008). Stimulation of rapid regeneration by a magnetic field in paulownia node cultures. *Journal of Central European Agriculture*, 9(2), 297-303. <https://doi.org/10.5513/jcea.v9i2.670>
9. Demkura, P.V., Abdala, G., Baldwin, I.T., & Ballare, C.L. (2010). Jasmonate dependent and independent pathways mediate specific effects of solar ultraviolet B radiation on leaf phenolics and antiherbivore defense. *Plant Physiology*, 152, 1084–1095. <https://doi.org/10.1104/pp.109.148999>
10. Dolatshah, M., Rezaei Nejad, A., & Gholami, M. (2015). The effect of salinity stress on fruit yield and some physical and biochemical characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) cv. "Camarosa". *Journal of Plant Production Technology* 6(2): 127-138. (In Persian with English abstract)
11. Dube, T., Shekede, M.D., & Massari, C. (2023). Remote sensing for water resources and environmental management. *Remote Sensing*, 15(1), 18. <https://doi.org/10.3390/rs15010018>
12. Emadi, A.R., Nourani Azad, H., & Borzoo, A. (2009). Response of some physiological Traits to salinity stress in sugar beet (*Beta vulgaris* L.), *Journal of Plant and Ecology*, 5(19), 17-25. (In Persian with English abstract)
13. Garriga, M., Munoz, C.A., Caligari, P.D., & Retamales, J.B. (2015). Effect of salt stress on genotypes of commercial (*Fragaria x ananassa*) and Chilean strawberry (*F. chiloensis*). *Scientia Horticulturae*, 195, 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.036>
14. Gulen, H.E., Turhan, E., & Eris, A. (2006). Changes in peroxidase activities and soluble proteins in strawberry varieties under salt stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 28(2), 109-116. <https://doi.org/10.1007/s11738-006-0037-7>
15. Habiby, H., Movahedi, A., Khoshravesh, M., & Saberi, A. (2019). The effect of magnetic water on the yield of corn and the adsorption of potassium, zinc and iron. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization (Scientific Journal of Agriculture)*, 42(2), 131-142. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/agen.2019.27239.1454>
16. Hassanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2013). *Plant responses to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt stress damages*. In: Ahmad P et al., (eds) Ecophysiology and responses of plants under salt stress. Springer. Science, pp 25-87. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4747-4_2
17. Heidarpour, M., Khoshravesh, M., & Moshaveri, Y. (2016). Effect of magnetized saline water on soil and water amendment in trickle irrigation. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(2), 179-193. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3062>
18. Hohjo, M., Ganda, M., Maruo, T., Shinohara, Y., & Ito, T. (2001). Effect of NaCl application on growth, yield and fruit quality in NFT-tomato plants. *Acta Horticulturae*, 548, 469-475. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.55>
19. Hozayn, M., Ahmed, A.A., El-Saady, A.A., & Abd-Elmonem, A.A. (2019). Enhancement in germination, seedling attributes and yields of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under salinity stress using static magnetic field treatments. *Eurasian Journal of Biosciences*, 13(1), 369-378.
20. Idrees, M., Naeem, M., Khan, M.N., Aftab, T., & Khan, M.M.A. (2012). Alleviation of salt stress in lemongrass by salicylic acid. *Protoplasma*, 249, 709-720. <https://doi.org/10.1007/s00709-011-0314-1>
21. Jouyban, Z. (2012). The effects of salt stress on plant growth. *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences* 2(1): 7-10.
22. Kanayama, Y., & Kochetov, A. (2015). *Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants*. Springer, Tokyo. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55251-2>
23. Karlidag, H., Yildirim, E., & Turan, M. (2011). Role of 24-epibrassinolide in mitigating the adverse effects of salt stress on stomatal conductance, membrane permeability, and leaf water content, ionic composition in salt stressed strawberry (*Fragaria x ananassa*). *Scientia Horticulture*, 130, 133-140. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.06.025>
24. Kaya, C., Higgs, D., & Kirnak, H. (2001). The effect of high salinity (NaCl) and supplementary phosphorus and potassium on physiology and nutrition developmentary of spinach. *Bulgar. Journal of Plant Physiology*, 27, 47–59.
25. Keutgen, A., & Pawelzik, E. (2008a). Contribution of amino acids to strawberry fruit quality and their relevance as stress indicators under NaCl salinity. *Food Chemistry*, 111, 642-647. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.032>
26. Keutgen, A., & Pawelzik, E. (2008b). Impact of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. *Environmental and Experimental Botany*, 95, 325-332. <https://doi.org/10.1016/>

- j.envexpbot.2008.08.002
27. Khayyat, M., Tafazoli, E., Eshghi, M., Rahemi, M., & Rajaei, S. (2007). Salinity supplementary calcium and potassium effects on fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.). *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science* 2(5): 539-544.
28. Khayyat, M., Vazifeshenas, M. R., Rajaei, S., & Jamalian, S. (2009). Potassium effect on ion leakage, water usage, fruit yield and biomass production by strawberry plants grown under NaCl stress. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 17(1), 79-88.
29. Khoshravesh, M., & Kiani, A.R. (2015). The effect of magnetized saline water on infiltration and electrical conductivity in different soil textures. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 9(4), 646-654. (In Persian with English abstract)
30. Khoshravesh, M., Erfanian, F., & Pourgholam-Amiji, M. (2021). The effect of irrigation with treated magnetic effluent on yield and yield components of maize. *Water Management in Agriculture*, 8(1), 115-128. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.2021.8.1.10.8>
31. Khoshravesh, M., Mirzaei, S.M.J., Shirazi, P., & Norooz Valashedi, R. (2018). Evaluation of dripper clogging using magnetic water in drip irrigation. *Applied Water Science*, 8(3), 1177-1191. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0725-7>
32. Li, H., Lascano, R.J., Booker, J., Wilson, L.T., Bronson, K.F., & Segarra, E. (2002). State-space description of field heterogeneity: Water and nitrogen use in cotton. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2), 585-595. <http://doi.org/10.2136/sssaj2002.5850>
33. Loulaei, A., Samavat, S., & Habibi, Sh. (2013). Investigating the interaction effect of salinity and calcium chloride on quality traits and yield of Gamrosa strawberry. *Journal of Iranian Plant Ecophysiological Research*, 8(29), 38-46. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1392.8.29.4.2>
34. Maas, E.V., & Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance—current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), 115-134. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137>
35. Mahmoudi, G., Ghanbari, A., Rastgoo, M., Gholi Zade, M., & Tahmasebi, I. (2016). Evaluating the magnetic field effects on growth and yield of chickpea (*Cicer arietinum*) under Mashhad climatic conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 14(2), 380-391. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20081472.1395.14.2.14.3>
36. Mazloomi, F., Ronaghi, A., & Karimian, N. (2011). Influence of salinity and supplementary calcium on vegetative growth, fruit yield and concentration of some nutrients in hydroponically-grown strawberry. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 2(2), 51-63. (In Persian with English abstract)
37. Mirfattahi, Z., & Eshghi, S. (2023). Acetic acid alleviates salinity damage and improves fruit yield in strawberry by mediating hormones and antioxidant activity. *Erwerbs-Obstbau* 1-10. <https://doi.org/10.1007/s10341-023-00840-9>
38. Mostafazadeh-Fard, B., Khoshravesh, M., Mousavi, S.F., & Kiani, A.R. (2011). *Effects of magnetized water on soil sulphate ions in trickle irrigation*. 2nd International Conference on Environmental Engineering and Application (ICEEA 2011). 19-21 August, Shanghai, China.
39. Mostafazadeh-Fard, B., Khoshravesh, M., Mousavi, S.F., & Kiani, A.R. (2012). Effects of magnetized water on soil chemical components underneath trickle irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(12), 1075-1081. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000513](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000513)
40. Muhammad Aslam, M., Waseem, M., Jakada, B.H., Okal, E.J., Lei, Z., Saqib, H.S.A., & Zhang, Q. (2022). Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(3), 1084. <https://doi.org/10.3390/ijms23031084>
41. Neocleous, D., & Vasilakakis, M. (2007). Effect of NaCl stress on red raspberry (*Rubus idoeus* L. Autumn Bliss). *Scientia Horticulture*, 112, 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2006.12.025>
42. Nikbakht, J., & Talei, A. (2019). Effect of magnetized water on hydraulic properties of tape irrigation system and yield and water use efficiency in maize. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 8(4), 21-36. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1398.8.4.2.9>
43. Nikbakht, J., Khandehrouyan, M., Tavakoli, A., & Tahheri, M. (2014). The effect of magnetic water deficit on yield and water use efficiency of corn. *Journal of Water Research in Agriculture*, 24(4), 551-563.
44. Osmanpour, S., Mozafari, A., & Ghaderi, N. (2021). Effect of silica nanoparticles and jasmonic acid on some physiological characteristics of strawberry under salinity stress. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 11(4), 51-64. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org/10.47176/jspi.11.4.19721>
45. Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., Divband Hafshejani, L., & Ghadami Firoozabadi, A. (2022). The effect of irrigation with treated magnetic effluent on water productivity of maize. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(1), 243-253. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.1.19.6>
46. Ramesh, A., & Ostad-Ali-Askari, K. (2023). Effects of magnetized municipal effluent on some physical properties of soil in furrow irrigation. *Applied Water Science* 13(1): 26. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01811-3>
47. Rastegari, S., & Sadeghi-Lari, A. (2015). Effect of magnetized water on seed germination and early growth

- characteristics of tomato. *Journal of Water Research in Agriculture*, 29(3), 409-417. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22287140.1394.29.3.10.2>
48. Saied, A.S., Keutgen, A.J., & Noga, G. (2005). The influence of NaCl salinity on growth, yield and fruit quality of strawberry cvs. 'Elsanta' and 'Korona'. *Scientia Horticulturae*, 103(3), 289-303. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.06.015>
49. Seyedlor Fatemi, L., Tabatabaei, J., & Fallahi, E. (2009). The effect of silicon on the growth and yield of strawberry grown under saline conditions. *Journal of Horticultural Science*, 23(1), 88-95. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084730.1388.23.1.10.6>
50. Shokrani, F., Pirzad, A., Zardashti, M., & Darvishi, R. (2011). *The effect of irrigation interruption and different amounts of nitroxin on yield and yield components of marigolds*. National conference on climate change and its impact on agriculture and environment, Urmia, West Azerbaijan. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.5897/AJB11.2952>
51. Singh, S.K., Sharma, H.C., Goswami, A.M., Datta, S.P., & Singh, S.P. (2000). In vitro growth and leaf composition of grapevine cultivars as affected by sodium chloride. *Biologia Plantarum*, 43(2), 283-286. <https://doi.org/10.1023/A:1002720714781>
52. Turhan, E., & Eris, A. (2005). Effects of sodium chloride applications and different growth media on ionic composition in strawberry plant. *Journal of Plant Nutrition*, 27(9), 1653-1665. <https://doi.org/10.1081/PLN-200026009>
53. Wang, Y., & Nil, N. (2000). Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 75, 623-627. <https://doi.org/10.1080/14620316.2000.11511297>
54. Yadollahi, A.H., Khoshraresh, M., & Gholami Sefidkouhi, M.A. (2022). Effect of regulated deficit irrigation with magnetized water on quantitative, qualitative properties and water productivity of green pea. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(4), 373-389. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.356340.897>
55. Yoon, J.Y., Hodayun, M., Lee, S., & Lee, I. (2009). Methyl jasmonate alleviated salinity stress in soybean. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 12(2), 63-68. <https://doi.org/10.1007/s12892-009-0060-5>
56. Yusefi, M., Tabatabaei, S., Hajilu, J., & Mahna, N. (2011). The effect of partial root salinization on the yield and fruit quality in strawberry. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 21(1), 135-144. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764310.1390.21.1.11.9>
57. Zahedi, S.M., Hosseini, M.S., Abadía, J., & Marjani, M. (2020). Melatonin foliar sprays elicit salinity stress tolerance and enhance fruit yield and quality in strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 149, 313-323. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.02.021>
58. Zandi, M., Aboutalebi Jahromi, A., Behroznam, B., & Zakerin, A. (2022). Effectiveness of acid gibberellic and magnetic field on shelf life and post-harvest life of strawberry cv. Selva under temperature stress conditions. *Journal of Horticultural Science* (In Publishing) (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2022.74406.1121>



Spatial Monitoring of Wind Erosion and Some Heavy Metals in Suspended Load of Tabas City

H. Emami^{1*}, M. Memarzadeh²

Received: 19-09-2022

Revised: 28-02-2023

Accepted: 06-03-2023

Available Online: 06-03-2023

How to cite this article:

Emami, H., & Memarzadeh, M. (2023). Spatial monitoring of wind erosion and some heavy metals in suspended load of Tabas city. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 219-235. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.78876.1204>

Introduction

Wind Erosion is the natural process of transportation and deposition of soil by wind. It is a common phenomenon occurred mostly in dry, sandy soils or anywhere the soil is loose, dry, and finely granulated. Heavy metals are found in the environment and soils may become contaminated by accumulation of heavy metals through emissions from the rapidly expanding industrial areas, mine tailings, disposal of high metal wastes, leaded gasoline and paints, land application of fertilizers, animal manures, sewage sludge, pesticides, wastewater irrigation, coal combustion residues, spillage of petrochemicals, and atmospheric deposition. Soils are the major sink for heavy metals released into the environment by the aforementioned anthropogenic activities and their total concentration in soils persists for a long time after their introduction. The heavy metal contamination of soil and its potential risks to humans and the ecosystem is a significant concern. Windy deposition, which is the process of heavy metals being transported by erosive winds and deposited onto soil, is one of the sources of heavy metal contamination. Due to the geographical situation and climatic conditions such as arid soil, erosive winds are blown in periods of year in Tabas. Since wind erosion is severe in this area, huge amounts of wind deposition accompanied with erosive winds entered into this town. Heavy metals through the windy deposition are suspended, translated and finally deposited in residential regions, which can create some problems for human health. Therefore, the knowledge of wind erosion and the human risk of these deposits is essential. The aim of this research was to determine the rate of wind erosion and the concentration of some heavy metals in these deposits.

Materials and Methods

For this purpose, the rate of suspended load was measured monthly from February 2021 to January 2022. Based on previous information from the erosive winds and storms, suspended depositions were gathered in some directions (north, northwest, northeast, west and southwest) of the Tabas entrance. In addition, the suspended load in the city center of Tabas was also measured. The cumulative load of suspended depositions was measured monthly and the concentration of some heavy metals such as manganese (Mn), iron (Fe), copper (Cu), and zinc (Zn) were measured in these suspended particles. Soil digestion was made by Aqua regia (nitric acid and chloridric acid; ratio of 3:1), and after then atomic absorption was used to measure the total concentration of above heavy metals.

Results and Discussion

The results indicate that Tabas experiences significant wind deposition of suspended loads, with the highest rates entering from the northeast direction and the lowest rates from the southwest direction. This pattern aligns with the wind rose of Tabas, which illustrates the prevailing wind directions in the region. Additionally, substantial suspended loads are observed in the northwest and north directions. The variations in suspended load discharge reveal that the maximum discharge occurs in the city center of Tabas during the months of June and July 2021. This corresponds to the arid climate conditions of these months, where plant growth is limited, soil cohesion is low, and loose soil particles on the surface are susceptible to wind forces. As a result, these loose particles are

1 and 2- Professor and Former M.Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: hemami@um.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.78876.1204](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.78876.1204)

easily detached by the wind, contributing to the high levels of suspended load. Regarding the spatial variation of heavy metals in suspended particles, the cumulative concentrations of Mn, Fe, Cu, and Zn are found to be higher in the west, northwest, north, and west directions, respectively. This suggests that these heavy metals are transported and deposited in specific areas within Tabas due to the prevailing wind patterns. In terms of temporal variation, the highest concentrations of Mn and Fe in suspended particles are observed in April 2021, predominantly in the northeast and west directions, respectively. On the other hand, the highest concentrations of Cu and Zn are found in May 2021, with the southwest and northeast directions being the primary deposition areas for each metal, respectively. These findings highlight the spatial and temporal dynamics of suspended load and heavy metal deposition in Tabas, emphasizing the influence of wind patterns and climatic conditions on these processes. Understanding these variations is crucial for assessing the potential risks associated with heavy metal contamination and implementing appropriate mitigation measures in the region.

Conclusion

The results of this research showed that most contents of the suspended load are entered from the northeast direction into Tabas. In addition, the spatial variation of heavy metals indicated that the concentrations of studied heavy metals (Mn, Fe, Cu, and Zn) in suspended particles, especially in the western, northwestern, and northern in spring, are very high and they can cause carcinogenic effects on human life. Therefore, the management practices should be mostly made in these directions to control or reduce soil erosion and reduce its damage effects.

Keywords: Heavy metals, Suspended load, Wind erosion

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۳۵-۲۱۹

پایش زمانی رسوبات بادی و بعضی از عناصر سنگین در رسوبات معلق شهرستان طبس

حجت امامی^{۱*} - مهسا معمارزاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۶/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

ذرات گردوغبار یکی از راه‌های بسیار مهم ورود عناصر سنگین به خاک می‌باشند. رسوبات دانه ریز نقش مهمی در انتقال آلودگی هوا به دلیل وجود فلزات سنگین و آفت کش‌ها را دارا می‌باشند. به دلیل خشکی و وجود بادهای فرساینده در شهر طبس و زیاد بودن شدت فرسایش بادی در این منطقه، حجم زیادی از رسوبات بادی همراه با این بادهای فرساینده وارد این شهر می‌شوند. بنابراین فلزات سنگین از طریق ذرات گرد و غبار در هوا به صورت معلق در آمده و همراه با باد به مناطق مسکونی و شهری منتقل شده و سبب به وجود آمدن خطراتی برای سلامتی انسان شوند. با توجه به اطلاعاتی که از گذشته در مورد جهت طوفان‌ها و بادهای فرساینده وجود داشت سه تله رسوب گیر در هر یک از مبادی ورودی شهرستان طبس (در جهت‌های شمال، شمال غرب، شمال شرق، غرب و جنوب غرب) نصب شد. علاوه بر این یک تله رسوب گیر هم در مرکز این شهرستان تعبیه و مقدار رسوبات معلق در ماه‌های مختلف سال جمع‌آوری شد. تا میزان گرد و غبار وارد شده به شهرستان از بهمن سال ۱۳۹۹ تا دی ماه ۱۴۰۰ اندازه‌گیری شود. در رسوبات بادی، غلظت بعضی از فلزات سنگین مختلف شامل منگنز، آهن، مس و روی پس از عصاره‌گیری با محلول تیزاب سلطانی (اسید نیتریک و اسید کلریدریک به نسبت ۳ به ۱) توسط دستگاه جذب اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین و کمترین مقدار رسوبات بادی به ترتیب از جهت شمال شرق و جنوب غرب به میزان ۸۵/۵۶ و ۲۹/۳۰ گرم بر متر مربع در ماه وارد شهر طبس شده است. با مقایسه گلباد و مقدار رسوبات بادی، می‌توان گفت تطابق نسبی بین رسوبات بادی با گلباد این شهرستان وجود دارد. تغییرات ماهانه دبی رسوبات نیز نشان داد که بیشترین مقدار رسوبات بادی در شهریور ۱۴۰۰ از جهت شمال غرب (۱۲۵ گرم بر متر مربع در ماه) وارد شهر طبس شده است. به طور کلی مقدار عناصر سنگین وارد شده به شهر طبس از طریق رسوبات معلق به صورت $Fe > Mn > Zn > Cu$ بود. مجموع منگنز وارد شده به شهر طبس (۷۵۲۸ میلی گرم بر کیلوگرم در سال) در جهت غرب بیشترین مقدار است. تغییرات زمانی عنصر منگنز نشان داد، در بازه زمانی فروردین تا خرداد ۱۴۰۰ به طور قابل توجهی بیشتر از سایر ماه‌های سال است. مجموع آهن وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت شمال غرب بیشترین مقدار است. تغییرات زمانی غلظت عناصر سنگین نشان داد که بیشترین مقدار این عناصر در رسوبات بادی در فروردین ۱۴۰۰ در جهت غرب (برای آهن) و شمال غرب (برای منگنز) مشاهده شد. همچنین بیشترین مقدار مس (۹۲/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و روی (۶۶۰۶ میلی گرم بر کیلوگرم) در رسوبات بادی نیز در جهت‌های شمال شرقی و جنوب غربی در فروردین ۱۴۰۰ دیده شد. با توجه به گلباد سالانه شهر طبس، سرعت وزش باد در محدوده شمال غرب تا شمال شرق بسیار شدید است که با وزش باد و فرسایش بادی و احتمالاً به دلیل سازندهای زمین شناسی و فعالیت‌های انسانی مثل معدن زغال سنگ در منطقه، عناصری مثل آهن، منگنز، مس و روی از طریق رسوبات بادی وارد شهر طبس شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بار معلق، عناصر سنگین، فرسایش بادی

مقدمه

المللی، طوفان‌های گرد و غباری است که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهد که حجم بسیار زیادی از ذرات ریز معلق

یکی از معضلات زیست محیطی در واحدهای منطقه‌ای و بین

۱ و ۲- به ترتیب استاد و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: hemami@um.ac.ir

در اندازه ریز نشان می‌دهد که برای همه عناصر سنگین به ترتیب مسیر بلع، تماس پوستی و تنفس بیشترین و کمترین میزان خطر سرطان زایی (HQ) بوده است. نتایج قنوتی (Ghanavati, 2018) نشان می‌دهد میزان HQ در راه‌های ورود بلع و تنفس برای کودکان بیشتر از گروه سنی بزرگسالان است. برای گروه سنی بزرگسالان مسیر جذب پوستی بیشتر از گروه سنی کودکان بوده است که این موضوع توسط وی و همکاران (Wei et al., 2015) و لی و همکاران (Li et al., 2008) تایید شده است.

با توجه به اینکه فرسایش بادی در مناطق خشک با بادهای فرساینده باعث انتقال ذرات ریز به صورت معلق به مناطق شهری می‌شود و این ذرات ممکن است حاوی عناصر سنگین باشند و از طریق استنشاق و یا تماس پوستی باعث به خطر افتادن سلامتی انسان شود، ضرورت دارد از مقدار رسوبات بادی معلق و عناصر سمی موجود در آن‌ها آگاهی پیدا کرد. به همین علت این پژوهش با هدف بررسی نرخ رسوب ذرات معلق در مبادی شهر طبس در بعضی از جهات جغرافیایی که حاوی بادهای فرساینده هستند انجام شد. همچنین غلظت بعضی از عناصر سنگین در این رسوبات در مدت یک سال به صورت ماهانه مرود پایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهرستان طبس می‌باشد. شهرستان طبس در ۵۶ درجه و ۵۵ دقیقه طول جغرافیایی و در ۳۳ درجه و ۳۵ دقیقه عرض جغرافیایی از شمال به کاشمر و دشت کویر و شاهرود و از جنوب به کویر لوت و کرمان و از مشرق به فردوس و بیرجند و از سمت غرب به خور بیابانک در استان اصفهان محدود است (شکل ۱). این شهرستان با ۵۴۶۰ کیلومتر مربع به عنوان بزرگترین شهرستان ایران شناخته می‌شود و دارای آب و هوای بیابانی خشک و گرم است که تابستان‌های آن بسیار گرم و دارای زمستان‌های نسبتاً سرد می‌باشد به گونه‌ای که در بررسی آمار بلند مدت موجود برای این شهر درجه حرارت حداکثری مطلق معادل ۱۵+ درجه و حداقل مطلق ۹- درجه سانتی‌گراد ثبت شده است؛ همچنین ماندگاری گرما در فصل گرما در این شهر به گونه‌ای است که گاهی در اوج گرما برای روزهای متوالی بیش از ۱۲ ساعت در شبانه‌روز درجه حرارت هوا بالای ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. ریزش نزولات جوی در این شهر بسیار کم و بیشتر ماه‌های سال خشک و بدون باران است؛ به گونه‌ای که متوسط بارندگی سالیانه آن چیزی حدود ۸۰ میلی‌متر بوده که این مقدار نیز دارای پراکندگی وسیع در زمان بارش می‌باشد به طوری که گاه ممکن است مقدار بارندگی یک سال معادل یا کمتر از باران نازل شده در طول یک ماه سال دیگر باشد. تبخیر یکی از عوامل مهم در مناطق خشک می‌باشد که به علت خشکی و گرمی هوا و آفتاب سوزان، وزش باد و دیگر عوامل مؤثر در این منطقه میزان

را با خود حمل می‌کنند. به منظور حفاظت و ارزیابی تاثیرات آن‌ها بر سلامت جامعه، شناخت خصوصیات شیمیایی، منشأ ورودی این رسوبات و عناصر موجود در این ذرات مهم می‌باشد. ذرات گردوغبار یکی از راه‌های بسیار مهم ورود عناصر سنگین به خاک می‌باشند. رسوبات دانه ریز نقش مهمی در انتقال آلودگی هوا را دارند و به دلیل این که حاوی انواع آلودگی‌ها به ویژه فلزات سنگین و آفت کش‌ها بوده و قادر به انتقال آن‌ها به مناطق دور دست می‌باشند. فلزات سنگین به دلیل تهدیداتی که می‌تواند متوجه سلامت انسان کنند بسیار مهم هستند. آلودگی ذرات گرد و غبار به فلزات سنگین به علت سمیت، تجزیه ناپذیری و تجمع پذیری این ترکیبات و عناصر یک مشکل جدی تلقی شده است (Moradi and Mirzaei, 2017). فلزات سنگین از قبیل سرب، روی، مس، کادمیم، آرسنیک و کروم به دلیل دارا بودن خاصیت سمی و تجمع زیستی از جمله مهم‌ترین و جدی‌ترین آلودگی‌های تهدید کننده محیط زیست ما هستند (Chen et al., 2015). افزایش غلظت این فلزات اثرات منفی بسیار زیادی بر سلامت انسان دارد که عمدتاً از طریق هضم، تنفس و جذب پوستی صورت می‌گیرد.

هر فردی در حالت عادی در هر متر مکعب حدود ۰/۰۰۱۰ گرم از رسوبات ریزگرد با میانگین ۱۷ بار تنفس در هر دقیقه و ۱۰ ساعت فعالیت، وارد ریه‌های خود می‌کند در حالی که در زمان طوفان‌های گرد و غبار به طور میانگین ۶/۶۳۴۰ گرم رسوبات گرد و غبار وارد ریه می‌شود (Griffin, 2007). سازمان جهانی بهداشت یک سری استانداردهایی را مطابق با اتحادیه اروپا برای میزان فلزات سنگین در ذرات هوا تعریف کرده است که برای سرب، آرسنیک، نیکل، کادمیم به ترتیب ۵۰۰، ۶، ۲۰ و ۵ نانو گرم بر متر مکعب می‌باشد (Moreno et al., 2006). طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی در صورتی که غلظت فلزات سنگین آهن، روی و مس در خاک به ترتیب به ۲۰۰۰، ۱۲۰ و ۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم برسد باعث آلودگی شدید خاک به این عناصر می‌شود (MacDonald et al., 2000). در اهواز مطالعات مختلفی بر روی خصوصیات شیمیایی رسوبات انجام شده است که در یکی از این پژوهش‌ها میزان عناصر سنگین، آنیون‌ها و کاتیون‌ها طی طوفان‌های گرد و غبار مورد سنجش قرار گرفت و عناصری از جمله مولیبدن، کروم و مس دارای بیشترین غلظت بودند (Naimabadi et al., 2016).

مرادی و میرزایی (Moradi and Mirzaei, 2017) به بررسی سطح آلودگی و تغییرات مکانی فلزات سنگین در رسوبات پرداختند و نشان دادند که غلظت فلزات سرب، مس، آهن و روی در رسوبات در اندازه ریز بیشتر از غلظت زمینه است که منشأ فلزات سرب، روی و مس انسان‌زاد و عناصر آهن و کادمیم نیز تا حدودی تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی قرار گرفته است در حالی که عناصر نیکل و کروم منشأ طبیعی دارند. ارزیابی خطر سلامت انسان در رسوبات ریزدانه در معرض عناصر سنگین از سه مسیر اصلی بلع، تماس پوستی و استنشاق برای دو گروه سنی مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطالعات انجام شده بر روی رسوبات

غرب نصب شدند تا ذرات معلق در هوا وارد آن‌ها شوند. علاوه بر این یک تله رسوب گیر هم در مرکز شهرستان نصب شده است تا میزان گرد و غبار وارد شده به شهرستان نیز اندازه گیری شود (شکل ۲). جمع آوری رسوبات، به صورت ماهانه به مدت یک سال از بهمن ۱۳۹۹ تا دی ۱۴۰۰ انجام شد. برای محاسبه مقدار ذرات گرد و غبار در واحد سطح، وزن ذرات گرد و غبار جمع آوری شده اندازه گیری و بر سطح دهانه ورودی تله های رسوب گیر تقسیم شد و به صورت گرم در متر مربع در ماه گزارش شد و در نهایت نمونه های جمع آوری شده برای اندازه گیری غلظت فلزات سنگین و پارامترهای دیگر به آزمایشگاه منتقل و غلظت فلزات سنگین شامل منگنز، آهن، مس و روی اندازه گیری شد. برای اندازه گیری غلظت فلزات سنگین در رسوبات معلق، مقدار ۳ گرم از خاک وزن شد و به آن ۲۸ میلی لیتر محلول تیازاب سلطانی^۱ که مخلوط ۳ به ۱ اسید نیتریک و اسید کلریدریک می باشد، افزوده شد. در ادامه نمونه ها به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه حرارت داده و پس از سرد شدن با استفاده از کاغذ صافی واتمن ۴۲ صاف شدند. سپس حجم نهایی به ۱۰۰ میلی لیتر رسانده شد (Dakiky et al., 2002) و غلظت فلزات فوق توسط دستگاه جذب اتمی قرائت شد. به منظور بررسی تاثیر جهت جغرافیایی و زمان بر مقدار رسوبات و غلظت عناصر سنگین، مقایسه آماری بین تیمارها بر اساس طرح کاملاً تصادفی در سطح احتمال پنج درصد در نرم افزار MSTATC انجام شد.

تبخیر و تعرق سالیانه از مجموع آب حاصله از بارندگی بسیار بیشتر است که بیشترین مقدار تبخیر در تابستان و در گرمترین ماه ها صورت می گیرد چون علاوه بر بالا بودن دما و شدت تشعشع خورشید وزش باد در تابستان های این منطقه مزید بر علت گشته و در بالا بودن میزان تبخیر کمک می کند

از نظر زمین شناسی بلوک طبس از جمله مناطقی است که روند تکاملی پالئوزوئیک آن با مناطق مجاور همخوانی ندارد. تکاپوهای آتشفشانی مافیک و حدواسط، هرچند ناچیز، از ویژگی های پالئوزوئیک طبس است و از این نظر بلوک طبس را می توان با کوه های البرز مقایسه نمود. کانی سازی سرب، روی و مس در سنگ های پرمین تریاس و ژوراسیک البرز در بوک طبس نیز عمومیت دارد (Aghanabati, 2004). وضعیت گیاه شناسی طبس به گونه ای است که بیشترین گونه متعلق به تیره Chenopodiaceae با ۲۵ گونه می باشد و سایر گونه ها از قبیل Asteraceae با ۱۹ گونه، Gramineae با ۱۶ گونه، Fabaceae با ۱۴ گونه، Lamiaceae با ۱۱ گونه، Brassicaceae با ۱۰ گونه، به ترتیب در مراتب بعدی قرار گرفته اند (Fathi, 2014).

جهت نصب تله های رسوب گیر اطلاعات مربوط به سرعت و جهت بادهای غالب منطقه از ایستگاه های هواشناسی شهرستان طبس تهیه شد. با توجه به این که بادهای غالب شهرستان طبس از سمت شمال غرب تا شمال شرق می وزند به منظور نمونه برداری و جمع آوری ذرات گرد و غبار سه تله رسوب گیر در هر کدام از جهت های جغرافیایی که بادهای فرساینده وجود داشت یعنی در جهت های شمال شرق تا جنوب



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقشه شهرستان طبس در ایران

(نقاط سبز رنگ نشان دهنده محل نصب تله های رسوب گیری می باشند).

Figure 1- Geographical position and map of Tabas in Iran
(Green points show the position of sediment traps)



شکل ۲- نمونه رسوب گیر مخزنی برای جمع آوری ذرات معلق

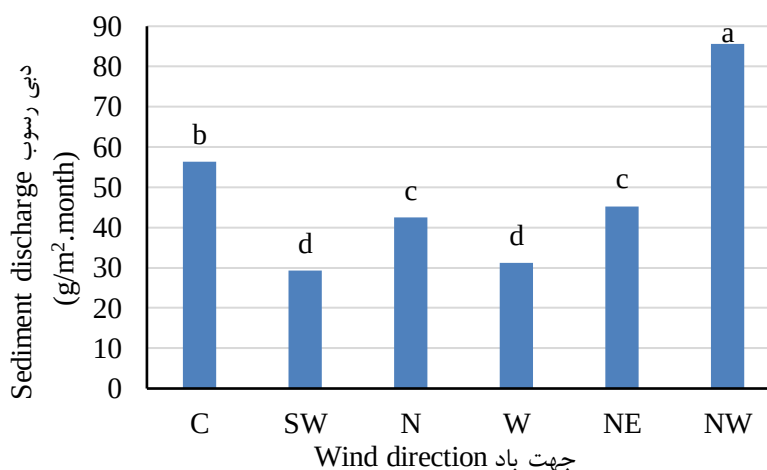
Figure 2- Sediment trap sampler for collecting suspended particles

نتایج و بحث

میانگین دبی رسوبات بادی از بهمن ۱۳۹۹ تا دی ۱۴۰۰

با توجه به اطلاعاتی که از گذشته در مورد جهت طوفان‌ها و بادهای فرساینده وجود داشت (شکل ۴) تله‌های رسوب گیر در مبادی ورودی شهرستان طبس (در جهت‌های شمال، شمال غرب، غرب و جنوب غرب) از بهمن ماه ۱۳۹۹ نصب شده است. علاوه بر این یک تله رسوب گیر هم در مرکز این شهرستان نصب شد تا میزان گرد و غبار وارد شده به شهرستان نیز اندازه گیری شود، که نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین مقدار رسوبات بادی از جهت شمال غرب (۸۵/۶۶ گرم بر متر مربع) وارد شده به شهر طبس که به طور معنی داری بیشتر از سایر جهات است. کمترین مقدار رسوبات

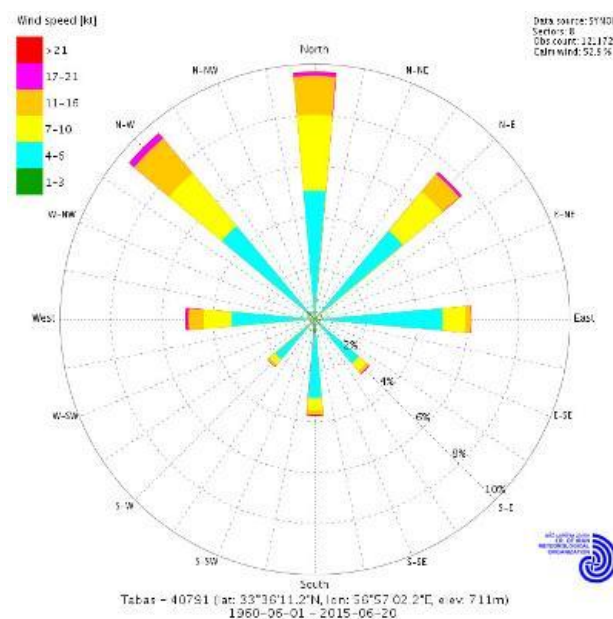
بادی نیز مربوط به جهت‌های جنوب غرب و غرب (به ترتیب ۲۹/۳ و ۳۱/۱۸ گرم بر متر مربع) است که به طور معنی داری کمتر از سایر جهات جغرافیایی می‌باشند ولی با یکدیگر تفاوت معنی داری ندارند ($p > 0.05$). همچنین، پس از جهت شمال غرب، مقدار رسوبات ورودی به طبس از جهت‌های شمال شرق و شمال قابل توجه است که به طور معنی داری بیشتر از جهت‌های جنوب غرب و غرب است. با مقایسه گلباد و مقدار رسوبات بادی، می‌توان گفت تطابق نسبی بین رسوبات بادی با گلباد این شهرستان وجود دارد (شکل ۴). البته تفاوت‌های جزئی در این زمینه دیده می‌شود؛ به طوری که با این که بیشترین سرعت باد در جهت شمال دیده می‌شود، اما مقدار رسوبات در این جهت جغرافیایی کمتر از جهت شمال غرب است که علت آن ممکن است ناشی از تفاوت در فرسایش پذیری خاک و پوشش گیاهی در این دو جهت باشد.



شکل ۳- میانگین دبی رسوبات بادی در جهت‌های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس

(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال و C: مرکز شهر).

Figure 3- The average discharge of wind sediments in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center).



شکل ۴- گل باد سالانه ایستگاه سینوپتیک طبس
Figure 4- The annual wind Rose of Tabas synoptic station

ساختمانی قبل از رسیدن به مرکز شهر رسوب نماید. با این حال همان گونه که در شکل ۵ مشاهده می شود در بیشتر ماههای سال (بهمن تا خرداد) مقدار رسوبات وارد شده به مرکز شهر بیشترین مقدار است. همچنین در بازه زمانی تیر تا دی، در آذر ماه مقدار رسوبات در مرکز شهر افزایش نشان یافته است که احتمالاً به دلیل عوض شدن جهت وزش باد و انتقال رسوبات از جهتهای غرب، شمال غرب و جنوب شرق می باشد. در بین جهتهای غالب وزش باد که رسوبات بادی در آن جهتها اندازه گیری شده است بیشترین مقدار رسوبات از جهت شمال غرب و کمترین مقدار رسوبات بادی نیز در بیشتر ماههای سال از جهتهای غرب و جنوب غرب وارد شهر طبس شده است، زیرا در بیشتر ماههای سال، باد غالب از جهت شمال غرب شهر طبس می وزد و شدت وزش باد در جهت جنوب غربی نیز در بیشتر ماههای سال بسیار کم است (شکل ۴). همچنین با اینکه در جهت غربی هم شدت وزش باد در بیشتر ماههای سال نسبتاً زیاد است اما وزش باد از سمت مقابل یعنی جهت شرق (با شدت کمتر) نیز وجود دارد و در نتیجه اثر بادهای جهت غربی را تا حدودی خنثی نموده و باعث می شوند که رسوبات کمتری از جهت غرب وارد شهر شوند. به طور کلی مقدار رسوبات در شمال غرب در بیشتر ماههای سال قابل توجه است که همان طور که اشاره شد به دلیل وزش شدیدترین بادهای از این جهت جغرافیایی می باشد. در جهت شمال غرب مقدار فرسایش بادی به جز مرداد که به طور معنی داری کمتر از سایر ماههای سال است، در سایر ماهها بالاست. همچنین در جهت شمال شرقی نیز مقدار فرسایش بادی در بازه زمانی فروردین تا مرداد ۱۴۰۰ به طور معنی داری کمتر از سایر ماههای سال

همچنین با این که شدت وزش باد در جهت شمالی بیشتر است، اما چون وزش باد در جهت جنوب وجود دارد، بنابراین مقدار رسوبات بادی کمتر از جهتهای شمال شرقی و شمال غرب است. علاوه بر این مقدار رسوبات بادی در مرکز شهر هم قابل توجه می باشد و از آن جا که رسوبات از محدوده شمال غرب تا شمال شرق وارد شهر می شوند و مطابق گلباد شهرستان در جهت مخالف آن وزش باد دیده نمی شود بنابراین با وجود این که تاسیسات شهری و ساختمانی می توانند باعث رسوب ذرات معلق شوند اما بخشی از آن هم از این جهات وارد شهر شده و به همین علت مقدار رسوبات بادی در مرکز شهر زیاد می باشد.

تغییرات ماهانه دبی رسوبات بادی

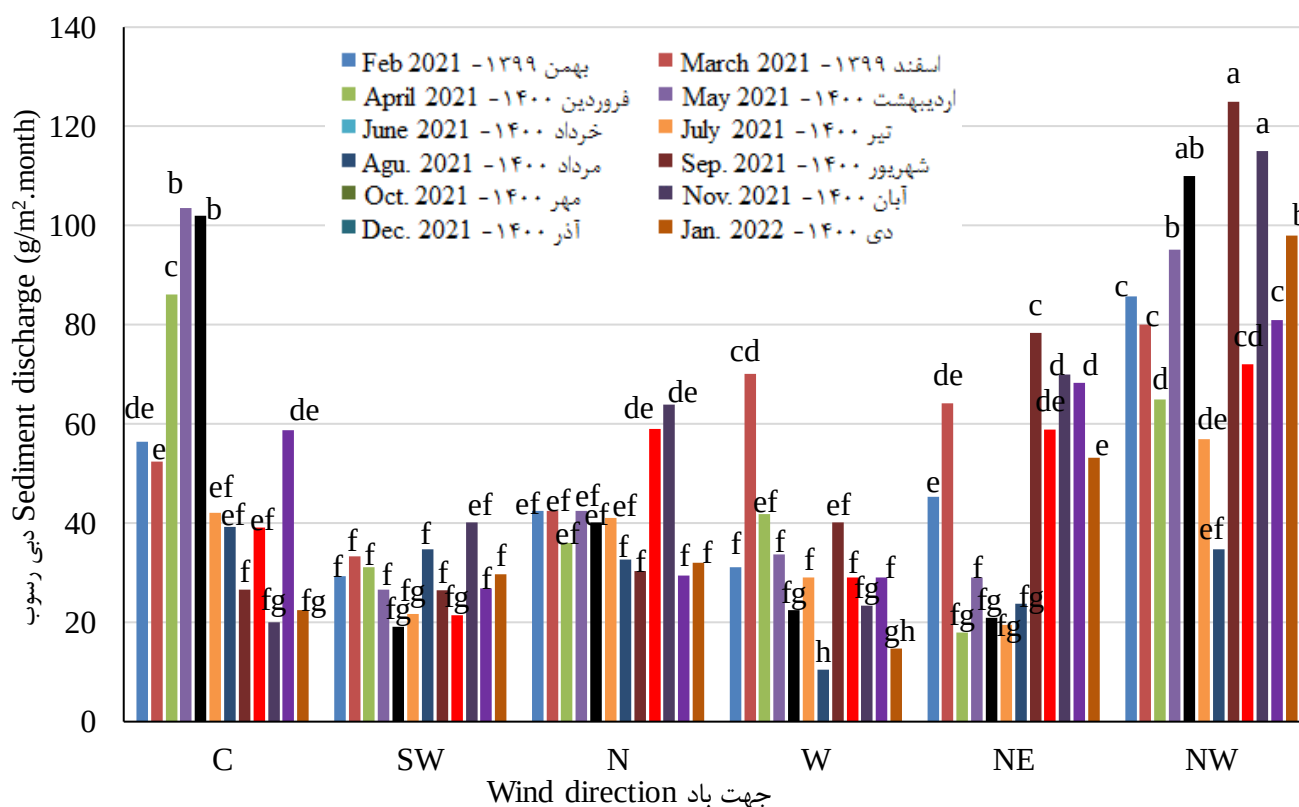
تغییرات ماهانه دبی رسوبات نیز نشان داد (شکل ۵) که بیشترین مقدار رسوبات بادی در شهریور و آبان ۱۴۰۰ از جهت شمال غرب وارد شهر طبس شده است و به طور معنی داری بیشتر از سایر ماههای سال در تمامی جهات جغرافیایی است که با توجه به خشکی هوا در این ماهها دور از انتظار نیست. برآیند نرخ رسوبات بادی در مرکز شهر نشان می دهد با گرم شدن هوا از فروردین تا خرداد ۱۴۰۰ به طور معنی داری نسبت به سایر ماههای سال افزایش یافته و روند صعودی داشته و بیشترین مقدار در این ماهها وارد مرکز شهر شده اند. نکته ای که باید در مورد رسوبات جمع آوری شده در مرکز شهر مورد توجه قرار گیرد این است که مقدار رسوبات در این نقطه برآیند تمام جهات جغرافیایی است و ممکن است رسوباتی که از یک جهت وارد می شود دوباره با وزش باد از جهت مخالف به مرکز شهر منتقل نشود و با برخورد با تاسیسات

مقدار منگنز دارای روند غرب < شمال غرب < جنوب غرب < شمال شرق < شمال است. با توجه به مقدار بالای منگنز در رسوبات در همه جهت‌های مورد بررسی و ورود آن‌ها به شهرستان طبس مقدار این عنصر در مرکز شهر بسیار زیاد است و تاثیر مخرب این عنصر بر سلامت انسان، ضرورت کنترل فرسایش بادی بیش از پیش احساس می‌شود. در شکل ۷ تغییرات زمانی عنصر منگنز نشان داده شده است، که بر این اساس روند منگنز در رسوبات همه‌ی جهت‌ها تقریباً مشابه است و در بازه زمانی فروردین تا خرداد ۱۴۰۰ به طور قابل توجهی بیشتر از سایر ماه‌های سال است و بر اساس مقایسه‌ی میانگین‌ها مقدرا رسوبات بادی در تمام جهات جغرافیایی در ماه‌های فروردین تا خرداد به طور معنی داری بیشتر از سایر ماه‌های سال است و بین سایر ماه‌های سال هم تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند ($p < 0.05$), به طوری که مقدار منگنز در جهت شمال غرب در فروردین ۱۴۰۰ بیشترین مقدار است و از بهمن ۱۳۹۹ تا فروردین ۱۴۰۰ مقدار منگنز موجود در رسوبات بادی روند افزایشی و پس از آن تا دی ۱۴۰۰ روند کاهشی دارد.

است و مقدرا رسوبات بادی در سایر ماه‌های سال تفاوت معنی‌داری بوجود ندارد. علاوه بر این در جهت‌های غربی، جنوب غربی و شمالی، مقدار رسوبات تفاوتی معنی‌داری در بیشتر ماه‌های سال با یکدیگر ندارند که با گلباد همخوانی دارد، زیرا سرعت باد در این جهات جغرافیایی در بیشتر ماه‌های سال مشابه است و از جهت‌های مخالف آن‌ها یعنی جهت شرقی و جنوبی هم سرعت وزش باد کم است. به همین علت هم میزان رسوبات در این دو جهت کم و تقریباً مشابه است که به دلیل سرعت کم باد و همچنین وجود باد با سرعت تقریباً مشابه در طول سال می باشد.

میانگین غلظت فلزات سنگین در رسوبات بادی از بهمن ۱۳۹۹ تا دی ۱۴۰۰

تغییرات غلظت منگنز در رسوبات بادی در شکل ۶ نشان داده شده است، که مجموع منگنز وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت غرب و شمال غرب بیشترین مقدار است که با هم تفاوت معنی داری ندارند ولی تفاوت آن‌ها با سایر جهات معنی‌دار است. به طور کلی



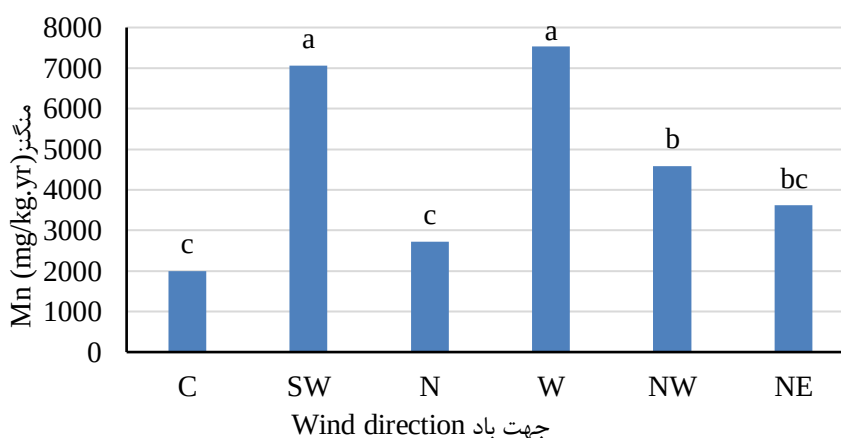
شکل ۵- تغییرات زمانی دبی رسوبات معلق در جهت‌های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس

(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال و C: مرکز شهر)

Figure 5- Temporal changes of wind sediment discharge in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

است، ولی در بیشتر ماه‌های سال، مقدار رسوبات بادی تفاوت معنی‌داری ندارند. با توجه به نتایج مقدار منگنز عمدتاً در بازه زمانی اسفند تا اواخر فصل بهار روند افزایشی دارد که مقدار رسوبات بادی در مرکز شهر هم تقریباً دارای چنین روندی است، ولی در تمام جهات جغرافیایی ممکن است به دلیل فعالیت‌های انسانی در این بازه زمانی باشد که باعث افزایش مقدار منگنز در رسوبات بادی شده است. با وجود مقادیر زیاد منگنز در رسوبات بادی حد آستانه سمیت یا آلودگی آن در منابع مثل سازمان بهداشت جهانی یا سازمان محیط زیست گزارش نشده است و به نظر می‌رسد توجه به این عنصر و ارائه حد سمیت برای آن ضروری باشد. بر اساس نتایج غلظت منگنز در جهت غرب و جنوب غرب بیشتر از سایر جهات است که به نظر می‌رسد ناشی از فعالیت‌های انسان‌زاد و به ویژه معدن پرورده طبس در جنوب غرب این شهرستان است، زیرا رجب‌زاده و همکاران (Rajabzadeh et al., 2015) با مطالعه ژئوشیمی زغال سنگ این معدن دریافتند که جز کادمیوم، لیتیم و روی غلظت سایر عناصر فرعی در آن بالاست، بنابراین غلظت منگنز در رسوبات بادی جهات غرب و به ویژه جنوب غرب بیشتر مقدار است. همچنین یزدی (Yazdi, 2004; Yazdi, 2005) با آنالیز شیمیایی زغال سنگ معدن مزینو واقع در ۸۵ کیلومتری غرب طبس دریافت مقدار عناصر گوگرد، سیلیسیم، آلومینیوم، آهن، منگنز، نیکل، بریلیم، آرسنیک، سرب، کروم، وانادیوم و کبالت بیشتر از حد معمول در زغال سنگ‌ها است که منگنز موجود در آن می‌تواند از طریق رسوبات بادی وارد شهر طبس شود.

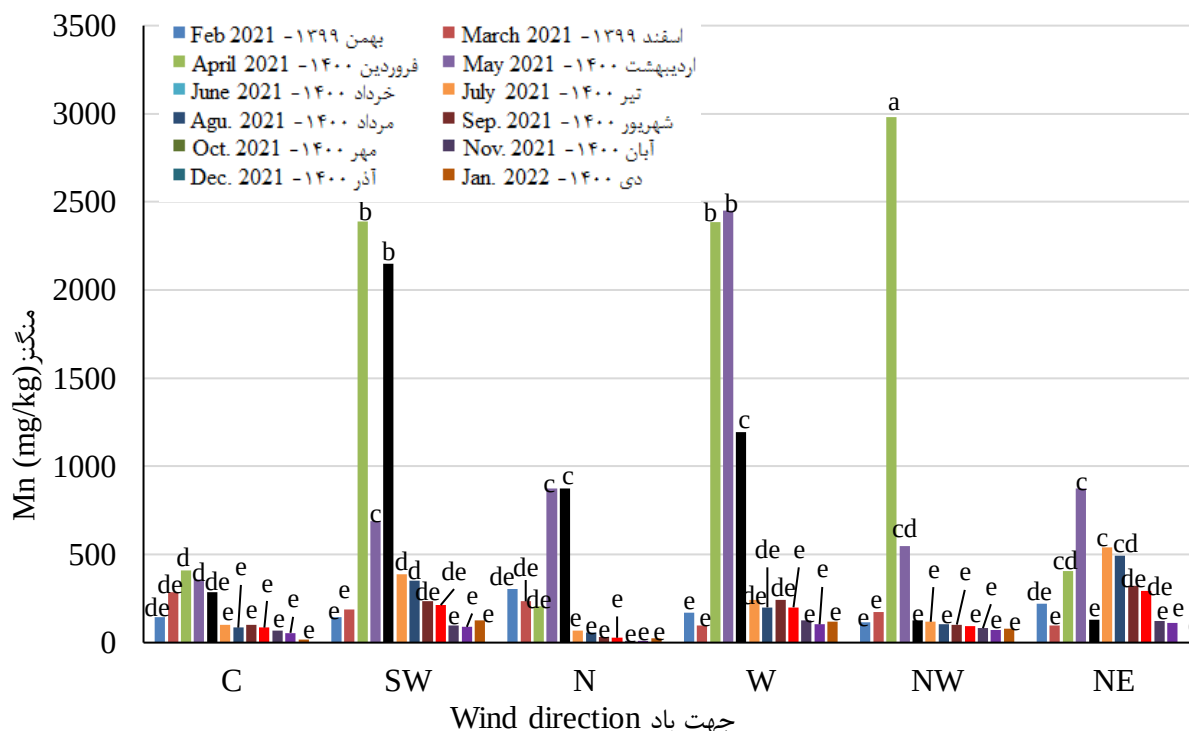
در جهت شمال غرب بیشترین مقدار منگنز در رسوبات در فروردین و خرداد ۱۴۰۰ دیده می‌شود که دارای تفاوت قابل توجه و معنی‌داری با سایر ماه‌ها است و از بهمن ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰ دارای روند تقریباً افزایشی است و پس از آن تا دی ۱۴۰۰ روند کاهشی دارد. در جهت شمال بیشترین مقدار منگنز در اردیبهشت و خرداد ۱۴۰۰ دیده می‌شود که دارای تفاوت معنی‌داری با سایر ماه‌های سال است و از اسفند تا اردیبهشت مقدار آن افزایش یافته و پس از آن تا دی ۱۴۰۰ به شدت کاهش یافته است ولی تفاوت آن‌ها معنی‌دار نیست. در جهت غرب بیشترین مقدار منگنز به ترتیب در اردیبهشت، فروردین و خرداد دیده می‌شود که مقدار رسوبات بادی در این ماه‌ها به طور معنی‌داری بیشتر از سایر ماه‌های سال است، البته تفاوت فروردین و اردیبهشت معنی‌دار نیست. در این جهت جغرافیایی نیز از بهمن ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰ مقدار منگنز روند افزایشی دارد و پس از آن تا دی ۱۴۰۰ روند کاهشی دارد؛ به طوری که بازه زمانی تیر تا دی ۱۴۰۰ و همچنین بهمن و اسفند ۱۳۹۹ مقدار منگنز در رسوبات بادی بسیار کم است و تفاوت آن‌ها معنی‌دار نیست. در جهت شمال شرق، مقدار منگنز از اسفند ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰ افزایش یافته و در اردیبهشت به بیشترین مقدار خود رسیده است که تفاوت آن با سایر ماه‌های سال معنی‌دار است، پس از آن تا دی ۱۴۰۰ به شدت کاهش یافته است و در بیشتر ماه‌های سال تفاوت آن‌ها معنی‌دار نیست. همچنین در مرکز شهر، مقدار منگنز در بازه زمانی اسفند ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰ بیشتر از سایر ماه‌های سال



شکل ۶- مقدار منگنز در رسوبات بادی در جهت‌های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس

(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال و C: مرکز شهر)

Figure 6- The amount of manganese in wind deposits in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)



شکل ۷- تغییرات زمانی منگنز در رسوبات معلق در جهتهای جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس

(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال، C: مرکز شهر)

Figure 7- Temporal changes of manganese in suspended load in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

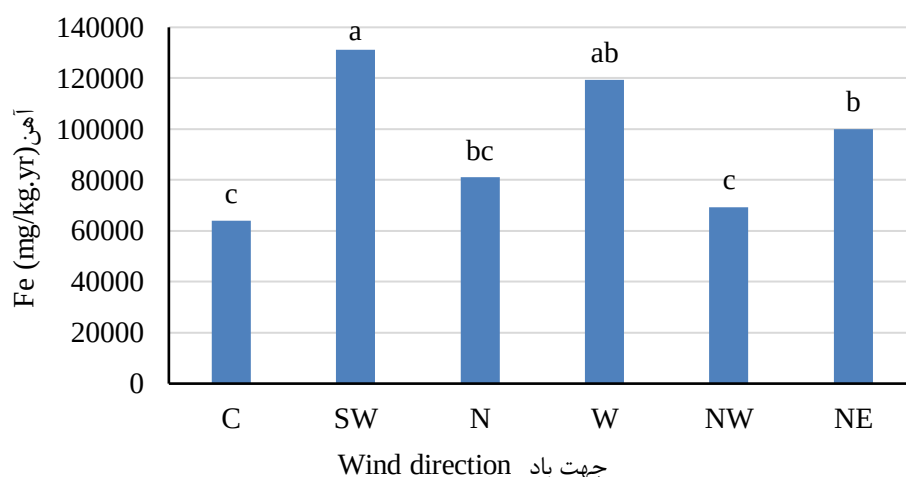
آهن

تغییرات غلظت آهن در رسوبات بادی در شکل ۸ نشان داده شده است که بر اساس آن، مجموع آهن وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت جنوب غرب بیشترین مقدار است و به جز جهت غرب تفاوت معنی داری با سایر جهات جغرافیایی دارد ($p < 0.05$) و به طور کلی مقدار آهن دارای روند جنوب غرب < غرب < شمال شرق < شمال < شمال غرب است و به طور کلی مقدار آهن در رسوبات همه جهات بسیار بالاست؛ به طوری که مقدار تجمعی آهن در مدت یک سال (شکل ۸) در مرکز شهر و مبادی ورودی تمام جهات جغرافیایی بیش از آستانه متوسط آلودگی (۳۰۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (جدول ۱) است. در شکل ۹ تغییرات زمانی عنصر آهن نشان داده شده است، که بر این اساس بیشترین مقدار آهن در رسوبات بادی در فروردین ۱۴۰۰ در جهت غرب و در تیر ۱۴۰۰ در جهت جنوب غرب مشاهده می شود که تفاوت معنی داری با سایر ماه های سال در جهتهای جغرافیایی مختلف دارند. همچنین روند آهن در رسوبات همه ی جهتهای و مرکز شهر طبس تقریباً مشابه است و در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰ به طور معنی داری بیشتر از سایر ماه های سال است، البته روند افزایش غلظت آهن در رسوبات بادی در جهت جنوب غربی تا تیر ۱۴۰۰ ادامه دارد؛ به طوری که بیشترین مقدار

آهن در جهتهای جنوب غرب، شمال، غرب، شمال غرب، شمال شرق و مرکز شهر به ترتیب در ماه های تیر، اردیبهشت، فروردین، فروردین، اردیبهشت و اردیبهشت ۱۴۰۰ دیده می شود. در واقع به دلیل وجود آهن زیاد در خاک های منطقه از یک سو و وزش بادهای فرساینده از سوی دیگر باعث شده آهن هم از نواحی نزدیک و هم نواحی دور همراه با رسوبات بادی منتقل شود و مشابه سایر عناصر با تغییر پوشش گیاهی و ضریب زبری و همچنین خشکی خاک، مقدار آهن موجود در رسوبات در بعضی ماه های گرم سال بیشتر شده است. با توجه به وجود معدن زغال سنگ پرورده واقع در ۷۵ کیلومتری جنوب غرب طبس ممکن است بخشی از آهن موجود در رسوبات معلق ناشی از فعالیت های معدن کاوی باشد زیرا پیریت یکی از کانی های موجود در زغال سنگ طبس است که در دو مرحله از زغال سنگ این معدن حذف می شود (Abdollahi and Shahbazi, 2005) و از آنجا که پیریت حاوی آهن است به نظر می رسد بخشی از آهن حذف شده از زغال سنگ در هنگام حذف پیریت از طریق رسوبات بادی به ویژه در جهت غرب وارد این شهر شده باشند. همچنین یزدی (Yazdi, 2005; Yazdi, 2004) با آنالیز شیمیایی زغال سنگ معدن مزینو واقع در ۸۵ کیلومتری غرب طبس دریافت مقدار عناصر گوگرد، سیلیسیم، آلومینیوم، آهن، منگنز، نیکل، بریلیم، آرسنیک، سرب، کروم، وانادیوم و کبالت بیشتر از حد

دی ۱۴۰۰ که آلودگی آهن در حد کم تا متوسط است در بقیه ماهها مقدار آهن فراتر از حد آلودگی متوسط و حتی شدید است. در جهت غرب نیز مقدار آهن در تمامی ماهها بیشتر از حد آلودگی متوسط و حتی شدید می باشد. به نظر می رسد از اسفند تا خرداد که سرعت وزش باد در جهت های شمال غرب و غرب بیشتر است و همزمان به تدریجی بر شدت خشکی افزوده می شود، مقدار آهن در رسوبات بادی به ویژه در جهت شمال غرب بیشتر شده است. با اینکه پدیده خشکی در ماه های تابستان هم وجود دارد اما در بازه تیر تا آذر ماه جهت وزش باد در جهت جنوب شرق هم بیشتر شده و احتمالاً مقدراً رسوبات ورودی از سمت شمال غرب و در نتیجه مقدار آهن کاهش یافته است. در جهت شمال شرق نیز به غیر از دی ۱۴۰۰ در بقیه ماهها مقدار آهن فراتر از حد آلودگی متوسط و حتی شدید است.

معمول در زغال سنگ ها است که آهن موجود در آن می تواند از طریق رسوبات بادی وارد شهر طبس شود. همچنین رجبزاده و همکاران (Rajabzadeh et al., 2015) با مطالعه ژئوشیمی زغال سنگ معدن پرورده طبس دریافتند کانی های ایلیت، کائولینیت، پیریت، سین ژنتیک، کلیست و کوارتز فروان ترین کانی های زغال سنگ این معدن هستند، که برخی از این کانی ها به ویژه پیریت سرشار از آهن هستند و عامل افزایش غلظت آهن در رسوبات بادی در جهت جنوب غربی طبس می باشد. با مقایسه نتایج این پژوهش (شکل ۹) با استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۳۰۰۰ میلی گرم در کیلوگرم، جدول ۱) نشان می دهد که در بسیاری از ماه های سال مقدار آهن موجود در رسوبات فراتر از حد استاندارد است. به عنوان مثال مقدار آهن در مرکز شهر و جهت های شمال و شمال غرب در بازه زمانی بهمن تا خرداد فراتر از حد آلودگی متوسط و حتی شدید می باشد. در جهت جنوب غرب به غیر از آبان و

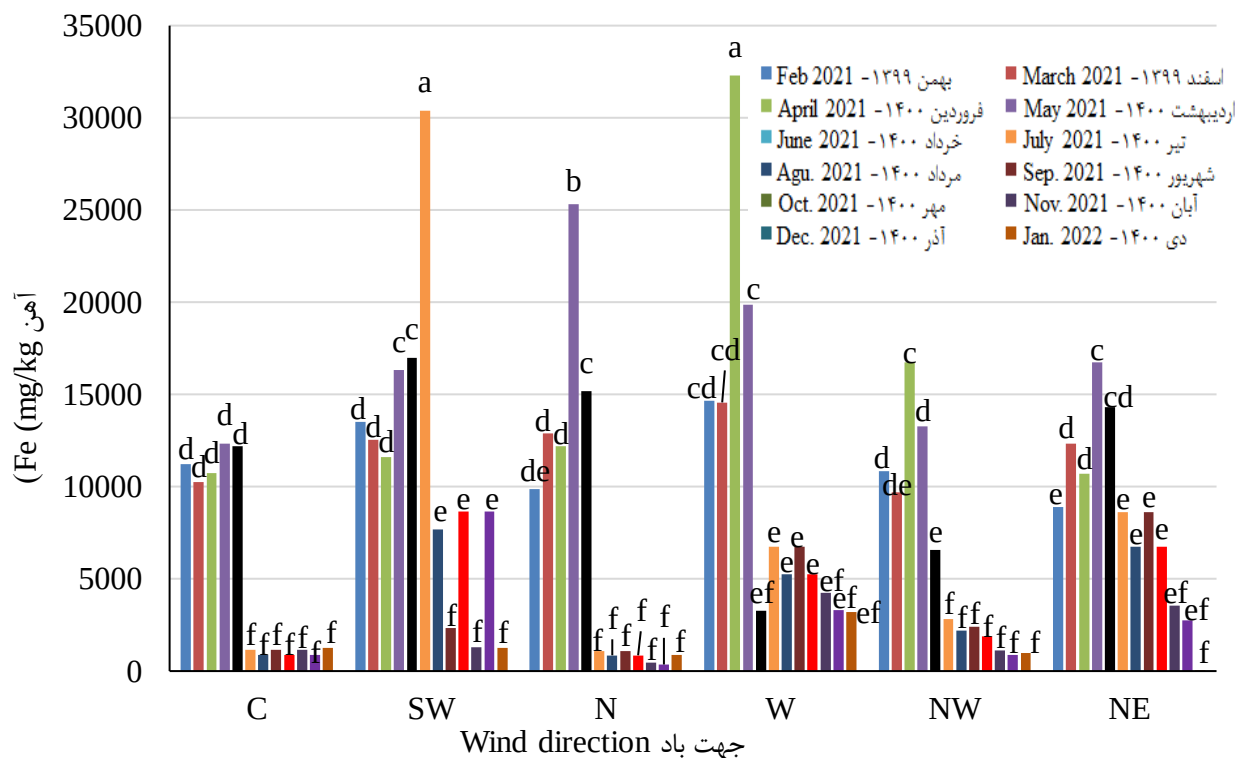


شکل ۸- مقدار آهن در رسوبات معلق در جهت های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس (SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال، C: مرکز شهر)

Figure 8- The amount of iron in wind deposits in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

جدول ۱- استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای فلزات سنگین خاک (mg/kg) نقل از (MacDonald et al., 2000)
Table 1- World health organization standard for soil heavy metal (mg/kg; MacDonald et al., 2000)

فلزات سنگین Heavy metals	آلودگی کم Low pollution	آلودگی متوسط Medium pollution	آلودگی زیاد High pollution
آهن Fe	2000	3000	-
نیکل Ni	23	36	49
مس Cu	35	-	-
روی Zn	120	290	460
سرب Pb	36	83	130



شکل ۹- تغییرات زمانی آهن در رسوبات معلق در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا آذر ۱۴۰۰ در جهت‌های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس (SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال، C: مرکز شهر)

Figure 9- Temporal changes of iron in suspended load in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

مس

مس به بیش از ۴۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم رسیده است که طبق استاندارد سازمان محیط زیست ایران برای مناطق مسکونی (1.pdf) بیشتر از آستانه آلودگی است و در درازمدت مقدار آن بیشتر از این هم خواهد بود و در نتیجه در درازمدت خطر این فلزات زیاد است.

در شکل ۱۱ تغییرات زمانی عنصر مس نشان داده شده است، که بر این اساس روند مس در رسوبات همه‌ی جهت‌ها تقریباً مشابه است و در همه جهت‌ها کمترین مقدار مس در اردیبهشت ۱۴۰۰ دیده می‌شود، ولی تفاوت آن با بیشتر ماه‌های سال معنی‌دار نیست. البته در جهت شمال شرق کمترین مقدار مس در دی ۱۴۰۰ و در جهت غرب در فروردین و اردیبهشت ۱۴۰۰ مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار مس در رسوبات بادی نیز در جهت‌های شمال شرقی، شمالی و جنوب غربی در فروردین ۱۴۰۰، در جهت غرب در اسفند ۱۳۹۹ و در جهت شمال غرب نیز در دی ۱۴۰۰ دیده می‌شود که تفاوت آن‌ها با سایر ماه‌های سال معنی‌دار است. همچنین در همه‌ی جهت‌های جغرافیایی به جز اردیبهشت، در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا خرداد ۱۴۰۰ مقدار مس در رسوبات بادی زیاد است و در بازه زمانی خرداد تا دی ۱۴۰۰ روند کاهش

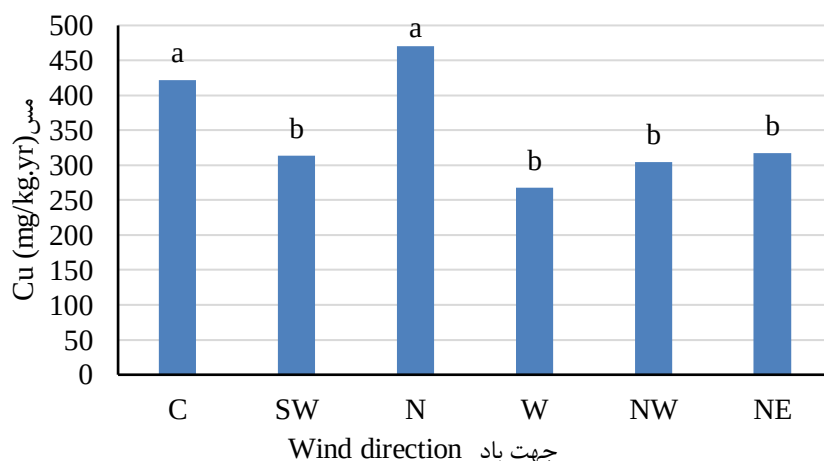
تغییرات غلظت مس در رسوبات بادی در شکل ۱۰ نشان داده شده است، که بر خلاف سایر عناصر، مجموع مس وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت شمال بیشترین مقدار است و روند آن نیز با سایر عناصر متفاوت است؛ به طوری که مقدار مس دارای روند شمال < شمال شرق < جنوب غرب < شمال غرب < غرب است. بر اساس نتایج مقایسه‌ی میانگین‌ها، به جز جهت شمال که مقدار مس به طور معنی‌داری بیشتر از سایر جهت‌های جغرافیایی است، بقیه جهت‌های جغرافیایی تفاوت معنی‌دار با یکدیگر ندارند و می‌توان گفت مقدار مس در خاک‌های نواحی شمالی بیشتر است و احتمالاً به دلیل انتقال از جهت شمال شرق به سمت مخالف یعنی جنوب غرب انتقال این عنصر هنگام وزش باد از جهت مخالف (جنوب غرب) نیز زیاد شده است. به طور کلی، رسوبات وارد شده به طبس حاوی مقادیر نسبتاً بالایی از مس هستند؛ به طوری که مقدار تجمعی عنصر مس در مدت یک سال (شکل ۱۰) بیانگر این موضوع می‌باشد که در مرکز شهر و مبادی ورودی تمام جهت‌های جغرافیایی مقدار تجمعی مس بیشتر از آستانه آلودگی کم (۳۵ میلی‌گرم در کیلوگرم) طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (جدول ۱) است. همچنین در جهت شمال و مرکز شهر مقدار تجمعی عنصر

بدن ضروری هستند و عناصر ضروری کم مصرف به شمار می روند، اما در غلظت های زیاد اثرات سمی دارند (Li et al., 2013). حافظ دربارنی و همکاران (Hafez Darbani et al., 2012) مطالعاتی با بررسی زمین شناسی و ژئوشیمی جنوب شرق طبس عنوان کردند که شرق ایران به دلیل رویداد فروانش در زمان های گذشته و به دنبال آن وجود حجم عظیم ماگماتیسم، پتانسیل بسیار مناسبی برای تشکیل کانی های مختلف به ویژه کانسارهای مس پروفیری دارد. بنابراین به نظر می رسد دلیل وجود مس در رسوبات باید نیز ناشی از فرآیندهای زمین شناسی در این منطقه باشد.

روی

تغییرات غلظت روی در رسوبات بادی در شکل ۱۲ نشان داده شده است، که مجموع روی وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت غربی بیشترین مقدار است که تفاوت آن فقط با جهت های شمال و شمال شرق معنی دار است و سایر جهات جغرافیایی تفاوت معنی داری با یکدیگر ندارند. روند عنصر روی در رسوبات بادی نیز به صورت غرب < جنوب غرب ≈ شمال غرب < شمال < شمال شرق است که بر این اساس می توان گفت مقدار مس در خاکهای نواحی غربی بیشتر است. البته در مجموع رسوبات وارد شده به طبس حاوی مقادیر نسبتا بالایی از روی هستند؛ به طوری که مقدار تجمعی آن در مدت یک سال (شکل ۱۲) در مرکز شهر و مبادی ورودی تمام جهات جغرافیایی بیش از آستانه شدید آلودگی (۴۶۰ میلی گرم در کیلوگرم) طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (جدول ۱) است.

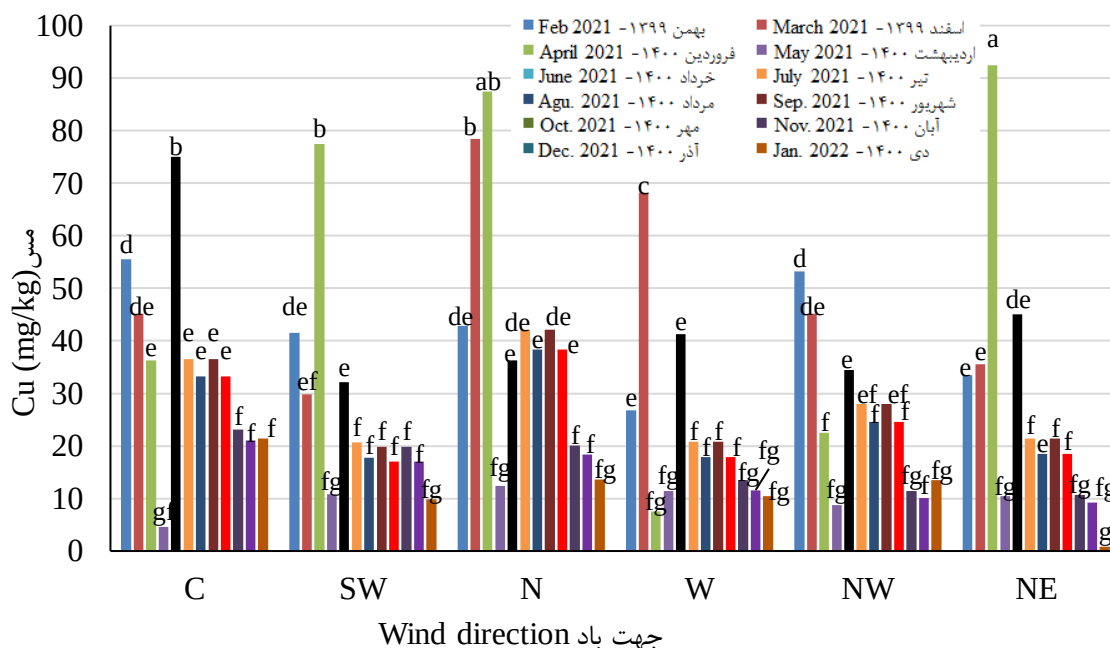
غیرمعنی دار مقدار مس در این رسوبات دیده می شود، که چنین روندی در مرکز شهر هم قابل مشاهده است. البته بیشترین مقدار مس در رسوبات بادی مرکز شهر در خرداد ماه دیده می شود. علاوه بر این در مجموع مقدار مسی که از طریق رسوبات چه در مرکز شهر و چه در جهت های جغرافیایی مورد بررسی زیاد است. وزش بادهای فرساینده باعث شده است مس همراه با رسوبات بادی منتقل شود و مشابه سایر عناصر باتغییر پوشش گیاهی و ضریب زبری و همچنین خشکی خاک، مقدار مس موجود در رسوبات در بعضی ماه های گرم سال بیشتر شده است. با مقایسه نتایج این پژوهش (شکل ۱۱) با استانداردهای مختلف نشان می دهد که در بعضی از ماه های سال مقدار مس موجود در رسوبات فراتر از حد استاندارد است. به عنوان مثال مقدار مس در مرکز شهر در خرداد ۱۴۰۰ (۷۵ میلی گرم در کیلوگرم)، در جهت جنوب غرب در فروردین ۱۴۰۰ (۷۷/۵ میلی گرم در کیلوگرم)، در جهت شمال در اسفند ۱۴۰۰ (۷۸/۴ میلی گرم در کیلوگرم) و فروردین ۱۴۰۰ (۸۷/۵ میلی گرم در کیلوگرم)، در جهت غرب در اسفند ۱۳۹۹ (۶۸/۲ میلی گرم در کیلوگرم) و در جهت شمال شرق در فروردین ۱۴۰۰ (۹۲/۵ میلی گرم در کیلوگرم) بیشتر از استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۶۳ میلی گرم در کیلوگرم) در حد آلودگی محیط زیست می باشد. مس عموما در نزدیکی معادن، مکان های صنعتی و محل دفن زباله ها یافت می شود. از طرف دیگر تشکیلات زمین شناسی نیز حاوی این عناصر سنگین هستند که می توانند از طریق فرسایش بادی همراه با ذرات معلق در هوا وارد مناطق شهری شوند و از راه استنشاق، تماس پوستی و یا بلع وارد بدن انسان شده و سبب عوارض مختلفی در انسان شوند، زیرا برخی از این فلزات سنگین مانند کادمیوم و روی عناصر غیر ضروری و سرطان زا هستند. برخی فلزات سنگین دیگر مانند نیکل، روی و مس برای رشد



شکل ۱۰- مقدار مس در رسوبات معلق در جهت های جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس

(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال، C: مرکز شهر)

Figure 10- The amount of copper in wind deposits in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)



شکل ۱۱ - تغییرات زمانی مس در رسوبات معلق در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا آذر ۱۴۰۰ در جهتهای جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس
(SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال، C: مرکز شهر)

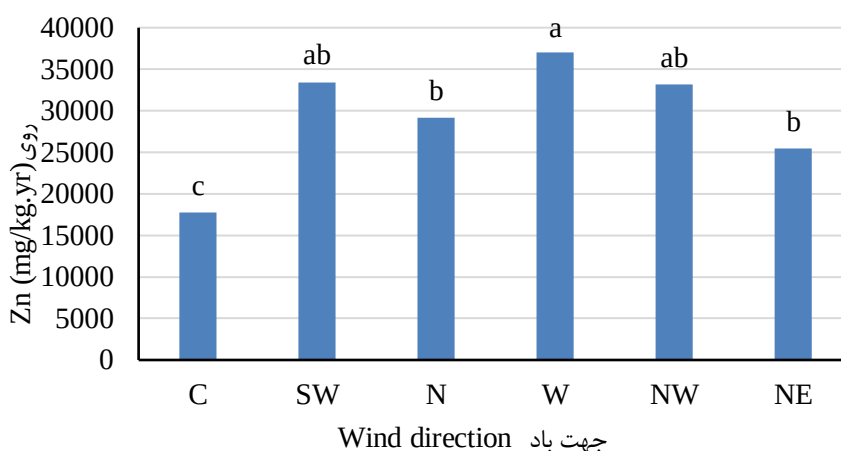
Figure 11- Temporal changes of copper in suspended load in the prevailing wind directions and the center of Tabas city
(SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

آن تا دی ۱۴۰۰ روند کاهشی معنی‌داری دارد. در جهت شمالی نیز بیشترین و کمترین مقدار روی به ترتیب در اسفند ۱۳۹۹ و آذر ۱۴۰۰ دیده می‌شود که تفاوت معنی‌داری با یکدیگر دارند. از اسفند ۱۳۹۹ تا دی ۱۴۰۰ تقریباً روند کاهش عنصر روی در رسوبات بادی دیده می‌شود، ولی تفاوت آن‌ها از اردیبهشت تا آذر معنی‌دار نیست. در جهت غربی با آنکه از بهمن ۱۳۹۹ تا تیر ۱۴۰۰ مقدار عنصر روی در رسوبات بادی تقریباً روند افزایشی و معنی‌داری دارد اما پس از آن روند منظمی دیده نمی‌شود، به‌طوری که در ماه‌های تیر، شهریور و آبان ۱۴۰۰ بیشترین و در دی ۱۴۰۰ نیز کمترین مقدار عنصر روی در رسوبات بادی وجود دارد که غلظت روی در رسوبات بادی این ماه با تمامی ماه‌های سال به جز بهمن ۱۳۹۹ معنی‌دار است. در جهت شمال غرب بیشترین مقدار عنصر روی در فروردین ۱۴۰۰ و اسفند ۱۳۹۹ مشاهده می‌شود و دارای تفاوت معنی‌داری با تمامی ماه‌های سال در تمامی جهات جغرافیایی دارند. کمترین مقدار آن نیز در دی ۱۴۰۰ دیده می‌شود. در این جهت جغرافیایی از فروردین تا شهریور ۱۴۰۰ روند کاهشی و معنی‌دار مقدار عنصر روی در رسوبات بادی قابل مشاهده است و از شهریور تا آذر به مقدار جزئی افزایش و در دی دوباره به طور غیر معنی‌داری کاهش یافته است. در جهت شمال شرقی، مشابه با جهت جنوب غربی بیشترین و کمترین مقدار عنصر روی در اسفند ۱۳۹۹ و اردیبهشت ۱۴۰۰ وجود دارد که دارای تفاوت معنی‌داری با یکدیگر و همچنین با سایر ماه‌های سال هستند. در این جهت جغرافیایی نیز روند مشخصی از نظر مقدار

همچنین مقدار تجمعی روی در مدت یک سال، در مرکز شهر و مبادی ورودی تمام جهات جغرافیایی طبق استاندارد سازمان محیط زیست ایران برای مناطق مسکونی (<https://www.doe.ir/portal/file/977240/soil-standard-1.pdf>) بیشتر از آستانه آلودگی (۵۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) است. روند غلظت روی تا حدود زیادی شبیه به منگنز است و به نظر می‌رسد که علت زیاد بودن غلظت این دو عنصر در جهت‌های غرب و جنوب غرب احتمالاً یکسان است که با پژوهش‌های قبلی هم همخوانی دارد. به عنوان مثال رجب‌زاده و همکاران (Rajabzadeh et al., 2015) با مطالعه ژئوشیمی زغال‌سنگ معدن پرورده طبس در جنوب غرب این شهرستان دریافتند که جز کادمیوم، لیتیم و روی غلظت سایر عناصر فرعی در آن بالاست، که احتمالاً منجر به افزایش غلظت روی در رسوبات بادی جهات غرب و جنوب غرب شده است.

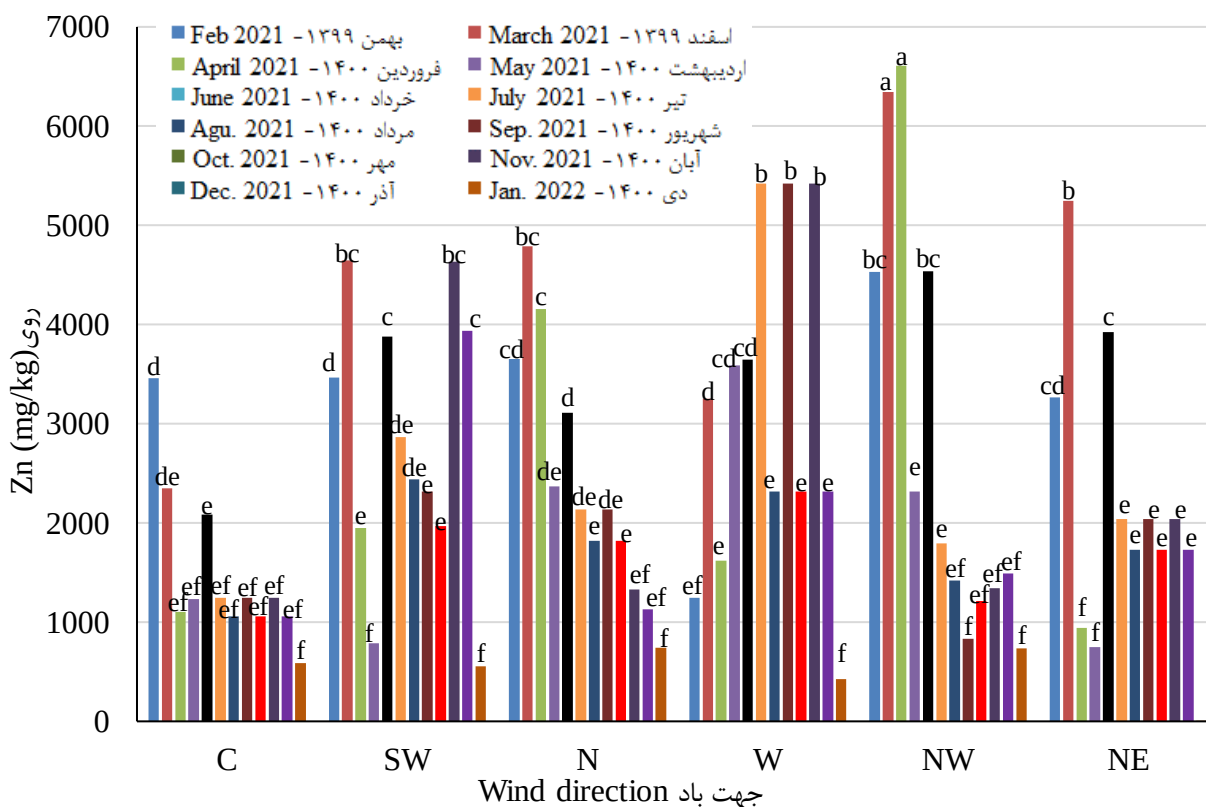
در شکل ۱۳ تغییرات زمانی عنصر روی نشان داده شده است، که بر این اساس در جهت جنوب غرب کمترین و بیشترین مقدار روی به ترتیب در اردیبهشت ۱۴۰۰ و اسفند ۱۳۹۹ دیده می‌شود و غلظت این عنصر روند مشخصی در این جهت جغرافیایی در طول سال ندارد؛ به طوری که غلظت عنصر روی از اسفند ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰ روند کاهشی معنی‌دار داشته، در خرداد ۱۴۰۰ غلظت آن افزایش یافته و پس از آن تا مهر ۱۴۰۰ غلظت آن به صورت غیر معنی‌داری کاهش یافته است، دوباره در آبان ۱۴۰۰ به طور معنی‌داری افزایش یافته و پس از

روی در رسوبات بادی قابل مشاهده نیست، به طوری که فقط در بازه زمانی اسفند ۱۳۹۹ تا اردیبهشت ۱۴۰۰ روند کاهشی و معنی دار در مقدار عنصر روی دیده می شود، اما پس از آن روند مشخصی و معنی داری وجود ندارد.



شکل ۱۲- مقدار تجمعی روی در رسوبات معلق در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا آذر ۱۴۰۰ در جهتهای جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس (SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال و C: مرکز شهر)

Figure 12- The amount of zinc in wind deposits in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)



شکل ۱۳- تغییرات زمانی روی در رسوبات معلق در بازه زمانی بهمن ۱۳۹۹ تا آذر ۱۴۰۰ در جهتهای جغرافیایی باد غالب و مرکز شهر طبس (SW: جنوب غرب، W: غرب، NW: شمال غرب، N: شمال و C: مرکز شهر)

Figure 13- Temporal changes of zinc in suspended load in the prevailing wind directions and the center of Tabas city (SW: Southwest, W: West; NW: Northwest, N: North, C: City center)

که روند آلودگی فلزات سنگین مورد بررسی به صورت روی < نیکل > سرب < کادمیوم بود، که زیاد بودن مقدار روی مشابه با نتایج این پژوهش است.

نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین و کمترین مقدار رسوبات بادی وارد شده به شهر طبس به ترتیب از جهت شمال غرب و غرب میزان ۸۵/۶۶ و ۲۹/۳ گرم بر متر مربع است. تغییرات زمانی دبی رسوبات نیز نشان داد که بیشترین مقدار رسوبات بادی در شهریور، آبان و خرداد ۱۴۰۰ از جهت شمال غرب وارد شهر طبس شده است. مقدار فلزات سنگین در رسوبات بادی نشان داد مجموع منگنز و روی وارد شده به شهر طبس در مدت یک سال در جهت غرب، آهن در جهت جنوب غرب و مس در جهت شمال بیشترین مقدار است که زیاد بودن غلظت آهن، منگنز و روی در جهت های جنوب غرب و غرب احتمالاً ناشی از فعالیت معدنی زغال سنگ پرورده در جنوب غرب طبس است. همچنین تغییرات زمانی عنصر منگنز نشان داد که روند منگنز در رسوبات همه ی جهت ها تقریباً مشابه است و در بازه زمانی فروردین تا خرداد ۱۴۰۰ به طور قابل توجهی بیشتر از سایر ماه های سال است. همچنین تغییرات زمانی عنصر آهن نشان داد که بیشترین مقدار آهن در رسوبات بادی در فرودین ۱۴۰۰ در جهت غرب و در تیر ۱۴۰۰ در جهت جنوب غرب مشاهده شد. بیشترین مقدار مس در رسوبات بادی نیز در فرودین ۱۴۰۰، از جهت شمال شرقی وارد شهر طبس شده است. تغییرات زمانی عنصر روی نشان داد که در جهت جنوب غرب کمترین و بیشترین مقدار روی به ترتیب در اردیبهشت ۱۴۰۰ و اسفند ۱۳۹۹ دیده می شود. به طور کلی مقادیر آهن، منگنز، مس و روی در رسوبات بادی همه جهات بسیار بالاست؛ به طوری که مقدار تجمعی آن ها در مدت یک سال در مرکز شهر و مبادی ورودی تمام جهات جغرافیایی بیش از آستانه آلودگی طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی است. بنابراین اقدامات حفاظتی برای کنترل فرسایش بادی و خطرات ناشی از آلودگی این رسوبات به عناصر سنگین در این شهرستان ضروری می باشد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور از محل طرح پژوهشی با کد ۹۸۰۱۷۵۲۴ انجام شده است. بدینوسیله از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به دلیل همکاری و حمایت مادی و معنوی تشکر و قدردانی می شود.

در مرکز شهر هم بیشترین مقدار روی در رسوبات بادی به ترتیب در ماه های بهمن و اسفند ۱۳۹۹ و خرداد ۱۴۰۰ دیده می شود که فقط این دو ماه دارای تفاوت معنی داری با یکدیگر می باشند و در سایر ماه ها مقدار روی تقریباً مشابه است و در مجموع مقدار روی که از طریق رسوبات به مرکز شهر وارد می شود زیاد است. وزش بادهای فرساینده باعث شده است روی همراه با رسوبات بادی منتقل شود و مشابه سایر عناصر با تغییر پوشش گیاهی و ضریب زبری و همچنین خشکی خاک، مقدار روی موجود در رسوبات در بعضی ماه های گرم سال بیشتر شده است.

تحقیقات مختلفی در ایران در زمینه آلودگی رسوبات به عناصر سنگین انجام شده است که نتایج برخی از آنها نشان دهنده روند نسبتاً مشابه با این پژوهش است. به عنوان مثال سیاحتی اردکانی و همکاران (Siyahati Ardakani et al., 2018) با اندازه گیری غلظت فلزات سنگین در شمال غرب اردکان دریافتند که روی و کادمیوم به ترتیب دارای بیشترین و کمترین غلظت بودند و ترتیب آنها به صورت روی < وانادیم < نیکل < کروم < سرب < آرسنیک < مولیبدن < کادمیوم بود. بر اساس نتایج آنها خاک منطقه از نظر آلودگی به فلزات سنگین در کلاس بالای آلودگی قرار نداشت، ولی با توجه به افزایش غلظت بعضی از فلزات سنگین مثل سرب، وانادیوم و روی در خاک سطحی حاشیه صنایع گندله سازی و فولاد نتیجه گرفتند که این صنایع بر روند آلودگی خاک تاثیر گذاشته اند. سلگی و عبداللهی (Solgi and Abdollahi, 2022) با بررسی میزان آلاینده های فلزات سنگین سرب، روی، مس و کادمیوم در رسوبات اتمسفری شهر زاهدان نشان دادند سرب (۲۷۰/۵) میلی گرم در کیلوگرم و کادمیوم (۲۰/۷) میلی گرم در کیلوگرم بیشترین دارای بیشترین و کمترین غلظت در رسوبات بودند. البته غلظت هر دو عنصر سرب و کادمیوم بیشتر از حد استاندارد است، به طوری که کادمیوم در کلاس آلودگی بسیار بالا و سرب در کلاس آلودگی بالا قرار دارد. همچنین ترتیب فلزات سنگین مورد بررسی به صورت سرب < مس < روی < کادمیوم بود، به طوری که این پژوهش غلظت بالای سرب و مس به فعالیت انسانی از جمله ترافیک، استهلاک عایق ترمز، احتراق مواد نفتی و تعداد زیاد کارگاه های تعمیر خودرو نسبت داده شد. در حالی که در در منطقه طبس غلظت روی بیشتر از مس بود که احتمالاً به دلیل سازندهای زمین شناسی و فعالیت های معدنی و ناخاصی های موجود در معدن زغال سنگ طبس باعث افزایش غلظت بعضی از عناصر مثل منگنز، آهن و روی در رسوبات بادی شده است. میرباقری و همکاران (Mirbagheri et al., 2019) با بررسی میزان آلودگی خاک و رسوبات دشت شهر کرد به فلزات سنگین گزارش نمودند

منابع

1. Abdollahi, M., & Shahbazi, B. (2005). Removal of pyrite from Tabas coal (Mezino 2) by reverse flotation method. 25th Earth Sciences Meeting. Tehran-Iran. <https://civilica.com/doc/94124>
2. Aghanabati, S.A. (2004). *Geology of Iran*. Geological Survey and Mineral Exploration of Iran Press. Pp. 586. (In Persian)
3. Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *The Science of Total Environment*, 512-513, 143-153. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.025>.
4. Dakiky, M., & Khamis, M. (2002). Selective adsorption of chromium (VI) in industrial wastewater using low cost abundantly available adsorbents. *Advanced in Environmental Research*, 6, 533-540. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00079-X)
5. Fathi, T. (2014). *Study of ethnobotany of Tabas region*. M.Sc. Thesis. Payame Noor University branch of Mazandaran. (In Persian)
6. Ghanavati, N. (2018). Human health risk assessment of heavy metals in street dust in Abadan. *Iranian Journal of Health and Environment*, 11(1), 63-74. (In Persian with English abstract)
7. Griffin, D.W. (2007). Atmospheric movement of microorganisms in clouds of desert dust and implications for human health. *Clinical Microbiology Reviews*, 20(3), 459-477. <https://doi.org/10.1128/CMR.00039-06>
8. Hafez Darbani, M., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroodi, A., Mazloomi Bajestani, A.R. (2012). Geology, alteration, mineralization and geochemistry of Gazu prospect area, southeast of Tabas. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy*, 20(4), 713-726. (In Persian)
9. Li, J., Okin, G.S., Alvarez, L., & Epstein, H. (2008). Effects of wind erosion on the spatial heterogeneity of soil nutrients in two desert grassland communities. *Biogeochemistry*, 88(1), 73-88. <http://doi.org/10.1007/s10533-008-9195-6>.
10. MacDonald, D.D., Ingersoll, C.G., & Berger, T. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1), 20-31. <http://doi.org/10.1007/s002440010075>.
11. Mirbagheri, S., Naderi, M., Salehi, M.H., & Mohammadi, J. (2019). Study of soils and aeolians pollution to heavy metals in Shahrekord plain. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 23(3), 327-339. (In Persian with English abstract)
12. Moradi, Q., & Mirzaei, R. (2017). Spatial variability analysis of heavy metals in street dusts of Kashan City. *Iranian Journal of Health and Environment*, 9(4), 443-456.
13. Moreno, T., Querol, X., Alastuey, A., Viana, M., Salvador, P., De la Campa, A.S., & Gibbons, W. (2006). Variations in atmospheric PM trace metal content in Spanish towns: illustrating the chemical complexity of the inorganic urban aerosol cocktail. *Atmospheric Environment*, 40(35), 6791-6803. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.05.074>.
14. Naimabadi, A., Ghadiri, A., Idani, E., Babaei, A.A., Alavi, N., Shirmardi, M., & Goudarzi, G. (2016). Chemical composition of PM10 and its in vitro toxicological impacts on lung cells during the Middle Eastern Dust (MED) storms in Ahvaz, Iran. *Environmental Pollution*, 211, 316-324. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.006>.
15. Siyahati Ardakani, Gh.R., Mirsanjari, M., Azimzadeh, H.R., & Solgi, E. (2018). The environmental assessment of some heavy metals in surface soil around pelletizing industries and Ardakan steel. *Iranian Journal of Health and Environment* 11(3): 449-64. (In Persian with English abstract)
16. Rajabzadeh, M.A., Ghorbani, Z., Jalalifard, M., & Mohammadzadeh, M. (2015). Geochemistry and assessment of toxic elements recovery in Parvadeh coal mine, Tabas. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 96, 177-188. (In Persian with English abstract)
17. Solgi, E., & Abdollahi, S. (2022). Investigation of heavy metals contamination in atmospheric deposition of Zahedan city by using pollution indices. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 73-86. (In Persian with English abstract)
18. Wei, X., Gao, B., Wang, P., Zhou, H., & Lu, J. (2015). Pollution characteristics and health risk Assessment of heavy metals in street dusts from different functional areas in Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 112, 186-192. <http://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.005>.
19. Yazdi, M. (2004). *Geochemical properties of coals in the Mazino deposit, Tabas coalfield, Iran*, 32nd international Geological Congress. Florence, Italy, Part2, pp.881. (In Persian with English abstract)
20. Yazdi, M. (2005). *Geological properties of coals in the Mazino deposit, Tabas coalfield, Iran*. International Earth Sciences Colloquium on the Aegean Regions. Turkey, IESCA-2005, pp.173. (In Persian)



The Effect of Combined Use of Vermicompost and Poultry Manure on the Growth and Yield of Cucumber Plants in Different Conditions of Deficit Irrigation

M. Behdarnejad¹, H. Piri^{2*}, M. Delbari³

Received: 23-10-2022

Revised: 02-02-2023

Accepted: 12-02-2023

Available Online: 12-02-2023

How to cite this article:

Behdarnejad, M., Piri, H., & Delbari, M. (2023). The effect of combined use of vermicompost and poultry manure on the growth and yield of cucumber plants in different conditions of deficit irrigation. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 237-259. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79296.1215>

Introduction

In sustainable farming systems, the use of organic fertilizers is of particular importance in increasing crop production and maintaining sustainable soil fertility. Nowadays, the consumption of organic foods is introduced to consumers as an alternative. The result of the application of chemical products is the crisis of environmental pollution, soil and water resources, and the health risk to human society. Nowadays, in order to reduce the effects of misuse of chemical inputs, chemical fertilizers can be replaced with organic biological fertilizers, including animal manure, compost, and green manure. In this regard, chicken manure has a positive effect on the physical, chemical, and biological characteristics of the soil, and due to its richness in uric acid, the nitrogen contained in it is used by the plant much faster than the nitrogen of other organic fertilizers. Vermicompost is considered a good source of soil fertility due to its organic materials. Organic matter in the soil improves the permeability and drainage of the soil and also prevents excessive dryness of the soil by maintaining sufficient moisture. Despite the fact that vermicompost can be used as a fertilizer in organic farming, high levels of this fertilizer may cause salinity effects in the plant, which affects the growth and development of the plant and even it can cause the death of cucumber as one of the crops sensitive to soil and water salinity. The cucumber (*Cucumis sativus* L.) is one of the important vegetables that can be produced in a greenhouse all year round. Fresh consumption of cucumber throughout the year has increased its production. The development of technology and the short growth period of this product has made it possible to grow it in most climate zones. Therefore, in this research, the effects of different levels of water deficit with the simultaneous application of vermicompost and chicken manure on cucumber plants in the Behbahan region have been investigated.

Materials and Methods

In this study, different levels of irrigation water, vermicompost, and poultry manure on ground cucumber were investigated. The experiment was performed in the form of split plots based on completely randomized design and the form of stacks. Treatments included three levels of poultry manure (2, 4 and 8 ton ha⁻¹), three levels of vermicompost (3, 6 and 9 ton ha⁻¹) and three levels of water stress (100, 75 and 50% of plant water requirement). Both vermicompost and poultry manure were applied to the soil before planting. Harvest was done every three days. Fruit weight, diameter and length, plant length, the protein of the dry matter of the fruit percentage, and leaf chlorophyll in each plot were carefully measured. Also, the yield and water productivity at the end of the season were calculated.

Water productivity

Referring to the yield to irrigation water ratio, is obtained by the following relation (Payero *et al.*, 2009):

$$WP=Y/IR$$

(1)

In this equation, WP represents water productivity (kg/m³), Y denotes the yield (kg/ha), and IR shows the amount of irrigation water (m³/ha).

1, 2 and 3- Master Student and Associate Professors, Department of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.79296.1215](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79296.1215)

Statistical analysis

The analysis of variance for the results obtained from different treatments was conducted using SAS software (SAS 9.1, SAS Institute, Cary, NC, USA). The mean values of the main factors and interactive effects were compared using the Duncan method at the 1% and 5% levels of significance.

Results and Discussion

The results showed that irrigation, poultry manure and vermicompost had a significant effect on the measured parameters at the level of one and five percent probability. Reduction of water consumption reduced yield and yield components, but in this regard, no significant difference was observed between 100% and 75% of water requirement. The highest yield was obtained in the treatment of 100% of plant water requirement and consumption of 4 ton ha⁻¹ of poultry manure and 6 ton ha⁻¹ of vermicompost, in this regard, no significant difference was observed with the treatment of 75% of water requirement. According to the results obtained from this study, it can be said that there is no significant difference in terms of yield between treatments of 75 and 100% of plant water requirement. Therefore, the amount of water given to the plant can be reduced to 75% of the plant water requirement, and with proper management, less water can be consumed without a significant reduction in crop yield. Examining the effects of irrigation water on the amount of the protein of the dry matter of the fruit showed that the highest amount of the protein of the dry matter of the fruit (56.31%) was obtained in the treatment of 75% of the water requirement and the protein of the dry matter of the fruit was less in other treatments. The interaction effect of vermicompost and poultry manure resulted in the highest percentage of cucumber protein at a treatment of 4 tons ha⁻¹ of poultry manure and 6 tons ha⁻¹ of vermicompost (58.42%). However, when the simultaneous use of 8 tons ha⁻¹ of poultry manure and different levels of vermicompost was employed, the percentage of protein in the fruit's dry matter decreased. The combination of drought stress, poultry manure, and vermicompost, along with their interaction effects, significantly influenced the chlorophyll a and b values at both the 1% and 5% probability levels. As the depth of irrigation water decreased, the amounts of chlorophyll a and b also decreased. The treatment with 100% water requirement of the plant showed the highest amounts of chlorophyll a (0.63 mg/g fresh weight) and chlorophyll b (0.36 mg/g fresh weight). However, no significant difference was observed compared to the 75% treatment. Regarding the interactions between vermicompost and poultry manure, it was found that when using 6 tons ha⁻¹ of vermicompost to reduce yield and its components, the use of poultry manure should be reduced to 4 tons ha⁻¹. On the other hand, when higher levels of vermicompost (9 tons ha⁻¹) are used, the application of poultry manure should be reduced to 2 tons ha⁻¹.

Result

According to the results obtained from this research, it can be said that there is no significant difference in performance between the treatments of providing 75% and 100% of the water requirement of the plant, therefore, the amount of water given to the plant can be reduced to the amount of 75% of the water requirement of the plant. With proper management, less water can be consumed without significantly reducing the yield of the product.

Keywords: Chlorophyll, Fertilizer management, Protein, Water productivity, Yield

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۵۹-۲۳۷

تأثیر مصرف تلفیقی ورمی کمپوست و کود مرغی در شرایط مختلف کم آبیاری بر رشد و عملکرد گیاه خیار

مجید بهدارنژاد^۱ - حلیمه پیری^{۲*} - معصومه دلبری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۳

چکیده

در این تحقیق به بررسی سطوح مختلف آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی بر خیار پرداخته شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کامل تصادفی انجام گرفت. تیمارها شامل ۳ سطح کود مرغی (۲، ۴ و ۸ تن در هکتار)، ۳ سطح ورمی کمپوست (۳، ۶ و ۹ تن در هکتار) و ۳ سطح عمق آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) بود. ورمی کمپوست و کود مرغی هر دو قبل از کاشت به خاک داده شد. برداشت محصول هر ۳ روز یکبار انجام شد. وزن، قطر و طول میوه، طول بوته، درصد پروتئین و کلروفیل برگ در هر کرت به دقت اندازه‌گیری شد. همچنین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آبیاری در پایان فصل محاسبه شدند. نتایج نشان داد که تیمار آبیاری، کود مرغی و ورمی کمپوست بر پارامترهای اندازه‌گیری شده در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد تأثیر معنی‌داری داشت. کاهش مصرف آب باعث کاهش عملکرد و اجزای عملکرد گردید اما از این نظر بین تیمار ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بیشترین مقدار عملکرد در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. بررسی اثرات میزان آب آبیاری بر مقدار پروتئین ماده خشک میوه نشان داد بیشترین مقدار پروتئین ماده خشک میوه (۵۶/۳۱ درصد) در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی به دست آمد و پروتئین ماده خشک در سایر تیمارها کمتر بود. در بررسی اثر متقابل ورمی کمپوست و کود مرغی بیشترین درصد پروتئین ماده خشک خیار در تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست (۵۸/۴۲ درصد) حاصل شد. استفاده هم‌زمان ۸ تن در هکتار کود مرغی و مصرف سطوح مختلف ورمی کمپوست درصد پروتئین ماده خشک را کاهش داد. اثر عمق آب آبیاری، کود مرغی و ورمی کمپوست و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد بر مقادیر کلروفیل a و b تأثیرگذار بود. با کاهش عمق آب آبیاری مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۰/۶۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۰/۳۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. اثر متقابل ورمی کمپوست و کود مرغی نشان داد استفاده ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست بیشترین تأثیر را بر مقادیر کلروفیل داشت. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مقدار آب داده شده به گیاه را به مقدار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه کاهش داد و با مدیریت مناسب می‌توان بدون کاهش معنی‌دار عملکرد محصول، مقدار آب کمتری مصرف نمود. اثرات متقابل ورمی کمپوست و کود مرغی نشان داد در استفاده ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست برای جلوگیری از کاهش عملکرد و اجزای آن بایستی مصرف کود مرغی تا ۴ تن در هکتار کاهش یابد؛ اما زمانی که سطوح بیشتر ورمی کمپوست (۹ تن در هکتار) استفاده شود، مصرف کود مرغی باید تا ۲ تن در هکتار کاهش یابد.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری مصرف آب، پروتئین ماده خشک، عملکرد، کلروفیل، مدیریت کود دهی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h_piri2880@uoz.ac.ir)

مقدمه

در نظام‌های کشاورزی پایدار، کاربرد کودهای آلی اهمیت ویژه‌ای در افزایش تولید محصول و حفظ حاصلخیزی پایدار خاک دارد (Rezvani Moghaddam et al., 2019).

کشاورزی ارگانیک یک نظام پایدار اقتصادی، اجتماعی و دوستدار محیط‌زیست است که به‌عنوان یکی از راهکارهای کاهش پیامدهای منفی کشاورزی صنعتی متداول در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است.

نتیجه مصرف فرآورده‌های شیمیایی بحران آلودگی محیط‌زیست، منابع خاک و آب و مخاطره سلامت جامعه بشری است. به این منظور تلاش‌های گسترده‌ای برای یافتن راهکارهای مناسب برای بهبود کیفیت خاک، محصولات کشاورزی و حذف آلاینده‌ها انجام شده است. کاهش مخاطرات زیست‌محیطی همگام با افزایش عملکرد گیاهان زراعی نیازمند به‌کارگیری روش‌های نوین زراعی نیز می‌باشد (Maleksaidi et al., 2010). امروزه به‌منظور کاهش اثرات سوء مصرف نهاده‌های شیمیایی می‌توان کودهای شیمیایی را با مصرف کودهای آلی از جمله کودهای حیوانی، کمپوست و کود سبز جایگزین کرد (Norozi et al., 2010). کودهای آلی دارای عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به فرم قابل جذب بوده و تأثیر مثبت بر متابولیسم گیاه دارند (Theunissen et al., 2010). کاربرد کود آلی در خاک باعث پوک شدن، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت و دانه‌بندی خاک شده و ویژگی‌های فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد، ضمن این‌که با افزایش قدرت حاصلخیزی خاک رشد محصول را زیاد و در نتیجه کارایی مصرف آب را ارتقا می‌دهد (Eghball et al., 2001). در این راستا کودهای مرگی تأثیر مثبت بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی خاک دارند و به لحاظ غنی بودن از اسیداوریک، نیتروژن موجود در آن بسیار سریع‌تر از نیتروژن سایر کودهای آلی مورد استفاده گیاه قرار می‌گیرد (Anwar et al., 2005). در مورد تأثیر منابع مختلف کود آلی بر پاسخ‌های گیاهی و ویژگی‌های خاک، تحقیقات گسترده‌ای صورت گرفته است. قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2008) نشان دادند که کاربرد کودهای مرگی، گاوی و کمپوست، عملکرد گوجه‌فرنگی را نسبت به شاهد و کاربرد کود شیمیایی نیتروژن و فسفر افزایش داد و سبب زودرسی محصول شد. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2010) نشان دادند که کم کردن کود نیتروژن و اضافه کردن کود دامی، تأثیر معنی‌داری بر عملکرد گوجه‌فرنگی و خیار گلخانه‌ای نداشت، اما منجر به کاهش تلفات نیتروژن از طریق آبشویی گردید. ظفری و همکاران (Zafari et al., 2019) اثر کودهای شیمیایی و آلی را بر رشد و عملکرد ارقام نخود تحت شرایط دیم مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد رشد و عملکرد نخود در تیمارهای حاوی کودهای آلی در بیشتر موارد

نتایجی بهتر از کود شیمیایی داشت؛ بنابراین می‌توان کودهای آلی را به‌عنوان جایگزین‌های مناسبی برای کودهای شیمیایی معمول در زراعت نخود دیم مدنظر قرار داد.

ورمی‌کمپوست به دلیل داشتن مواد آلی، منبع خوبی برای حاصلخیزی خاک محسوب می‌شود. مواد آلی در خاک موجب اصلاح نفوذپذیری و بهبود زهکشی خاک گردیده و همچنین با حفظ رطوبت کافی، از خشکی بیش از اندازه خاک جلوگیری می‌کند (Ghaderi et al., 2010). ورمی‌کمپوست دارای ارزش تغذیه‌ای فراوانی برای محصولات زراعی بوده و مصرف آن‌ها گامی مؤثر در روند توسعه کشاورزی پایدار و حفظ محیط‌زیست می‌باشد. آذر می و همکاران (Azarmi et al., 2009) در بررسی اثر ورمی‌کمپوست تهیه شده از کود گوسفند بر عملکرد و اجزای عملکرد دو رقم خیار گلخانه‌ای به این نتیجه رسیدند که کاربرد ۳۰ تن از این کود سبب افزایش عملکرد به میزان ۲۵ درصد نسبت به شاهد در این ارقام شد، اما اجزای عملکرد فقط تا سطح ۲۰ تن در هکتار بهبود یافت. پیری و راشکی (Piri and Rashki, 2019) به بررسی اثر سطوح مختلف آب آبیاری، ورمی کمپوست و چای کمپوست بر رشد و عملکرد گیاه خیار گلخانه‌ای پرداختند و نتیجه گرفتند که تیمارها بر صفات رشد و عملکرد میوه در سطح ۵ و ۱ درصد تأثیر معنی‌داری داشت. همچنین بیان داشتند در شرایط کم‌آبی استفاده از سطح ۷۵ درصد چای کمپوست و ورمی کمپوست باعث از بین رفتن تنش آبی می‌شود و در زمان استفاده از سطح ۱۰۰ درصد ورمی کمپوست باید از سطح ۵۰ درصد چای کمپوست استفاده کرد؛ بنابراین اثرات ورمی کمپوست و عصاره آن بر رشد گیاه به غلظت آن‌ها بستگی دارد.

با وجود همه مزایایی که در افزایش عملکرد برای ورمی کمپوست گزارش شده است؛ اما استفاده بیش از اندازه آن به دلیل بیش بودن مقدار مواد مغذی نسبت به نیاز گیاه (Hussain et al., 2015)، افزایش شوری خاک، به‌ویژه در مراحل اولیه رشد گیاه (Atiyeh et al., 2001)، زیادبودن مواد با طبیعت هیومیک و فنولی (Ievinsh, 2011) در محیط ریشه، مانع رشد گیاه می‌شود. اگرچه برخی مطالعات نشان داده‌است که افزایش ورمی کمپوست نسبت به افزایش برخی کمپوست‌های دیگر شوری کمتر و در نتیجه کاهش محصول کمتری حاصل می‌کند (Ebrahimi et al., 2019).

همان‌طور که از تحقیقات مشاهده شد، علی‌رغم این‌که ورمی کمپوست می‌تواند به‌عنوان یک کود آلی در کشاورزی ارگانیک مورد استفاده قرار گیرد، اما سطوح بالای این کود ممکن است سبب ایجاد اثرات شوری در گیاه شود که بر روی رشد و نمو گیاه تأثیر داشته و حتی می‌تواند باعث مرگ خیار به‌عنوان یکی از محصولات حساس به شوری خاک و آب شود (Terakado et al., 2006).

خیار (*Cucumis sativus* L.) یکی از سبزی‌های مهمی است که

مورد تأثیر میزان آب آبیاری و ورمی کمپوست بر گیاهان مختلف، اما در مورد تأثیر متقابل این پارامترها بر خیار گزارشی وجود ندارد. لذا در این تحقیق به بررسی سطوح مختلف کم آبی همراه با کاربرد همزمان ورمی کمپوست و کود مرغی بر گیاه خیار در منطقه بهبهان پرداخته شده است.

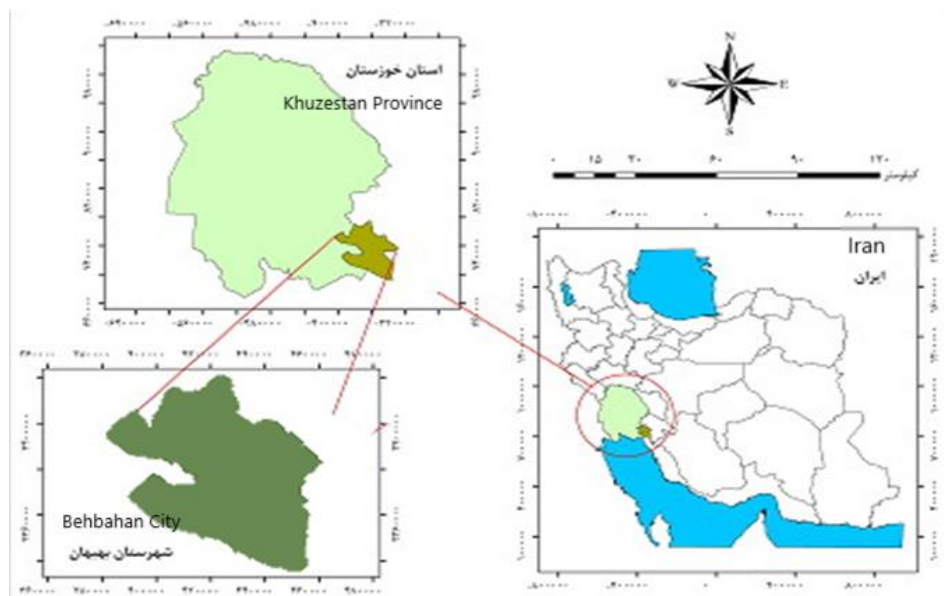
مواد و روش‌ها

این تحقیق در شهریور ماه ۱۳۹۹ در مزرعه تحقیقاتی در شهرستان بهبهان انجام شد. طول جغرافیایی آن ۵۰ درجه و ۲۳ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۶ دقیقه عرض شمالی و ارتفاع آن ۳۱۳ متر از سطح دریا می‌باشد. حداکثر دمای آن ۵۰ درجه در ماه‌های تیر و مرداد و حداقل آن صفر درجه در ماه‌های آذر و دی است (Movahedi et al., 2012). شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی اثر ورمی کمپوست و کود مرغی در سطوح مختلف آب آبیاری بر خیار، آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کامل تصادفی انجام گرفت. تیمارها شامل ۳ سطح کود مرغی (۲، ۴ و ۸ تن در هکتار)، ۳ سطح ورمی کمپوست (۳، ۶ و ۹ تن در هکتار) و ۳ سطح عمق آب آبیاری (۷۵، ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) بود. ورمی کمپوست استفاده شده در تحقیق، محصول شرکت کرم و کمپوست سبز خوزستان است که با استفاده از کود دامی و گونه کرم خاکی بنام *Eisenia foetida* تولید شده است.

در تمام طول سال امکان تولید گلخانه‌ای آن وجود دارد. مصرف تازه خوری خیار در تمام طول سال بر اهمیت تولید آن افزوده است. توسعه تکنولوژی و دوره رشد کوتاه این محصول، امکان کشت آن را در اکثر مناطق آب و هوایی فراهم کرده است. نیاز آبی خیار بیش از سایر گیاهان مثل غلات بوده و حجم آب آبیاری در مراحل مختلف رشد خیار تأثیر زیادی بر رشد گیاه و محصول دارد (Wang et al., 2019). بنابراین، افزایش راندمان مصرف آب در تولید خیار منجر به صرفه‌جویی قابل توجه آب می‌شود. با این وجود، به دلیل حساسیت خیار به خشکی (Mao et al., 2003) اقدام برای افزایش راندمان صرفاً از طریق کاهش آب مورد استفاده، راهکار مناسبی به‌نظر نمی‌رسند. گرچه، نتایج برخی تحقیقات گذشته (Yang et al., 2015) نشان می‌دهد که استفاده از مواد افزودنی می‌تواند به کاهش تنش خشکی حاصل از کم آبیاری یا شرایط محیطی در گیاه کمک کند. اما، این پژوهش‌ها در مورد خیار معدوم می‌باشد. الماگید و سمیدا (El-Mageed and Semida, 2015) کاهش تأثیر تنش آبی با استفاده از کود آلی معدنی بر روی محصول خیار را بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از کودهای آلی معدنی خسارت‌های وارده بر اثر تنش آبی را می‌توان کاهش داد. همچنین، انجام کم آبیاری همراه با استفاده از کودهای آلی- معدنی بهره‌وری مصرف آب را به حداکثر مقدار خود می‌رساند.

استفاده از کم آبیاری و ورمی کمپوست دو اقدام رایج در جهت پایداری تولیدات کشاورزی می‌باشند. با وجود انجام تحقیقات بسیار در



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور ایران و استان خوزستان
Figure 1- Location of the study area in Iran and Khuzestan province

(۱)

در این معادله: d عمق آبیاری (متر)، θ_{FCi} و θ_i به ترتیب رطوبت حجمی خاک در حالت ظرفیت زراعی و قبل از آبیاری در لایه $\Delta z, i=1$ ضخامت لایه (متر) و n تعداد اعماق نمونه برداری خاک (در این تحقیق دو عمق ۳۰-۶۰ و ۰-۳۰ سانتی متری از سطح خاک) می باشد.

با به دست آوردن عمق آب آبیاری در هر نوبت با استفاده از رابطه (۱)، حجم آب مورد نیاز برای هر کرت از ضرب کردن عمق به دست آمده در مساحت کرت محاسبه شد و با استفاده از کنتورهای نصب شده بر روی هر یک از لوله های آبرسان اندازه گیری و در اختیار گیاه قرار گرفت. حجم آب سایر تیمارها بر اساس این حجم تعیین و اعمال گردید. برای آبیاری هر ردیف کشت، یک لوله تیپ آبیاری قطره ای با قطر ۱۶ میلی متر، با قطره چکان هایی به فاصله ۳۰ سانتی متر و آبدی ۴ لیتر در ساعت در واحد متر استفاده شد. جدول ۴ حجم آب مورد استفاده در هر تیمار را نشان می دهد.

کرت ها به ابعاد ۴×۳ (متر در متر) و فاصله ۱ متر از یکدیگر در نظر گرفته شد. در هر کرت تعداد پنج جوی و پشته احداث و بذریه رقم *F1 clause officer* در عمق ۳ سانتی متری از خاک و به فاصله ۳۰ سانتی متر از یکدیگر روی ردیف ها کشت شدند. فاصله بین ردیف های گیاهی ۷۵ سانتی متر در نظر گرفته شد. ورمی کمپوست و کود مرغی هر کدام در ۳ سطح و قبل از کاشت به هر یک از کرت ها اضافه شدند. تمامی کرت ها تا زمان ۴ برگی شدن خیارها به صورت یکسان آبیاری شدند. سپس تیمارهای مقادیر مختلف عمق آب آبیاری اعمال گردید.

برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، آب، ورمی کمپوست و کود مرغی مورد استفاده در جداول ۱ تا ۳ آورده شده است.

محاسبات آبیاری

حجم آب آبیاری قبل از هر نوبت آبیاری با استفاده از رابطه ۱ تعیین شد (Liue et al., 2006).

$$d = \sum_{i=1}^n (\theta_{FCi} - \theta_i) \Delta z \quad (۱)$$

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the soil

عمق Depth (cm)	بافت خاک Soil texture	هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	pH	نیتروژن کل Total Nitrogen (%)	فسفر قابل جذب Available phosphorus (mg.kg ⁻¹)	پتاسیم قابل جذب Available potassium (mg.kg ⁻¹)
0-30	Loam-sand	0.588	7.58	0.087	48.23	425.6

جدول ۲- برخی خصوصیات شیمیایی آب آبیاری

Table 2- Some chemical characteristics of irrigation water

Table 2. Some chemical characteristics of irrigation water									
آنیون ها Anions (meq.L ⁻¹)			کاتیون ها Cations (meq.L ⁻¹)				سختی کل TDS (mg.L ⁻¹)	EC (dS.m ⁻¹)	pH
SO ₄ ²⁻	Cl	HCO ₃ ⁻	K	Na	Mg	Ca			
6.79	9.87	1.82	0.13	8.99	5.7	4.6	1.68	1.88	7.71

جدول ۳- برخی خصوصیات شیمیایی ورمی کمپوست و کود مرغی مورد استفاده در تحقیق

Table 3- Some chemical characteristics of the vermicompost and poultry manure used in research

هدایت الکتریکی EC (dS.m ⁻¹)	اسیدیته pH	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	فسفر Phosphorus (%)	پتاسیم Potassium (%)
5.3	6.5	1.65	1.2	1.5
6.1	8.4	1.56	1.86	2.12
ورمی کمپوست (Vermicompost)				
کود مرغی (Poultry manure)				

جدول ۴- حجم کل آب مورد استفاده در هر تیمار
Table 4- The Total volume of water used in each treatment

	I3 ۱۰۰ درصد نیاز آبی % 100 water requirement	I2 ۷۵ درصد نیاز آبی % 75 water requirement	I1 ۵۰ درصد نیاز آبی % 50 water requirement
حجم آب مصرفی Volume of water used (m ³ .ha ⁻¹)	10762.56	8071.92	5381.82

۱۰۰ درصد نیاز آبی و کمترین آن در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی (۱۰۳/۶۳ گرم) به دست آمد؛ اما از این نظر بین تیمارهای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه تفاوت معنی دار مشاهده نشد. مقادیر ورمی کمپوست بر وزن میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود. بیشترین وزن میوه (۱۱۸/۱۲ گرم) با مصرف ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد. استفاده بیشتر از ورمی کمپوست باعث کاهش وزن میوه شد به طوری که وزن میوه در تیمار مصرف ۳ تن در هکتار ورمی کمپوست بیشتر از تیمار ۹ تن در هکتار مصرف ورمی کمپوست بود. کودهای آلی با ایجاد تغییرات مثبت بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و تأمین به موقع عناصر مورد نیاز گیاه در طی فصل رشد، می توانند شرایط بهینه ای را برای افزایش وزن میوه ایجاد نمایند. آرانکون و همکاران (Arancon et al., 2004) و فلاحی (Fallahi, 2009) در تحقیقات خود گزارش کردند استفاده از ورمی کمپوست باعث افزایش وزن خشک اندام هوایی بادرنجبویه و توت فرنگی شد. با وجود همه مزایایی که در افزایش عملکرد برای ورمی کمپوست گزارش شده است. افزایش ورمی کمپوست، بیش از حد مشخص، مانند بسیاری از مواد افزودنی موجب ایجاد شوری در محیط ریشه شده و عدم شستشوی نمک به میزان کافی مانع رشد گیاه و کاهش قطر، طول و وزن میوه می شود (Atiyeh et al., 2001).

مقادیر کود مرغی نیز بر وزن میوه در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار بود. بیشترین مقدار وزن میوه با مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی حاصل شد. مقادیر کمتر و بیشتر از این تیمار باعث کاهش وزن میوه شد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۸) نشان داد در تیمار آبیاری کامل مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی بیشترین وزن میوه (۱۲۵/۶۱ گرم) را داشت که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی (۱۲۰/۴۲ گرم) تفاوت معنی دار نداشت. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی با مصرف ۲ تن در هکتار کود مرغی بیشترین وزن میوه حاصل شد و استفاده از ۴ و ۸ تن در هکتار کود مرغی باعث کاهش وزن میوه شد.

بهره وری مصرف آب (WP^۱)

عبارت است از: نسبت محصول تولید شده به آب آبیاری و از رابطه (۴) محاسبه خواهد شد (Payero et al., 2009).

$$WP = Y/IR \quad (۲)$$

در این رابطه، WP: بهره وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y: مقدار محصول برداشت شده (کیلوگرم در هکتار)، IR: مقدار آب آبیاری (مترمکعب در هکتار)

نمونه برداری گیاهی

پس از ۵۰ روز از رشد گیاه، برداشت و نمونه برداری گیاهی جهت تعیین اثرات سطوح آبی و کودی، انجام شد. از هر کرت دو ردیف وسط انتخاب و برداشت از آن ها انجام شد. تعداد میوه، وزن، قطر و طول میوه ها در همه کرت ها اندازه گیری شدند. همچنین پارامترهای کیفی مقادیر کلروفیل a و b و درصد پروتئین ماده خشک میوه نیز به ترتیب به روش آرنون (Arnon, 1967) و استون و گیفورد (Stone and Gifford, 1997) اندازه گیری شدند. کلروفیل در برگ هایی که تازه و شاداب بودند، اندازه گیری شد. بلافاصله بعد از برداشت برگ، برگ های تازه در پاکت گذاشته و به آزمایشگاه منتقل و به روش آرنون مقادیر کلروفیل اندازه گیری شد. میانگین اندازه پارامترهای مورد بررسی جهت تجزیه و تحلیل استفاده شد. عملکرد و بهره وری مصرف آب آبیاری نیز در پایان برداشت برای هر تیمار محاسبه شد. داده ها با استفاده از نرم افزار SAS 9.1 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و میانگین ها با آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس صفات کمی و کیفی اندازه گیری شده در جداول ۵ و ۶ آمده است. همان طور که مشاهده می گردد مقدار آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی و اثرات متقابل آن ها در سطوح احتمال ۱ و ۵ درصد بر مقادیر اندازه گیری شده تأثیر معنی دار داشت. **وزن میوه:** مقایسه میانگین صفات اندازه گیری شده در جدول ۷ نشان داده شده است. مقدار آب آبیاری تأثیر معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد بر وزن میوه داشت. بیشترین وزن میوه (۱۱۷/۲۷ گرم) در تیمار

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات کمی اندازه‌گیری شده

Table 5- Results of analysis of variance (mean square and degree of freedom) of measured quantitative traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Average of Squares				
		بهره‌وری آب Water productivity (kg. m ⁻³)	عملکرد Yield (ton)	طول بوته Plant length (cm)	قطر میوه Fruit diameter (cm)	وزن میوه Fruit weight (gr)
R (تکرار) Repeat	2	4.29 ^{ns}	3.51 ^{ns}	0.26 ^{ns}	0.127 ^{ns}	18004.03 ^{ns}
A (آبیاری) Irrigation	2	523.29**	24573.12**	215.23**	3.08**	2534.15*
R*A	4	4.11	1.43	1.74	0.235	15675.27
B (کود مرغی) Poultry manure	2	98.76**	2571.56**	42.71**	0.75**	18735.42*
A*B	4	74.69**	1983.42**	18.72**	2.47**	16489.21*
R*B(A)	12	5.61	3.19	1.15	0.108	18531.21
C (ورمی کمپوست) Vermicompost	2	487.36**	14264.64**	173.42**	5.24**	23571.05*
A*C	4	57.23**	1754.26*	25.84**	3.02**	16235.12*
B*C	4	36.71*	375.85**	7.63**	0.75**	23184.61*
A*B*C	8	17.45**	415.52**	10.31*	0.76*	25354.21*
R*C(A)	36	5.64	4.74	1.25	0.105	22321.14
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation		5.63	7.9	5.78	6.54	8.5

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

*and **significance at the probability level of five percent and one percent, ns non-significance.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات و درجه آزادی) صفات کیفی اندازه‌گیری شده

Table 6- The results of analysis of variance (mean square and degree of freedom) of measured qualitative traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Average of Squares		
		کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gr ⁻¹)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gr ⁻¹)	پروتئین ماده خشک میوه The protein of the dry matter of the fruit (%)
R (تکرار) Repeat	2	25167.24 ^{ns}	0.45 ^{ns}	0.86 ^{ns}
A (آبیاری) Irrigation	2	2574.25*	6.08**	341.27**
R*A	4	31426.02	0.25	1.19
B (کود مرغی) Poultry manure	2	28627.12*	0.48**	28.53**
A*B	4	20543.28*	3.87**	26.73**
R*B(A)	12	18722.01	0.07	1.17
C (ورمی کمپوست) Vermicompost	2	32476.52*	4.34**	156.75**
A*C	4	16238.62*	3.57**	32.24**
B*C	4	26854.31*	1.05**	6.12**
A*B*C	8	25615.06*	0.56*	12.18*
R*C(A)	36	22736.03	0.33	1.08
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation		9.71	5.75	6.34

* و ** معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد و یک درصد، ns عدم معنی‌داری.

*and **significance at the probability level of five percent and one percent, ns non-significance.

اثرات متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۹) نشان داد بیشترین وزن میوه (۱۲۲/۵۱ گرم) در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و مصرف ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست تفاوت معنی دار حاصل نشد. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی که شدت تنش زیاد بود، بیشترین وزن میوه با مصرف ۳ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد و استفاده بیشتر از ورمی کمپوست باعث کاهش وزن میوه شد.

اثرات متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (جدول ۱۰) نشان داد بیشترین وزن میوه از تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد که از این نظر با تیمار ۲ تن در هکتار کود مرغی و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست تفاوت معنی دار نداشت. همچنین از جدول مشاهده می گردد در تیمارهایی که مقدار کود مرغی کمتر مصرف شده است می توان مقادیر بیشتری ورمی کمپوست استفاده کرد. **قطر و طول میوه:** اثرات مقدار آب آبیاری (جدول ۷) نشان داد کاهش مقدار آب باعث کاهش قطر و طول میوه شد و از این نظر بین تمامی تیمارها تفاوت معنی دار در سطح احتمال ۵ درصد مشاهده گردید.

بیشترین مقدار قطر و طول در تیمار آبیاری کامل (به ترتیب ۳/۴۲ و ۱۰/۳۵ سانتی متر) و کمترین مقادیر آن ها در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی (به ترتیب ۳/۱۱ و ۶/۸۱ سانتی متر) حاصل گردید. مقدار ورمی کمپوست نیز تأثیر معنی دار بر قطر و طول میوه نداشت. بیشترین مقادیر آن ها در تیمار ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست و کمترین آن ها در تیمار ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد. مقادیر کود مرغی بر اندازه طول و قطر میوه در سطح پنج درصد تأثیر معنی دار نداشت. بیشترین مقادیر از تیمار ۴ تن در هکتار مصرف کود مرغی حاصل شد. مقادیر بیشتر و کمتر از این مقدار باعث کاهش طول و قطر میوه شد. اثر متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۸) نشان داد بیشترین مقدار قطر و طول میوه از تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز آبی و مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی به دست آمد که با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی دار نداشت. در مقادیر پایین آب آبیاری (تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی) باید مصرف کود مرغی کاهش یابد. زیرا تیمارهای ۴ و ۸ تن در هکتار باعث کاهش قطر و طول میوه شد.

جدول ۷- مقایسه میانگین صفات کمی اندازه گیری شده

Table 7- Comparison of the average of measured quantitative traits

وزن میوه Fruit weight (gr)	قطر میوه Fruit diameter (cm)	طول بوته Plant length (cm)	عملکرد Yield (ton)	بهره‌وری آب Water productivity (kg. m ⁻³)	تیمار treatment
117.27a	3.42a	108.12a	36.21a	3.26b	۱۰۰٪ نیاز آبی Water %۱۰۰ requirement
114.54a	3.32a	95.32b	30.53a	3.65a	۷۵٪ نیاز آبی Water %75 requirement
103.63b	3.11b	74.79c	16..58b	3.12b	۵۰٪ نیاز آبی Water %50 requirement
105.71b	3.3a	97.43b	26.52b	2.94b	3 مقدار ورمی کمپوست
118.12a	3.4a	108.87a	35.74a	3.22a	6 (تن در هکتار)
95.46c	3.1b	86.25c	21.68c	2.63c	9 Amount of vermicompost (ton.ha ⁻¹)
109.67c	3.41b	88.48c	30.29b	3.15b	2 مقدار کود مرغی
115.54a	3.83a	97.75c	3767a	3.54a	4 (تن در هکتار)
96.28c	3.11c	76.23c	24.38c	2.89c	8 Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)

در هر ستون میانگین های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

2004). آرگلو و همکاران (Arguello et al., 2006) در مطالعه خود بیان کردند استفاده از ورمی کمپوست باعث بهبود چشم‌گیر ارتفاع بوته شده است و این تأثیر مثبت به قابلیت تحریک‌کنندگی فعالیت میکروب‌های مفید خاک توسط ورمی کمپوست و توانایی آن در افزایش جذب عناصر معدنی پرمصرف و کم‌مصرف و پیامد آن بهبود در فرایند فتوسنتز، نسبت داده شد.

تأثیر کود مرغی بر طول بوته (جدول ۷) نشان داد با مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی بیشترین طول بوته (۹۷/۷۵ سانتی‌متر) حاصل شد و سطوح کمتر و بیشتر از این سطح باعث کاهش طول بوته گردید. اثر متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۸) نشان داد بیشترین طول بوته از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی به دست آمد. با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش سطوح مصرف کود مرغی طول بوته کاهش یافت اما در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و مصرف ۴ تن در هکتار نسبت به مصرف ۲ تن در هکتار کود مرغی طول بوته افزایش یافت که دلیل آن شاید عدم تأثیر معنی‌دار تیمار آبیاری کامل و تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی بر پارامترهای اندازه‌گیری شده باشد. اثر متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۹) نشان داد بیشترین طول بوته از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و مصرف ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد. با کاهش عمق آب آبیاری و افزایش سطوح ورمی کمپوست طول بوته کاهش یافت اما در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و مصرف ۶ تن در هکتار نسبت به مصرف ۳ تن در هکتار ورمی کمپوست طول بوته افزایش یافت. بنابراین می‌توان گفت در تیمارهای تنش آبی شدید جهت کاهش اثرات منفی تنش بایستی مقدار ورمی کمپوست مصرفی کاهش یابد. به نظر می‌رسد در تیمارهای تنش ملایم آبی ورمی کمپوست از طریق قدرت زیاد جذب آب و فراهم نمودن مطلوب عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف بر روی میزان فتوسنتز و تولید زیست‌توده تأثیر مثبت گذاشته و موجب بهبود ارتفاع بوته شده است (Tasdighi et al., 2014).

تحقیقات نشان‌دهنده وجود برهمکنش مثبت بین تنش‌های خشکی و مصرف ورمی کمپوست است. بررسی اثر متقابل آبیاری و ورمی کمپوست بر گیاه بابونه نشان داد که استفاده ۱۵ درصد ورمی کمپوست به همراه آبیاری در فواصل ۱۴ روز، بیشترین تأثیر را بر ارتفاع بوته گیاه بابونه آلمانی دارد (Babaei et al., 2010). اثر متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (جدول ۱۰) نشان داد بیشترین طول بوته (۱۰۲/۶۷ سانتی‌متر) در تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست مشاهده شد؛ که از این نظر با تیمار ۲ تن در هکتار کود مرغی و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست تفاوت معنی‌دار نداشت. همچنین از جدول مشاهده می‌گردد در سطوحی که مصرف کود مرغی کاهش می‌یابد برای جلوگیری از کاهش طول بوته باید مصرف ورمی کمپوست افزایش یابد.

اثر متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۹) نشان داد بیشترین مقدار طول و قطر میوه (به ترتیب ۱۱/۴۳ و ۳/۵۶ سانتی‌متر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. با کاهش بیشتر آب آبیاری (تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی) استفاده از سطوح بالای ورمی کمپوست باعث کاهش طول و قطر میوه شد و بیشترین مقادیر این پارامترها در این تیمار آبی با مصرف ۳ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد. مطابق تحقیقات می‌توان گفت سطوح بالای ورمی کمپوست ممکن است سبب ایجاد اثرات شوری در گیاه شود که بر روی رشد و نمو گیاه تأثیر داشته و باعث کاهش قطر و طول میوه شده است (Terakado et al., 2006).

طول بوته: با کاهش مقدار آب مصرفی طول بوته کاهش یافت (جدول ۷). بیشترین مقدار آن در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه (۱۰۸/۱۲ سانتی‌متر) و کمترین آن در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (۷۴/۷۹ سانتی‌متر) به دست آمد. یکی از اثرات تنش آبی بر گیاهان، کاهش ارتفاع گیاه می‌باشد. کاهش ترشح هورمون‌های رشد و افزایش مواد بازدارنده رشد در شرایط تنش کمبود آب، به عنوان یکی از دلایل اصلی کاهش رشد اندام‌های هوایی می‌باشد (Bayoumi et al., 2008). همچنین کاهش ارتفاع بوته در اثر تنش خشکی را می‌توان به کاهش در بزرگ شدن سلول و زوال برگ گیاه نسبت داد (Mirzaei et al., 2017). اثر ورمی کمپوست بر طول بوته (جدول ۷) نشان داد استفاده ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست نسبت به تیمار ۳ و ۹ تن در هکتار باعث افزایش طول بوته شد. بیشترین طول بوته ۱۰۸/۸۷ سانتی‌متر از تیمار ۶ تن در هکتار و کمترین آن ۸۶/۲۵ سانتی‌متر از تیمار ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست حاصل شد.

تحقیقات نشان داده است کاربرد ورمی کمپوست به صورت اختلاط با خاک سطحی تأثیر بسیار خوبی در روند رشد بوته‌های خیار دارد (Mirsohail and Gholami, 2008). ورمی کمپوست به دلیل داشتن هیومیک، فولیک و دیگر اسیدهای آلی باعث تحریک رشد گیاهان می‌شود (Ahmadpour et al., 2016). بررسی سطوح مختلف ورمی کمپوست (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ تن در هکتار) روی گیاه گوجه‌فرنگی نشان داد سطح ۲۰ تن در هکتار ورمی کمپوست باعث افزایش ارتفاع، تعداد و وزن میوه‌ها شد (Kashem et al., 2018).

مهم‌ترین دلیل در افزایش ارتفاع گیاهان در اثر استفاده از کودهای آلی ورمی کمپوست در بستر کاشت گیاه، وجود برخی تنظیم‌کننده‌های رشد مانند ایندول استیک اسید گزارش شده است (Wang et al., 2007). همچنین افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک، تولید ترکیبات هورمونی در محیط ریزوسفر و بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش جذب مواد غذایی توسط گیاه از دیگر دلایل افزایش طول بوته گیاه در اثر مصرف ورمی کمپوست می‌باشد (Adediran et al., 2017).

جدول ۸- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و کود مرغی (A×B) بر پارامترهای کمی اندازه گیری شده

Table 8- Comparison of the average interaction effects of the amount of irrigation water and poultry manure (B×A) on the measured quantitative parameters

مقدار آب آبیاری Amount of irrigation water (m ³)	مقدار کود مرغی Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)	بهره وری آب Water productivity (kg. m ⁻³)	عملکرد Yield (ton)	طول بوته Plant length (cm)	طول میوه Fruit length (cm)	قطر میوه Fruit diameter (cm)	وزن میوه Fruit weight (gr)
۱۰۰٪ نیاز آبی	2	3.05c	29.41b	92.45b	9.41b	3.32b	110.47b
Water %۱۰۰ requirement	4	3.16b	36.54a	100.05a	11.51a	3.56a	125.61a
	8	3.03c	28.64b	78.63c	8.65c	3.12c	97.54c
۷۵٪ نیاز آبی	2	3.16b	28.52b	84.24c	9.12b	3.26b	108.56b
Water %75 requirement	4	3.34a	33.47a	89.87c	10.87a	3.48a	120.42a
	8	3.15b	24.35c	70.12de	8.25c	3.01c	81.12d
۵۰٪ نیاز آبی	2	2.85d	20.42cd	75.19d	7.34d	2.85d	93.45c
Water %50 requirement	4	2.64e	16.81d	69.32e	7.12de	2.68e	78.34d
	8	2.52f	14.23de	60.27f	6.73e	2.54f	62.24e

در هر ستون میانگین های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و ورمی کمپوست (A×C) بر پارامترهای کمی اندازه گیری شده

Table 9- Comparison of the average interaction effects of the amount of irrigation water and vermicompost (C×A) on quantitatively measured parameters.

مقدار آب آبیاری Amount of irrigation water (m ³)	مقدار ورمی کمپوست Amount of vermicompost (ton ha ⁻¹)	بهره وری آب Water productivity (kg. m ⁻³)	عملکرد Yield (ton)	طول بوته Plant length (cm)	طول میوه Fruit length (cm)	قطر میوه Fruit diameter (cm)	وزن میوه Fruit weight (gr)
۱۰۰٪ نیاز آبی	3	2.95b	27.21b	94.35b	9.31b	3.12b	108.34b
Water %۱۰۰ requirement	6	3.16b	35.75a	100.16a	11.43a	3.56a	122.51a
	9	2.35c	21.44c	76.64c	8.84c	3.01c	94.04c
۷۵٪ نیاز آبی	3	3.14b	25.52bc	84.13c	9.18b	3.16b	104.36b
Water %75 requirement	6	3.38a	33.51a	90.37b	10.91a	3.21a	116.22a
	9	2.85c	19.45c	71.18de	8.15c	2.89c	76.52d
۵۰٪ نیاز آبی	3	2.91b	18.62cd	75.05d	7.26d	2.42d	90.35c
Water %50 requirement	6	2.74d	16.01d	67.41e	6.54de	2.21e	75.44d
	9	2.53e	13.13e	59.87f	6.12e	2.04f	60.64e

در هر ستون میانگین های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

سلولی و تغییر در مسیرهای تنفسی و فعال شدن مسیر پنتوزفسفات و یا افزایش حجم ریشه و غیره باشد. تأثیر خشکی بر هریک از اجزای عملکرد می تواند در نهایت منجر به تغییر در عملکرد شود (Sreevalli et al., 2001).

بروز تنش خشکی شدید باعث چروکیده شدن سلول ها و سست شدن دیواره سلولی شده و مانع تقسیم سلولی می شود و در نتیجه منجر به کاهش سطح برگ می شود (Taiz and Ziger, 1991). کاهش سطح برگ منجر به کاهش منبع فتوسنتز و افت فعالیت آنزیم های شده و در نهایت باعث کاهش عملکرد می شود (Paris et al., 2018).

عملکرد: مطابق جدول ۷ کاهش مقدار آب آبیاری باعث کاهش عملکرد شد. بیشترین عملکرد از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی (۳۶/۲۱ تن در هکتار) به دست آمد. مقدار عملکرد در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی ۳۰/۵۳ تن در هکتار به دست آمد که از این نظر با تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی تفاوت معنی دار نداشت. از آنجایی که خیار گیاهی است که نسبت به میزان رطوبت حساس می باشد، تنش آبی باعث کاهش عملکرد آن می گردد؛ اما با توجه به اینکه در آبیاری قطره ای نواری همواره ریشه گیاه مرطوب می باشد، کاهش عملکرد در تیمار ۷۵ درصد نسبت به تیمار آبیاری کامل معنی دار نبود. کاهش عملکرد گیاه در شرایط خشکی می تواند به دلیل کاهش سطح فتوسنتز کننده، کاهش تولید کلروفیل، افزایش انرژی مصرفی گیاه جهت بالا بردن غلظت شیره

جدول ۱۰- مقایسه میانگین اثرات متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (B×C) بر پارامترهای کمی اندازه گیری شده
Table 10- Comparison of the average interaction effects of poultry manure and vermicompost (C×B) on quantitatively measured parameters

مقدار کود مرغی Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)	مقدار ورمی کمپوست Amount of vermicompost (ton ha ⁻¹)	بهره وری آب Water productivity (kg. m ⁻³)	عملکرد Yield (ton)	طول بوته Plant length (cm)	طول میوه Fruit length (cm)	قطر میوه Fruit diameter (cm)	وزن میوه Fruit weight (gr)
2	3	2.95c	23.42c	84.34c	9.11c	3.07c	113.71c
	6	3.16b	30.75b	94.16b	10.23c	3.28b	117.72b
	9	3.65a	34.95a	100.24a	11.54a	3.54a	120.41a
4	3	3.14b	29.12b	91.53b	10.28b	3.21b	116.45b
	6	3.75a	36.63a	102.67a	11.82a	3.61a	124.52a
	9	2.85c	19.25d	70.28d	8.05d	2.82d	110.34d
8	3	2.71d	18.65d	68.25d	7.36d	2.61d	111.64d
	6	2.44e	15.41de	63.21de	6.14e	2.37e	102.24e
	9	2.31e	13.43e	57.37e	6.03e	2.34ef	97.54f

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

اثر سطوح مختلف کود مرغی بر عملکرد تأثیر معنی دار در سطح ۵ درصد داشت (جدول ۷). بیشترین مقدار عملکرد خیار (۳۷/۶۷ تن در هکتار) از تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و کمترین آن (۲۴/۳۸ تن در هکتار) از تیمار ۸ تن در هکتار به دست آمد. استفاده از سطوح بالای کود مرغی باعث کاهش عملکرد شد. یزدان پناه و مطلبی فرد (Yazdan Panah and Motalabi Fard, 2016) اثر ۴ سطح کود مرغی (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) را بر روی گیاه سیب زمینی مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند کاربرد ۵ تن در هکتار کود مرغی بیشترین مقدار عملکرد سیب زمینی (۴۴/۷ تن در هکتار) را داشت. کریم و همکاران (Kareem et al., 2010) در تحقیق خود راجع به بررسی اثرات کود مرغی بر گیاه ذرت بیان داشتند استفاده ۵ تن در هکتار کود مرغی نسبت به ۲/۵ تن در هکتار عملکرد بیشتری داشت. توزل و همکاران (Tuzel et al., 2003) در بررسی منابع مختلف کود دامی در تولید گوجه فرنگی بیان داشتند که کود مرغی بهترین منبع برای تولید این محصول است و باعث افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گوجه-فرنگی شد. آلفونس و سعد (Alfonse and Saad, 2000) در مقایسه کود دامی و مرغی به این نتیجه رسیدند که خیارهای رشد یافته در کود دامی بیشترین طول گیاه، وزن تر ساقه و برگ و وزن خشک را تولید کرده و زودتر به گل نشسته‌اند.

اثر متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۸) نشان داد بیشترین عملکرد از تیمار آبیاری کامل و ۴ تن در هکتار کود مرغی (۳۶/۵۴ تن در هکتار) به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی (۳۳/۴۷ تن در هکتار) تفاوت معنی دار نداشت. در تیمار آبیاری کامل بین مصرف ۲ و ۸ تن در هکتار کود مرغی تفاوت معنی دار مشاهده نشد. در سطوح

استفاده ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست باعث بیشترین عملکرد خیار شد و تیمارهای کمتر و بیشتر از این سطح باعث کاهش عملکرد شدند (جدول ۷). مطالعات نشان داده است استفاده از کود آلی ورمی کمپوست باعث افزایش عملکرد گیاه خیار و توت فرنگی می‌شود (Sahni et al., 2008). ورمی کمپوست با تأمین عناصر غذایی و افزایش کلروفیل و در نتیجه بهبود فتوسنتز و یا به دلیل بر خورداری از برخی هورمون‌های رشد گیاهی نظیر اکسین و سیتوکینین رشد گیاه را افزایش می‌دهد اما غلظت‌های زیاد آن به دلیل ایجاد تنش اسمزی در محیط و یا نسبت‌های زیاد هورمون‌هایی نظیر اکسین که در غلظت‌های بالا بازدارنده رشد گیاه هستند اثرات منفی بر رشد و عملکرد گیاه دارد (Amoo Aghaei and Baqaee, 2013).

عبدلی و همکاران (Abduli et al., 2013) با بررسی اثر کاربرد نسبت‌های مختلف ورمی کمپوست به این نتیجه رسیدند که با افزایش میزان مصرف ورمی کمپوست، عملکرد میوه تا حدودی افزایش می‌یابد و با مصرف بیش از حد این کود عملکرد کاهش پیدا می‌کند. انور و همکاران (Anwar et al., 2005) بیان داشتند مصرف ورمی کمپوست، به دلیل بهبود شرایط فیزیکی خاک، ایجاد بستر مناسب برای رشد ریشه و افزایش دسترسی گیاه به عناصر غذایی مورد نیاز، موجب افزایش عملکرد در گیاه ریحان فرانسوی شد.

نتایج مطالعات نشان داده است که مصرف سطوح بالای کودهای آلی در ذرت و برنج موجب افزایش عملکرد کمتری نسبت به مصرف سطوح پایین آن‌ها شد که می‌تواند به دلیل افزایش شوری خاک در اثر افزایش مصرف کودهای مختلف آلی از جمله ورمی کمپوست باشد (Kim et al., 2010).

درصد نیاز آبی تفاوت معنی داری نداشت. در استفاده سطوح بالاتر ورمی کمپوست (۶ تن در هکتار)، در تیمارهای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، کاربرد ۴ تن در هکتار کود مرغی عملکرد بیشتری داشت که از این نظر این دو تیمار تفاوت معنی دار نداشتند. به عبارت دیگر در این گروه تیمار بالاترین عملکرد (۳۶/۸ تن در هکتار) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۶ و ۴ تن در هکتار به ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی به دست آمد. در همین گروه تیمارها، در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی، کاربرد ۴ و ۸ تن در هکتار کود مرغی نسبت به تیمار ۲ تن در هکتار مقدار عملکرد را کاهش داد. با مصرف ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست، در همه سطوح آبی کاربرد مقادیر ۴ و ۸ تن در هکتار کود مرغی باعث کاهش عملکرد نسبت به مصرف ۲ تن در هکتار کود مرغی شد. در این گروه تیمارها، تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و کاربرد ۹ و ۲ تن در هکتار به ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی بیشترین عملکرد (۲۸/۳ تن در هکتار) را دارا بودند. با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت استفاده بیش از اندازه از ورمی کمپوست و کود مرغی به دلیل داشتن هدایت الکتریکی بالا، مانند بسیاری از مواد افزودنی موجب ایجاد شوری در محیط ریشه شده و در سطوح پایین آب آبیاری به علت عدم شستشوی نمک به میزان کافی، رشد گیاه کاهش یافته و قطر، طول و وزن میوه کاهش می یابد که در نهایت منجر به کاهش عملکرد گیاه می شود. والکر و پیلار (Walker and Pilar, 2008) نیز در تحقیق خود بیان داشتند مصرف بیش از اندازه کود مرغی باعث کاهش اسیدیته و افزایش هدایت الکتریکی خاک شده و عملکرد گیاه را کاهش می دهد. بنابراین برای جلوگیری از کاهش عملکرد در شرایط کم آبی لازم است مصرف ورمی کمپوست و کود مرغی کاهش یابد. همچنین در همه سطوح آبیاری باید در صورت استفاده از مقادیر بالای ورمی کمپوست، مقدار کود مرغی مورد استفاده را کاهش داد و یا بالعکس تا از کاهش عملکرد جلوگیری شود.

بهره‌وری آب آبیاری: مقدار آب آبیاری تأثیر معنی دار بر مقدار بهره‌وری داشت. بیشترین بهره‌وری آب (۳/۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و کمترین مقدار آن (۳/۰۸ کیلوگرم بر متر مکعب در هکتار) از تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی به دست آمد. بین تیمار ۱۰۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی از این نظر تفاوت معنی دار مشاهده نشد. علت کم بودن بهره‌وری آب آبیاری در گیاه در اثر تنش خشکی شدید را می توان به عوامل روزنه‌ای یا عوامل متابولیکی مؤثر بر انتشار دی اکسید کربن به داخل کلروپلاست و کاهش کربوکسیلاسیون در طول تنش که در این شرایط عوامل محدودکننده غیر روزنه‌ای ناشی از اختلال در واکنش‌های بیوشیمیایی نقش مهمی در کاهش فتوسنتز ایفا می کنند، نسبت داد.

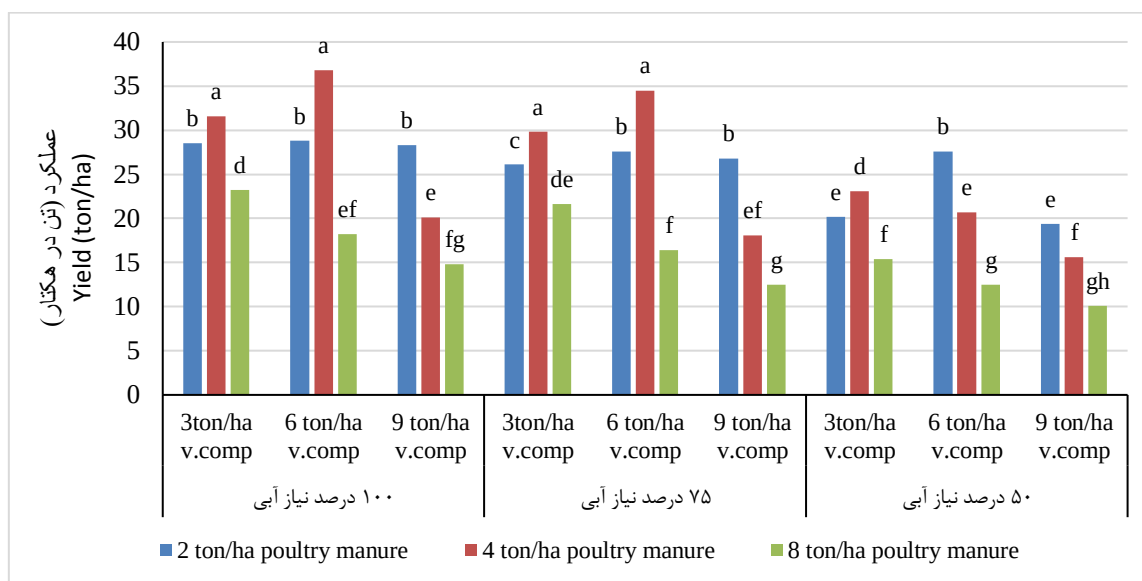
بالای تنش آبی (تیمار ۵۰ درصد) مصرف ۴ و ۸ تن در هکتار کود مرغی باعث کاهش عملکرد شد؛ بنابراین می توان گفت در شرایط تنش آبی شدید باید مقدار مصرف کود مرغی کاهش یابد.

اثرات متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۹) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری عملکرد کاهش یافت. بیشترین عملکرد (۳۵/۷۵ تن در هکتار) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد (جدول ۹)؛ که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی دار نداشت. در تیمارهای تنش آبی کاهش مصرف ورمی کمپوست (۳ تن در هکتار) باعث افزایش عملکرد شد و سطوح بیشتر ورمی کمپوست کاهش عملکرد را به همراه داشت.

اثرات متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (جدول ۱۰) نشان داد بیشترین عملکرد از تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست (۳۶/۶۳ تن در هکتار) به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۲ تن در هکتار کود مرغی و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست (۳۴/۹۵ تن در هکتار) تفاوت معنی دار مشاهده نشد. کودهای مرغی و ورمی کمپوست به علت دارا بودن عناصر مورد نیاز گیاه، رشد را ترفیع می بخشند و با دارا بودن عناصر پرمصرف و به مقدار کمتری ریزمغذی ها، در درازمدت باعث تعادل بخشی خاک می شوند. همچنین بهبود پارامترهای رشد و عملکرد خیار در نتیجه کاربرد کودهای مرغی و ورمی کمپوست را می توان به تغییراتی نسبت داد که پس از کاربرد این کودها در خاک ایجاد می شود. مواد آلی موجود در کودهای آلی موجب افزایش ظرفیت بافری خاک، تقویت ظرفیت تبادل کاتیونی، کاهش تثبیت فسفر، افزایش ذخایر غذایی خاک و بهبود جذب عناصر توسط ریشه گیاه می شود (Wamba et al., 2012; Waldrip et al., 2011).

کود مرغی علاوه بر افزایش فراهمی عناصر غذایی خاک، موجب بهبود خواص فیزیکی خاک شده، از طریق بقایای خود موجب کاهش وزن مخصوص ظاهری و تخلخل خاک می شود (Isitekhale and Osemwota, 2014). ظفری و همکاران (Zafari et al. 2019) اثر کودهای آلی و شیمیایی (کود مرغی، ورمی کمپوست و نیتروژن) را بر رشد و عملکرد نخود مورد بررسی قرار دادند. ایشان بیان داشتند با توجه به بهبود رشد و عملکرد نخود در تیمارهای حاوی کودهای ارگانیک که در بیشتر موارد نتایجی بهتر از کود شیمیایی داشت، می توان این کودهای آلی را به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای کودهای شیمیایی معمول در زراعت دیم نخود مدنظر قرار داد.

شکل ۲ اثرات متقابل آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی را بر عملکرد گیاه نشان می دهد. همان طور که مشاهده می گردد در همه سطوح مختلف نیاز آبی و استفاده ۳ تن در هکتار ورمی کمپوست، کاربرد ۴ تن در هکتار کود مرغی عملکرد بیشتری نسبت به کاربرد ۲ و ۸ تن در هکتار کود مرغی داشت. تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه، ۳ و ۴ تن در هکتار به ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی بیشترین عملکرد (۳۱/۱ تن در هکتار) را در این گروه تیمارها داشت؛ که از این نظر با تیمار ۷۵



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی بر عملکرد

Figure 2- Comparison of the average interaction effects of irrigation water, poultry manure and vermicompost (A× B×C) on yield

نشان داد بیشترین مقدار بهره‌وری مصرف آب از تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست (۳/۳۸ کیلوگرم در هکتار) به دست آمد که از این نظر با تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی استفاده از سطوح بالای ورمی کمپوست باعث کاهش بهره‌وری مصرف آب شد و کاهش مقدار ورمی کمپوست (تیمار ۳ تن در هکتار) باعث افزایش بهره‌وری آب آبیاری گردید که علت آن افزایش عملکرد در این تیمار نسبت به تیمارهای ۶ و ۹ تن در هکتار می‌باشد. در تیمار آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) کاهش ورمی کمپوست به دلیل کاهش عملکرد باعث کاهش بهره‌وری آب آبیاری شد. تحقیقات نشان داد ورمی کمپوست به دلیل داشتن ساختمان اسفنجی مصرف آب را کاهش می‌دهد و باعث افزایش راندمان و بهره‌وری می‌گردد. همچنین بیان داشتند با استفاده از این کود خطر ابتلا به انواع پاتوژن‌های مولد گندیدگی بوته از بین می‌رود و مصرف آب آبیاری نیز تا یک سوم کاهش می‌یابد.

اثر متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (جدول ۱۰) نشان داد بیشترین بهره‌وری مصرف آب از تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست (۳/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب) به دست آمد که از این نظر با تیمار ۲ تن در هکتار کود مرغی و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست تفاوت معنی‌دار نداشت. در تیمارهای پایین مصرف کود مرغی (۲ تن در هکتار) با افزایش سطح مصرف ورمی کمپوست بهره‌وری مصرف آب افزایش یافت. در تیمارهای بالای کود مرغی (۸ تن در هکتار) با کاهش ورمی کمپوست بهره‌وری مصرف آب افزایش یافت. پیری و بامری (Piri and Bameri, 2019) برهمکنش مقادیر آب و کودهای آلی و شیمیایی بر بهره‌وری آب گیاه سیر در زهک دشت

به علت نبود ارتباط خطی بین هدایت روزنه‌ای و جذب کربن، بیشتر گیاهان تمایل دارند در شرایط تنش آبی متوسط، بهره‌وری خود را افزایش دهند (Chaves, 1999). احمد و همکاران (Ahmad et al., 2009) و ساهین و همکاران (Sahin et al., 2012) افزایش بهره‌وری مصرف آب آبیاری را در شرایط تنش آبی گزارش کردند. استفاده از ورمی کمپوست تأثیر معنی‌دار بر بهره‌وری مصرف آب داشت. بیشترین مقدار بهره‌وری (۳/۲۲ کیلوگرم بر متر مکعب) از تیمار ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد و استفاده کمتر و بیشتر از این مقدار باعث کاهش بهره‌وری گردید.

مصرف ۴ تن در هکتار کود مرغی نسبت به مصرف ۲ و ۸ تن در هکتار کود مرغی باعث افزایش بهره‌وری مصرف آب شد (جدول ۷). کاربرد کود دامی در خاک باعث پوک شدن خاک، افزایش ظرفیت نگهداری رطوبت خاک و دانه‌بندی خاک شده و ویژگی‌های فیزیکی آن را بهبود می‌بخشد، ضمن این‌که با افزایش قدرت حاصلخیزی خاک رشد و عملکرد محصول را بهبود بخشیده و در نتیجه بهره‌وری مصرف آب افزایش می‌یابد (Eghball et al., 2001).

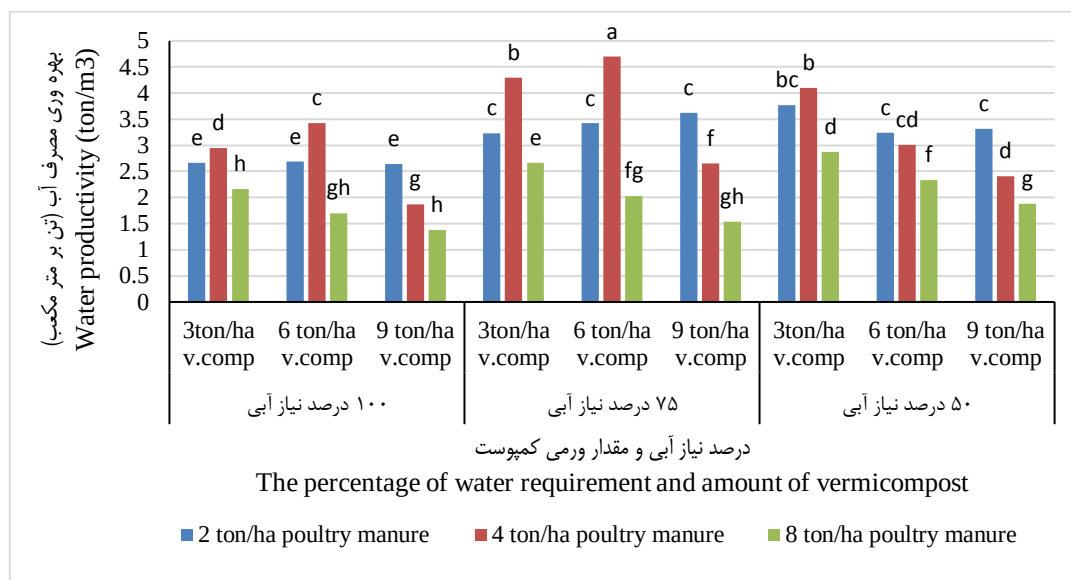
اثرات متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۸) بیشترین بهره‌وری مصرف آب از تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۴ تن در هکتار مصرف کود مرغی (۳/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب) به دست آمد. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی استفاده بیشتر از ۲ تن در هکتار کود مرغی باعث کاهش بهره‌وری مصرف آب شد. در تیمار آبیاری کامل استفاده ۴ تن در هکتار کود مرغی بهره‌وری مصرف آب را افزایش داد اما سطوح ۲ و ۸ تن در هکتار باعث کاهش بهره‌وری شد که از این نظر این دو تیمار با هم تفاوت معنی‌دار نداشتند. اثرات متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۹)

ورمی کمپوست (تیمار ۹ تن در هکتار) در همه سطوح آبی مصرف زیاد کود مرغی (بیشتر از ۲ تن در هکتار) به دلیل کاهش عملکرد، باعث کاهش بهره‌وری مصرف آب شد. کمترین بهره‌وری مصرف آب (۱/۳۸ کیلوگرم در هکتار) در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و مصرف ۹ و ۸ تن در هکتار به ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی به دست آمد. علت آن را می‌توان به افزایش شوری زیاد خاک در اثر مصرف بالای ورمی کمپوست و کود مرغی نسبت داد که منجر به کاهش عملکرد می‌شود.

کلروفیل a و کلروفیل b: مقدار کلروفیل و رنگ‌دانه‌های فتوسنتزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در ظرفیت فتوسنتزی گیاهان هستند زیرا به‌طور مستقیم بر سرعت و میزان فتوسنتز و تولید زیست‌توده مؤثر هستند. نتایج تجزیه واریانس (جدول ۶) نشان داد اثر تنش خشکی، کود مرغی و ورمی کمپوست و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال یک و پنج درصد بر مقادیر کلروفیل a و b تأثیرگذار بود. مقایسه میانگین صفات اندازه‌گیری شده (جدول ۱۱) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقدار کلروفیل a (۰/۶۳ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۰/۳۶ میلی گرم بر گرم وزن تر) از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی تفاوت معنی‌دار نداشت. با توجه به این‌که در شرایط تنش خشکی اولین مکانیسم مقاومتی در گیاهان بسته شدن روزنه‌ها و حفظ آب موجود در برگ می‌باشد، ورود دی‌اکسیدکربن به‌منظور فرایند فتوسنتز در کلروپلاست کاهش می‌یابد (Hosseinzadeh et al., 2016).

سیستان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد استفاده تلفیقی از کود دامی و شیمیایی در شرایط تنش آبی باعث بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری مصرف آب شد.

اثرات متقابل آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی بر بهره‌وری مصرف آب در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود بالاترین بهره‌وری مصرف آب (۴/۷ کیلوگرم بر متر مکعب) از تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، مصرف ۶ و ۴ تن در هکتار به‌ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی به دست آمد که نتیجه مصرف آب کمتر در این تیمار و عملکرد بالاتر آن بود. تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز آبی به دلیل استفاده بیشتر از آب علی‌رغم عملکرد بالاتر، بهره‌وری مصرف آب کمتری داشتند. گامیتی و همکاران (Gamity et al., 1983) بیان داشتند که بروز تنش آبی با وجودی که صورت کسر WP (بهره‌وری مصرف آب)، یعنی عملکرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد، اما به واسطه‌ی فعالیت ساز و کار تنظیم اسمزی گیاه مخرج کسر بیشتر کاهش یافته و بهره‌وری مصرف آب تا حدودی افزایش می‌یابد. در تیمارهای ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه می‌توان گفت با توجه به این‌که میزان عملکرد نیز (صورت کسر) به میزان قابل توجهی کاهش یافته باعث کاهش بهره‌وری مصرف آب نسبت به تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه شده است. ابات و همکاران (Abbat et al., 2004) نیز به نتایج مذکور در خصوص بهره‌وری مصرف آب دست یافتند و بیان داشتند که افزایش بهره‌وری مصرف آب در کم آبیاری بیشتر است. همچنین می‌توان از شکل مشاهده کرد در مقادیر بالای مصرف



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل آب آبیاری، ورمی کمپوست و کود مرغی بر بهره‌وری مصرف آب

Figure 3- Comparison of the average interaction effects of irrigation water, poultry manure and vermicompost (A× B×C) on water productivity

شود (Hoekstra et al., 2001). در گیاهان گزارش‌های متفاوتی از تأثیر تنش بر کلروفیل گزارش شده است. در آزمایشی تأثیر خشکی بر رشد گیاه آفتابگردان بررسی شد. نتیجه نشان داد غلظت کلروفیل a و b و کلروفیل کل کاهش یافت (Manivaannan et al., 2007). تنش آبی در گیاه ذرت و گندم مقدار کلروفیل را به شدت کاهش داد (Nayyar and Gupta, 2006).

گرگینی‌شبانکاره و خراسانی‌نژاد (Gorgini Shabankareh and Khorasaninejad., 2016) اثر سدیم نیتروپروکساید را بر خصوصیات کمی و کیفی گیاه مرزه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند تنش خشکی با تخریب سامانه فتوسنتزی، تخریب غشاء سلولی و کلروپلاست باعث کاهش مقدار رنگ‌دانه‌های کلروفیل a و b و متعاقب آن کاهش توانایی فتوسنتز می‌گردد. اثر متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۱۳) نشان داد در تیمارهای آبیاری کامل و ۷۵ درصد نیاز آبی بیشترین مقادیر کلروفیل a و b در سطح مصرف ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست مشاهده شد که از این نظر بین این دو تیمار تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی استفاده از مقادیر ۶ و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست مقادیر کلروفیل a و b را کاهش داد. اثر متقابل ورمی کمپوست و کود مرغی (جدول ۱۴) نشان داد استفاده ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست بیشترین تأثیر را بر مقادیر کلروفیل داشت. استفاده از سطوح بالای ورمی کمپوست و کود مرغی باعث کاهش مقادیر کلروفیل شد. تحقیقات نشان داده است کودهای آلی حاوی عناصر ریزمغذی می‌باشند که باعث افزایش مواد آلی خاک می‌شوند و قابلیت جذب عناصر مانند روی، مس، آهن، فسفر، پتاسیم و نیتروژن را افزایش می‌دهند. افزایش جذب عناصر غذایی خاک و جذب مواد توسط گیاه و رشد ناشی از آن موجب افزایش میزان کلروفیل می‌شود (Rezaei nejhah and Afiauni, 2000). کودهای آلی مقدار نیتروژن خاک را افزایش داده و باعث افزایش کلروفیل برگ می‌شود (Eidi et al., 2004).

پروتئین ماده خشک میوه: تنش آبی تأثیر مختلفی بر میزان پروتئین گونه‌های مختلف گیاهی داشته و پاسخ آن‌ها به این تنش بسته به گونه متفاوت است. این تفاوت حتی بین ارگان‌های مختلف یک گیاه هم قابل مشاهده است (Dubey, 1999). در تحقیق حاضر، میزان آب آبیاری، کود مرغی و ورمی کمپوست و اثر متقابل آن‌ها تأثیر معنی‌داری بر درصد پروتئین ماده خشک موجود در محصول خیار داشت (جدول ۶). بررسی اثرات میزان آب آبیاری بر مقدار پروتئین ماده خشک میوه نشان داد بیشترین مقدار پروتئین ماده خشک میوه در تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی به دست آمد و پروتئین ماده خشک میوه در سایر تیمارها کمتر بود (جدول ۱۱). گرچه، برخی تحقیقات مثل پلاه و همکاران (Pelah et al., 1997) نتیجه گرفتند که تنش آبی موجب افزایش پروتئین می‌شود. اما؛ چون تولید پروتئین مانند سایر ترکیبات بیوشیمیایی به وجود آب کافی وابسته است. بروز تنش آبی شدید تولید آن را کاهش

استفاده از ورمی کمپوست در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر معنی‌دار بر مقادیر کلروفیل داشت (جدول ۱۱). بیشترین مقدار کلروفیل a (۰/۵۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) و کلروفیل b (۰/۳۴ میلی گرم بر گرم وزن تر) از تیمار ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد. ورمی کمپوست با تأمین عناصر غذایی و افزایش کلروفیل و در نتیجه بهبود فتوسنتز و یا به دلیل برخورداری از برخی هورمون‌های رشد گیاهی نظیر اکسین و سیتوکینین رشد گیاه را افزایش می‌دهد اما غلظت‌های زیاد آن به دلیل ایجاد تنش اسمزی در محیط و یا نسبت‌های زیاد هورمون‌هایی نظیر اکسین که در غلظت‌های بالا بازدارنده رشد گیاه هستند، اثرات منفی بر رشد گیاه دارد (Dionne et al., 2012)؛ و چیلورو و همکاران (Chiluvuru et al., 2009) در تحقیق خود بیان داشتند کاربرد ورمی کمپوست محتوای کلروفیل را در ویگنا و سنتلا افزایش داد ولی میزان کلروفیل در تیمار ۳۰ درصد ورمی کمپوست نسبت به تیمار ۲۰ درصد کمتر بود. اثرات کود مرغی بر کلروفیل نشان داد استفاده از سطح ۴ تن در هکتار کود مرغی باعث افزایش مقادیر کلروفیل a و b شد و مقادیر کمتر و بیشتر از این مقدار کلروفیل را کاهش داد. اثرات متقابل آب آبیاری و کود مرغی (جدول ۱۲) نشان داد با کاهش آب آبیاری و افزایش مصرف کود مرغی بیشتر از ۴ تن در هکتار مقادیر کلروفیل a و b کاهش یافت. بیشترین مقادیر کلروفیل a و b از تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و ۴ تن در هکتار کود مرغی (به ترتیب ۰/۶۳ و ۰/۲۵ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد اما از این نظر با تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و ۴ تن در هکتار کود مرغی (به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۲۲ میلی گرم بر گرم وزن تر) اختلاف معنی‌دار مشاهده نشد. همچنین (جدول ۱۲) نشان داد در سطوحی که کم آبیاری شدید انجام شده بود (تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی) افزایش مصرف کود مرغی باعث کاهش مقادیر کلروفیل شد. دوام فتوسنتز و حفظ کلروفیل برگ تحت تنش از جمله شاخص‌ها فیزیولوژیکی مقاومت به تنش است.

غلظت کلروفیل برگ یکی از عوامل کلیدی در تعیین سرعت فتوسنتز و تولید ماده خشک گیاه است (Ghosh et al., 2004)؛ بنابراین کاهش آن در شرایط خشکی می‌تواند به عنوان یک عامل محدودکننده غیرروزی در فتوسنتز به حساب آید. با افزایش تنش خشکی میزان کلروفیل برگ کاهش می‌یابد.

در شرایط تنش آبی فاکتورهای لازم برای سنتز کلروفیل کاهش و تخریب آن افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر در شرایط تنش کم آبی، گیاه با بسته نگه داشتن روزنه‌ها در طی روز، سعی در حفظ محتوای آب نسبی خود دارد، در این زمان انتقال الکترون در فتوسیستم II مختل شده و الکترون اضافی ناشی از فتولیز آب، باعث تولید اکسیژن فعال و خسارت به غشای سلولی از طریق پراکسیداسیون چربی‌ها، پروتئین‌ها و کاهش محتوای کلروفیل گیاه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش کلروفیل تخریب آن به وسیله گونه‌های اکسیژن فعال (پراکسید هیدروژن) می‌باشد، بنابراین بیوسنتز کلروفیل با محدودیت مواجه می

می‌دهد. همچنین، طبق نتایج حاصله با افزایش مقدار ورمی کمپوست تا سطح ۶ تن در هکتار مقدار پروتئین ماده خشک میوه افزایش یافت و مقادیر کمتر و بیشتر از این مقدار باعث کاهش مقدار پروتئین ماده خشک شد (جدول ۱۱). آزادسازی ترکیبات نیتروژنه از ورمی کمپوست در طول فصل رشد و تأمین مقدار قابل توجهی از عناصر پیش‌نیاز برای تولید پروتئین از کود ورمی کمپوست باعث افزایش پروتئین گیاه شد (Muhammad and Hussain, 2010).

تحقیق زالر (Zaller, 2007) نیز مبین آن بود که استفاده از ورمی کمپوست در گیاه گوجه‌فرنگی و تحت شرایط گلخانه‌ای، موجب بهبود چشمگیر غلظت پروتئین نسبت به تیمار شاهد گردید. او مشاهده کرد که افزایش فعالیت بیولوژیک در محیط رشد حاوی ورمی کمپوست، از طریق تأثیر بر تولید مواد تنظیم‌کننده رشد و بهبود جذب عناصری چون نیتروژن، می‌تواند ضمن افزایش وزن میوه گوجه‌فرنگی، موجب بهبود غلظت نیتروژن نیز در آن گردد. افزایش فعالیت بیولوژیک در محیط رشد حاوی ورمی کمپوست و پیامد آن بهبود جذب عناصری چون نیتروژن، ضمن افزایش عملکرد گیاه موجب بهبود و افزایش پروتئین گیاه می‌گردد. مو و اکسیو (Mao and Xu, 2016) تأثیر مثبت ورمی

کمپوست بر افزایش پروتئین در اسفناج را گزارش کردند. اثر کود مرغی بر مقدار پروتئین ماده خشک میوه (جدول ۱۱) نشان داد استفاده ۴ تن در هکتار کود مرغی باعث افزایش پروتئین ماده خشک خیار شد. اثر متقابل کود مرغی و آب آبیاری (جدول ۱۲) نشان داد در تیمارهای ۱۰۰ و ۷۵ درصد نیاز آبی افزایش کود مرغی تا ۴ تن در هکتار باعث افزایش پروتئین ماده خشک میوه شد و استفاده بیشتر از کود مرغی مقدار پروتئین ماده خشک میوه را کاهش داد. در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی استفاده از سطوح ۴ و ۸ تن در هکتار کود مرغی پروتئین را کاهش داد و بیشترین مقدار پروتئین ماده خشک میوه در آن تیمار آبی با مصرف ۲ تن در هکتار کود مرغی به‌دست آمد. اثرات متقابل آب آبیاری و ورمی کمپوست (جدول ۱۳) نشان داد با کاهش عمق آب آبیاری تا ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه و افزایش ورمی کمپوست تا ۶ تن در هکتار مقدار پروتئین ماده خشک میوه افزایش یافت. بیشترین مقدار پروتئین ماده خشک میوه از تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به میزان ۵۵/۳۱ درصد به دست آمد و کمترین مقدار آن در تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی و ۹ تن در هکتار ورمی کمپوست به میزان ۲۷/۵۷ حاصل شد.

جدول ۱۱- مقایسه میانگین صفات کیفی اندازه‌گیری شده

Table 11- Comparison of the average of the measured qualitative traits

تیمار Treatment	پروتئین ماده خشک میوه The protein of the dry matter of the fruit (%)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gr ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gr ⁻¹)
۱۰۰٪ نیاز آبی %100 water requirement	48.41b	0.36a	0.63a
مقدار آب آبیاری Amount of irrigation water (m ³)			
۷۵٪ نیاز آبی %75 water requirement	56.31a	0.31a	0.58a
۵۰٪ نیاز آبی %50 water requirement	34.21c	0.19b	0.39b
مقدار ورمی کمپوست Amount of vermicompost (ton.ha ⁻¹)			
۳ 6	44.56b 55.78a	0.25b 0.34a	0.46b 0.59a
۹	31.62c	0.18c	0.35c
مقدار کود مرغی Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)			
۲ 4	34.28b 56.87a	0.23b 0.31a	0.42b 0.61a
۸	37.64b	0.15c	0.38b

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۱۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و کود مرغی (A×B) بر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

Table 12- Comparison of the average interaction effects of the amount of irrigation water and poultry manure (B×A) on the measured quality parameters

مقدار آب آبیاری Amount of irrigation water (m ³)	مقدار کود مرغی Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)	پروتئین ماده خشک میوه The protein of the dry matter of the fruit (%)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gr ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gr ⁻¹)
۱۰۰٪ نیاز آبی	2	42.15b	0.19b	0.46b
100% water requirement	4	45.18b	0.25a	0.63a
	8	39.23c	0.15d	0.35c
۷۵٪ نیاز آبی	2	45.63b	0.19b	0.41b
75 %water requirement	4	57.85a	0.23a	0.56a
	8	36.16cd	0.13e	0.28d
۵۰٪ نیاز آبی	2	34.25d	0.16c	0.31c
50 %water requirement	4	33.56d	0.17c	0.27d
	8	26.51e	0.12e	0.21e

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۱۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار آب آبیاری و ورمی کمپوست (A×C) بر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

Table 13- Comparison of the average interaction effects of irrigation water and vermicompost (C×A) on the measured quality parameters

مقدار آب آبیاری Amount of irrigation water	مقدار ورمی کمپوست Amount of vermicompost (ton.ha ⁻¹)	پروتئین ماده خشک میوه The protein of the dry matter of the fruit (%)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gr ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gr ⁻¹)
۱۰۰٪ نیاز آبی	3	40.23c	0.17b	0.43b
100 %water requirement	6	47.68b	0.23a	0.59a
	9	37.19dc	0.14d	0.32c
۷۵٪ نیاز آبی	3	44.53b	0.18b	0.39b
75 %water requirement	6	55.31a	0.21a	0.55a
	9	38.26c	0.12e	0.27c
۵۰٪ نیاز آبی	3	35.75d	0.14d	0.3c
50 %water requirement	6	31.41e	0.16c	0.28c
	9	27.57ef	0.11e	0.19d

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

جدول ۱۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست (B×C) بر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده

Table 14- Comparison of the average intraction effects of poultry manure and vermicompost (C×B) on the measured quality parameters

مقدار کود مرغی Amount of poultry manure (ton ha ⁻¹)	مقدار ورمی کمپوست Amount of vermicompost (ton ha ⁻¹)	پروتئین ماده خشک میوه The protein of the dry matter of the fruit (%)	کلروفیل b Chlorophyll b (mg.gr ⁻¹)	کلروفیل a Chlorophyll a (mg.gr ⁻¹)
2	3	45.24c	0.18c	0.42c
	6	51.26b	0.23b	0.55ab
	9	55.87a	0.26a	0.58a
4	3	50.36b	0.21b	0.48b
	6	58.42a	0.28a	0.62a
	9	40.12c	0.15cd	0.36d
8	3	38.56cd	0.14d	0.33d
	6	36.82d	0.13d	0.31de
	9	28.49e	0.10e	0.24e

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف یکسان بر اساس آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ اختلاف معنی‌دار ندارند.

In each culomn averages with the same letters do not have significant differences based on Duncan's test at the 5% probability level.

نیاز آبی تفاوت معنی دار مشاهده نشد. بالاترین بهره‌وری مصرف آب (۴/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) نیز از تیمار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه، مصرف تلفیقی ۶ و ۴ تن در هکتار به ترتیب ورمی کمپوست و کود مرغی به دست آمد که نتیجه مصرف آب کمتر در این تیمار و عملکرد بالاتر آن بود. تیمارهای ۱۰۰ درصد نیاز آبی به دلیل استفاده بیشتر از آب علی‌رغم عملکرد بالاتر، بهره‌وری مصرف آب کمتری داشتند. سطوح پایین‌تر نیاز آبی (تیمار ۵۰ درصد نیاز آبی) نیز به دلیل کاهش عملکرد بیشتر، بهره‌وری کمتری داشت. لذا می‌توان در شرایط مشابه تحقیق مقدار آب داده شده به گیاه را به مقدار ۷۵ درصد نیاز آبی گیاه کاهش داد و با مدیریت مناسب مصرف توأم ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست و ۴ تن در هکتار کود مرغی بدون کاهش معنی‌دار عملکرد محصول ضمن افزایش بهره‌وری مصرف آب، مقدار آب کمتری مصرف نمود. از نظر کیفی کاربرد ورمی کمپوست و کود مرغی باعث افزایش پارامترهای کیفی کلروفیل و پروتئین ماده خشک گیاه شد. این نتایج کاملاً کاربردی است و بر اساس هر یک از مسائل موجود در هر منطقه‌ای به کارگیری آن نتایج مفیدی خواهد داشت. مخصوصاً در شرایطی که محدودیت منابع آب وجود دارد. البته نتایج محدود به منطقه نیست و در مناطق مشابه از نظر اقلیمی، قابل اجرا است. پیشنهاد می‌گردد با توجه به این که تحقیقات گذشته نشان داده است مصرف سطوح بالا از ورمی کمپوست و کود مرغی باعث شوری خاک و کاهش محصول می‌شود، لازم است برای گیاهان مختلف سطوح مناسب این کودها تعیین گردد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل انجام شده است. کد پژوهانه: IR- UOZ-GR-1837

بر طبق نتایج، افزودن ورمی کمپوست در شرایط بروز تنش ملایم تأثیر بیشتری بر افزایش میزان پروتئین ماده خشک میوه دارد. وی و همکاران (Wei et al., 2009) دریافتند که بیشترین میزان پروتئین محلول در گوجه‌فرنگی در میزان متوسط آبیاری و حداکثر استفاده از کود حاصل می‌شود. همچنین افشار و همکاران (Afshar et al., 2014) نتیجه مشابهی در مورد گیاه خار مریم به دست آوردند. اثر متقابل ورمی کمپوست و کود مرغی (جدول ۱۴) بیشترین درصد پروتئین ماده خشک خیار در تیمار ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست (۵۸/۴۲ درصد) حاصل شد. استفاده هم‌زمان ۸ تن در هکتار کود مرغی و مصرف سطوح مختلف ورمی کمپوست درصد پروتئین ماده خشک را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی اثرات متقابل کود مرغی و ورمی کمپوست بر خصوصیات کمی و کیفی خیار در شرایط کم آبیاری انجام شد. آزمایش به صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح کامل تصادفی با تیمارهای سه سطح کود مرغی (۲، ۴ و ۸ تن در هکتار)، سه سطح ورمی کمپوست (۳، ۶ و ۹ تن در هکتار) و سه سطح عمق آب آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) انجام شد. یادآور می‌شود که در این تحقیق اثر مصرف جداگانه هر یک از کودهای ورمی کمپوست و کود مرغی در شرایط مختلف کم آبیاری مورد بررسی قرار نگرفت و نتایج مربوط به اثرات مصرف تلفیقی این دو کود می‌باشد. یافته‌های تحقیق نشان داد بیشترین مقدار عملکرد (۳۶/۸ تن در هکتار) در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه و مصرف تلفیقی ۴ تن در هکتار کود مرغی و ۶ تن در هکتار ورمی کمپوست به دست آمد که از این نظر با تیمار ۷۵ درصد

منابع

1. Abbat, P.E., Dardanelli, J.L., Canatarero, M.G. Melchiori, M., & Suero, E. (2004). Climate and water availability effects on water use efficiency in wheat. *Crop Science*, 44, 474-483.
2. Abduli, M.A., Amiri, L., Madadian, E., Gitipour, S., & Sedighian, S. (2013). Efficiency of vermicompost on quantitative and qualitative growth of tomato plants. *International Journal of Environmental Research*, 7, 467-472. <https://doi.org/10.22059/IJER.2013.625>.
3. Adediran, J.A., Taiwo, L.B., Akande, M.O., Sobulo, R.A., & Idowu, O.J. (2004). Application of organic and in-ganic fertilizer for sustainable maize and cowpea yields in Nigeria. *Journal of Plant Nutrition*, 27, 1163-1181.
4. Afshar, R.K., Chaichi, M.R., Assareh, M.H., Hashemi, M., & Liaghat, A. (2014). Interactive effect of deficit irrigation and soil organic amendments on seed yield and flavonolignan production of milk thistle (*Silybum marianum* L. Gaertn.). *Industrial Crops and Products*, 58, 166-172.
5. Ahmadpour, R., Armand, N., & Hosseinzadeh, S.R. (2016). Effect of vermicompost extract on germination characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under salinity stress. *Seed Research*, 2(2), 123-135.
6. Ahmed, M.E., El-Kader, N.I.A. & El-Kader Derbala, A.A. (2009). Effect of irrigation frequency and potassium source on the productivity, quality and storability of garlic. *Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), 4490-4497.
7. Alfonse, M., & Saad, E.M. (2000). Growing greenhouse cucumber in farmyard and chicken manure media in combination with foliar application of zinc, manganese and boron. *Egyptian Journal of Horticulture*, 27(3), 315-

- 336.
8. Amoo Aghaei, R., & Baqaei, M. (2013). Effect of concentration-dependent vermicompost and its extract on seed germination and black seed vegetative growth. *Plant Research*, 27(4), 691-702. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/20.1001.1.23832592.1393.27.4.16.0>
9. Anwar, M., Patra, DD., Chand, S., Alpesh, K., Naqvi, AA., & Khanuja, SPS. (2005). Effect of organic manures and inorganic fertilizer on growth, herb and oil yield, nutrient accumulation, and oil quality of French basil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(13), 1737-1746.
10. Arancon, N.Q., Edwards, C.A., Bierman, P., Welch, C., & Metzger, J.D. (2004). Influences of vermicomposts on field strawberries: 1.Effects on growth and yields. *Bioresource Technology*, 93, 145-153.
11. Arguello, J.A., Ledesma, A., Nunez, S.B., Rodriguez, C.H., & Goldfarb, M.D. (2006). Vermicompost effects on bulbing dynamics, nonstructural carbohydrate content, yield and quality of Rosado paraguay garlic bulbs. *Horticultural Science*, 41(3), 589-592.
12. Arnon, A.N. (1967). Method of extraction of chlorophyll in the plants. *Agronomy Journal*, 23, 112-121.
13. Atiyeh, R.M., Arancon, N., Edwards, C., & Metzger, J.D. (2001). The influence of earthworm processed pig manure on the growth and productivity of marigolds. *Bioresource Technology*, 81(2), 103-108.
14. Atiyeh, R.M., Edwards, C.A., Subler, S., & Metzger, J.D. (2002). Pig manure vermicompost as a component of a horticultural bedding plant medium: effects on physicochemical properties and plant growth. *Bioresource Technology*, 78(1), 11-20.
15. Azarmi, R., TorabiGiglou, M., & Hajiegharari, B. (2009).The effect of sheep-manure vermicompost on quantitativeand qualitative properties of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in the greenhouse. *African Journal of Biotechnology*, 8(19), 4953-4957.
16. Babaei, K., Amini-Dehghi, M., Modares Sanavi, A.M., & Jabari, M. (2010). Water deficit effect on morphology, prolin content and thymol percentage of Thyme (*Thymus vulgaris* L.). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 26(2), 239-251. (In Persian with English abstract)
17. Bayoumi, T.Y., Eid, M., & Metwali, E.M. (2008). Application of physiological and biochemical indices as a screening technique for drought tolerance in wheat genotypes. *Biotechnology*, 7, 2341-2352.
18. Beyk Khurmizi, A., Ganjeali, A., Abrishamchi, P., & Parsa, M. (2010). The effect of vermicompost on salt tolerance of bean seedlings (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agroecology* 23:474-485.
19. Chaves, MM. (1999). Effects of water deficits on carbon assimilation. *Experimental Botany* 42: 1-16.
20. Chiluvuru, N., Tartte, V., & Chandra, M. (2009). Plant bioassay for assessing the effects of vermicompost on growth and yield of and two important medicinal plants. *J. D. S. A.* 4: 160- 164.
21. Dionne, R.J., Tweddell, H.A., & Avis, T.J. (2012). Effect of non-aerated compost teas on dampingoff pathogens of tomato. *Canadian Journal Plant Pathology*, 34(1), 51-57.
22. Dubey, R.S. (1999). Protein synthesis by plants under stressful conditions. *Handbook of Plant and Crop Stress* 2: 365-397.
23. Ebrahimi, E., Asadi, G., & Niemsdorff, P.V.F. (2019). A field study on the effect of organic soil conditioners with different placements on dry matter and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.). *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 8(1), 59-66. <https://doi.org/10.1007/s40093-018-0228-4>.
24. Eghball, B., Wienhold, B., & Gilley, J. (2001). Comprehensive manure management for improved nutrient utilization and environment quality. *Soil and Water Conservation Research*, 1, 128-135.
25. Eidi, A., Eidi, M., Oryan, S., & Esmaeili, A. (2004). Effect of garlic (*Allium sativum*) extract on levels of urea and uric acid in normal and streptozotocin-diabetic rats. *Iranian Journal of Pharmaceutical Research*, 3, 52-52. (In Persian with English abstract)
26. El-Mageed, T.A.A., & Semida, W.M. (2015). Effect of deficit irrigation and growing seasons on plant water status, fruit yield and water use efficiency of squash under saline soil. *Scintia Horticulturae*, 186, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.013>.
27. Fallahi, J. (2009). *Effects of biofertilizers and chemical fertilizers on quantity and quality characterize of Chamomile (Matricaria chamomilla L.) as a medicinal plant*. M.Sc. Thesis Fac. Agric. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian with English abstract)
28. Gamity, DP., Watts, DG., Sullivan, CY., & Gilley, JR. (1983). Moisture deficits and grain-sorghum performance vapotranspiration yield relationships. *Agronomy*, 74, 815-820.
29. Ghaderi, M., Hosseini, M., & Keramati, L. (2010). Effect of organic compost fertilizer on growth characteristics of cucumber, tomato, cabbage and lettuce in greenhouse environment. *Iranian Agricultural Sciences*, 69, 41-60. (In Persian with English abstract)
30. Ghorbani, R., Kouchaki, A., Asadi, Q., & Jahan, M. (2008). Investigation of the effect of application of different organic fertilizers and foliar application of their extracts on the production and shelf life of tomatoes in storage in ecological agricultural systems. *Iranian Agricultural Research*, 6(1), 111-116. (In Persian with English abstract)
31. Ghosh, PK., Ajay, KK., Bandyopadhyay, MC., Manna, KG., Mandal, AK & Hati, KM. (2004). Comparative effectiveness of cattle manure, poultry manure, phosphocompost and fertilizer- NPK on three cropping system in

- vertisols of semi-arid tropics. Dry matter yield, nodulation, chlorophyll content and enzyme activity. *Bi. Tech.*, 95, 85-93.
32. Gorgini Shabankareh, H., & Khorasaninejad, S. (2016). The effect of sodium nitroprusside on some physiological and biochemical characteristics of safflower under low irrigation regimes. *Crop production Research*, 24(3), 55-70. (In Persian with English abstract)
33. Hoekstra, F., Golovia, A., & Buitink, J. (2001). Mechanisms of plant desiccation tolerance. *Tr. P. Sc.*, 6, 431-438.
34. Hosseinzadeh, S.R., Amiri, H., & Ismaili, A. (2016). Effect of vermicompost fertilizer on photosynthetic characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) under drought stress. *Photosynthetica*, 54(1), 87-92.
35. Hussain, N., Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2015). Vermicomposting eliminates the toxicity of *Lantana (Lantana camara)* and turns it into a plant friendly organic fertilizer. *Journal Hazard Mater*, 298, 46-57. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.04.073>.
36. Isitekhale, H.H.E., & Osemwota, I.O. (2014). Poultry manure and nitrogen-phosphorus- potassium fertilizer application and their residual effects on soil physical properties in two distinct ecological zones of central southern Nigeria. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(21), 2721-2733. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.813529>.
37. Ievinsh, G. (2011). Vermicompost treatment differentially affects seed germination, seedling growth and physiological status of vegetable crop species. *Plant Growth Regulation*, 65(1), 169-181. <https://doi.org/10.1007/s10725-011-9586-x>.
38. Kareem, I., Jawando, O.B., Eifediyi, E.K., Bello, W.B., & Oladosu, Y. (2017). Improvement of growth and yield of maize (*Zea mays* L.) by poultry manure, maize variety and plant population. *Agronomical Research in Moldavia*, 50(4), 51-64. <https://doi.org/10.1515/CERCE-2017-0035>.
39. Kashem, A., Sarker, A., Hossain, I., & Islam, S. (2015). Comparison of the effect of vermicompost and inorganic fertilizer on vegetable growth and fruit production of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Soil Science*, 5, 53-65. <https://doi.org/10.4236/ojss.2015.52006>.
40. Kim, C.Y., Ahn, Y.O., Kim, S.H., Kim, Y.H., & Lee, H.S. (2010). The sweet potato IbMYB1 gene as a potential visible marker for sweetpotato intragenic vector system. *Physiology Plant*, 139, 229-240.
41. Liue, F., Savic, S., Jensen, C.R., Shahnazari, A., Jacobsen, S. & Andersen, M N. (2006). Water relations and yield of lysimeter-grown strawberries under limited irrigation. *Scientia Horticulture*, 111, 128-132. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2006.10.006>.
42. Maleksaidi, H., Rezaimoghdam, K., & Ajili, A. (2010). Knowledge of experts Jahad-e keshavarzi Fars province, in the fields of organic farming. *Iranian Agricultural Extension and Education Journal*, 6(2), 49-62. (In Persian with English abstract)
43. Manivaannan, P., Abdul Jaleel, C., Sanka, B., Kishorekumar, A., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2007). Growth biochemical modification and proline metabolism in *Helianthus annus* L. as induced by drought stress, *Colloids and Surfaced B. Biointerfaces*, 59, 141-149.
44. Mao, X., Liu, M., Wang, X., Liu, C., Hou, Z., & Shi, J. (2003). Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. *Agriculture water Management*, 61(3), 219-228. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00022-2).
45. Mirsohail, M., & Gholami, M. (2008). *Vermicompost of cattle manure and how to produce it*. Olive Publications, 186 pages. (In Persian with English abstract)
46. Mirzaei Takhtagahi, H., Qamarnia, H., & Farmani Fard, M. (2017). Effect of vermicompost and irrigation with contaminated water on yield and yield components of tomato and Okra. *Water Research in Agriculture*, 32(4), 556-565. (In Persian with English abstract)
47. Movahedi, S., Heidari-Nasserabad, B., Hashemi-Ana, S.K., & Ranjbar, F. (2012). Zoning of climatic areas of Khuzestan province. *Geographical Space*, 12(30), 64-73. (In Persian with English abstract)
48. Muhammad, Z., & Hussain, F. (2010). Effect of NaCl salinity on the germination and seedling growth of some medicinal plants. *Pak Journal Botany*, 42(2), 889-897.
49. Nayyar, H., & Gupta, D. (2006). Differential sensitivity of C3 and C4 plants to water deficit stress: Association with oxidative stress and antioxidants. *Environmental and Experimental Botany*, 58, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.06.021>
50. Norozi, A., Khodadadi, M., Gholchin, A., & Akbarinia, A. (2010). Effect of manure poultry different level on the quantitative and qualitative Iranian musk melon. *Journal of Horticultural Science*, 2(2), 245-250.
51. Paris, P., Matteo, G.D., Tarchi, M., Tosi, L., Spaccino, L., & Lauteri, M. (2018). Precision subsurface drip irrigation increases yield while sustaining water use efficiency in Mediterranean poplar bioenergy plantations. *Forest Ecology and Management*, 409, 749-756.
52. Payero, J.O., Melvin, S.R., Irmak, S., & Tarkalson, D. (2009). Yield response of corn to deficit irrigation in a semiarid climate. *Agriculture Water Management*, 84, 101-112.
53. Pelah, D., Wang, W., Altman, A., Shoseyov, O., & Bartels, D. (1997). Differential accumulation of water stress-related proteins, sucrose synthase and soluble sugars in *Populus* species that differ in their water stress

- response. *Plant Physiology*, 99(1), 153-159.
54. Piri, H., & Bameri, A. (2019). Interaction of water and organic and chemical fertilizers on water productivity of garlic in the drain of Sistan plain. *Water Research in Agriculture*, 33(2), 250-263. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2019.119741>.
55. Piri, H., & Rashki, P. (2019). Effect of interaction of vermicompost and compost tea on greenhouse cucumber under water stress. *Water and Irrigation Management*, 9(1), 55-68. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/JWIM.2019.283562.686>.
56. Rezaei nejhadi, Y., & Afiauni, M. (2000). The effects of organic fertilizers on some chemical soil characteristics and elemental absorption and yield of maize crop. *Agricultural and Natural Science Journal*, 4(4), 19-29. (In Persian with English abstract).
57. Rezvani Moghaddam, P., Sabouri, A., Mohammadabadi, A.A., & Moradi, R. (2013). The effect of chemical fertilizers, cattle and municipal waste compost on yield, yield components and oil content of three sesame genotypes in Mashhad. *Iranian Agricultural Research*, 11(2), 241-250. (In Persian with English abstract)
58. Sahin, U., Ors, S., Kiziloglu, F.M., & Kuslu, Y. (2014). Evaluation of water use and yield responses of drip-irrigated sugar beet with different irrigation techniques. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 74(3), 302-310. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392014000300008>.
59. Sahni, S., Sarma, B., Singh, D., Singh, H., & Singh, K. 2008. Vermicompost enhances performance of plant growth-promoting rhizobacteria in *Cicer arietinum* rhizosphere against *Sclerotium rolfsii*. *Crop Protection*, 27, 369-376. <http://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.07.001>.
60. Shariati, S., Ali Alikhani, H., Pourbabae, A. (2014). Effect of nanoproxil-1 (lus-1) in combination with vermicompost for production of pseudomonas fluorescents inoculants on the growth and yields of maize. *Agricultural Advances*, 303, 81-87.
61. Sreevalli, Y., Baskaran, K., chandra shekara, R., Kuikkarni, R., Sushil, H., Samresh, D., Kukre, J., Ashok, A., Sharmir Singh, K., Srikant, S., & Rakesh, T. (2001). Preliminary observation on the effect of irrigation frequency and genotypes on yield and alkaloid concentration in petriwinkle. *Journal of Medicinal and Aromatic Plant Science*, 22, 356-358.
62. Stone, S.L., & Gifford, D.J. (1997). Structural and biochemical changes in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) seeds during germination and early seedling growth: I. Storage protein reserves. *International Journal of Plant Science*, 158, 727-737.
63. Taiz, L., & Ziger, E. (1991). *Plant Physiology*. Benjamin Publication. p. 346-356.
64. Tasdighi, H., Salehi, A., Movahedi Dehnavi, M., & Behzadi, Y. (2014). Investigating yield, yield components and the amount of German chamomile essential oil with the use of vermicompost and surfaces different irrigation. *Agricultural Knowledge and Sustainable Production*, 25(3), 78-62.
65. Terakado, J., Tadakatsu, Y., & Shinsuke, F. (2006). Shoot-applied polyamines suppress nodule formation in soybean (*Glycine max*). *Plant Physiology*, 163, 497-505. <http://doi.org/10.1016/j.jplph.2005.05.007>.
66. Theunissen, J., Ndakidemi, A., & Laubscher, C.P. (2010). Potential of vermicompost produced from plant waste on growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of Physical Sciences*, 5(13), 964-973.
67. Tuzel, Y., Yagmur, B., & Gumus, M. (2003). Organic tomato production under greenhouse conditions. *Acta Horticultura*, 4, 775-780. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.614.114>.
68. Waldrip, H.M., He, Z., & Erich, M.S. (2011). Effects of poultry manure amendment on phosphorus uptake by ryegrass, soil phosphorus fractions and phosphatase activity. *Biology and Fertility of Soils*, 47, 407-418. <http://doi.org/10.1007/s00374-011-0546-4>.
69. Walker, D.J., & Pilar, M. (2008). The effects of olive mill waste compost and poultry manure on the availability and plant uptake of nutrients in a highly saline soil. *Bioresource Technology*, 99, 396-403. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.12.006>.
70. Wamba, O. F., Taffouo, V. D., Youmbi, E., Ngwene, B., & Amougou, A. (2012). Effects of organic and inorganic nutrient sources on the growth, total chlorophyll and yield of three Bambara groundnut landraces in the coastal region of Cameroon. *Journal of Agronomy*, 11(2), 31-42. <http://doi.org/10.3923/ja.2012.31.42>.
71. Wang, X., Kang, Y., Liu, P., & Hou, Y. (2007). Effects of soil matric potential on potato growth under drip irrigation in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 88, 34-42.
72. Wang, H., Li, J., Cheng, M., Zhang, F., Wang, X., Fan, J., Wu, L., Fang, D., Zou, H., & Xiang, Y. (2019). Optimal drip fertigation management improves yield, quality, water and nitrogen use efficiency of greenhouse cucumber. *Scientia Horticulturae*, 243, 357-366.
73. Wei, Z., Liang, Y., Yamada, S., Zeng, X., Zhou, M., Huang, M., & Wu, Y. (2009). Relation of soil microbial diversity to tomato yield and quality under different soil water conditions and fertilizations. *Chin Journal Plant Ecology*, 33(3), 580-586. (In Chinese with English abstract). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0245626>.
74. Xu, C., & Mou, B. (2016). Vermicompost affects soil properties and spinach growth, physiology, and nutritional value. *HortScience*, 51(7), 847-855. <http://doi.org/10.21273/HORTSCI.51.7.847>.
75. Yazdan Panah, A., & Motalabi Fard, R. (2016). Effects of poultry manure and potassium fertilizer on yield and

- uptake of nitrogen, phosphorus, potassium, zinc and copper in potatoes. *Applied Soil Research*, 4(2), 60-71. (In Persian with English abstract)
76. Yang, L., Zhao, F., Chang, Q., Li, T., & Li, F. (2015). Effects of vermicomposts on tomato yield and quality and soil fertility in greenhouse under different soil water regimes. *Agriculture Water Managent*, 160, 98-105. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.07.002>.
77. Zafari, J., Rokhzadi, A., & Talebi, R. (2019). The effect of organic and chemical fertilizers on growth and yield of chickpea cultivars under dryland conditions. *Crop Physiology*, 11(42), 85-103. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/20.1001.1.76712423.1395.11.42.3.8>.
78. Zaller, J.G. (2007). Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *Scientia Horticulturae*, 112, 191-199. <http://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.12.023>.
79. Zhao, Y., Luo, X.Q., Chen Zhang ,X.J., & Zhang, W.L. (2010). Greenhouse tomato-cucumber yield and soil N leaching as affected by reducing N rate and adding manure: A case study in the Yellow River Irrigation Region China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 94(2), 221-235. <http://doi.org/10.1007/s10705-012-9535-8>.



Study on Simultaneous Colonization of *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica* in Barley under Different P Levels Using Monoclonal Antibody

V. Dinmohammadi^{1*}, N. Aliasgharzad², L. Aghebati-Maleki³

Received: 30-11-2022
Revised: 11-02-2023
Accepted: 06-03-2023
Available Online: 06-03-2023

How to cite this article:

Dinmohammadi, V., Aliasgharzad, N., & Aghebati-Maleki, L. (2023). Study on simultaneous colonization of *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica* in barley under different P levels using monoclonal antibody. *Journal of Water and Soil* 37(2): 261-279. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79849.1230>

Introduction

Recent studies show that most crops and horticultural plants can form symbiosis with the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and the endophytic *Serendipita indica*, simultaneously. The endophytic fungus plays an important role in alleviating environmental stresses in plants. It has also been shown that excessive available phosphorus in soil limits the root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi. No information is available on how soil phosphorus affects the establishment of endophytic fungus in root. Barley roots can be colonized by both mycorrhizal fungi and the endophytic fungus *Serendipita indica*. The objective of this study was to evaluate the effects of single or dual inoculation with *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica* on barley roots under different phosphorus (P) levels. The researchers utilized a monoclonal antibody called MAb32B11 to assess the presence of glomalin, a signature molecule of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi, in the roots. The glomalin content was quantified using the enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) method with the MAb32B11 antibody.

Materials and Methods

In this experiment, barley plants were inoculated with *Rhizophagus irregularis* (AMF) and *Serendipita indica* (endophytic fungus) with three levels of phosphorus from triple super phosphate source. At the end of the vegetative growth period (about three months), the plants were harvested and phosphorus concentration in the plant were measured. A subsample from roots was stored in -20 °C for determination of glomalin content. The glomalin content in the roots was analyzed using the monoclonal antibody MAb32B11. This antibody was employed to differentiate between the two fungi present in the roots and to quantify the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) specifically in plants treated with *Rhizophagus irregularis*. Additionally, the content of glomalin in the soil was determined at the end of the experiment using the same method as described above. The experiment was designed as a factorial completely randomized design (CRD) with three replications.

Results and Discussion

The results showed that the fresh and dry weights of shoot and root increased significantly in dual inoculation. At zero phosphorus level, shoot and root phosphorus concentrations were significantly higher in treatments with *R. irregularis* than in those without fungus (control). Under individual inoculation with *R. irregularis*, or *S. indica* as well as their dual inoculations, increasing level of phosphorus had no significant effect on shoot and root phosphorus concentration. In dual inoculation, the percentage of total colonization (88%) was significantly higher than that of individual inoculation treatment (68%) but the contribution of each fungus in root colonization under dual inoculation was significantly reduced as estimated by glomalin content of root and determination of total colonization. It was found that with increasing phosphorus level, total colonization percentage significantly

1 and 2- Former M.Sc. Student and Professor of Soil Biology & Biotechnology, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: dinmohammadi.v.t@gmail.com)

3- Assistant Professor of Immunology, Department of Immunology, Faculty of Medicine, Immunology Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.79849.1230](http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79849.1230)

decreased and the highest percentage of colonization (61%) was observed at zero level of phosphorus. By increasing phosphorus level, the percentage of root colonization was significantly decreased in individual inoculation by *R. irregularis*, or *S. indica* as well as dual inoculation. Results of glomalin assay in soil showed that the glomalin content was high in treatments of *R. irregularis* but control treatments without fungus and individual inoculation with *S. indica* had low glomalin. Antibody-reactive root glomalin was less in the dual inoculation treatment ($1006.9 \mu\text{g.g}^{-1}$) than in the *R. irregularis* treatment alone ($1924.5 \mu\text{g.g}^{-1}$) indicating that the presence of *S. indica*, in root inhibits, root colonization by *R. irregularis*. Moreover, the increasing of phosphorus level, significantly decreased root glomalin.

Conclusion

The increase of available phosphorus concentration in the soil caused to limit the expansion of the symbiosis of *R. irregularis* and *S. indica*, and this limitation was more for *R. irregularis*. In the case of dual inoculation with both *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica*, the negative impact of phosphorus on colonization percentage was observed to be less compared to single inoculation. Although the percentage of colonization by each fungus decreased in the dual inoculation treatment compared to their individual inoculation, the overall colonization percentage increased significantly. It appears that in the dual inoculation scenario, while the total root colonization percentage increases, the presence of *S. indica* leads to a decrease in the colonization percentage specifically with *R. irregularis*. But in general, growth and nutrient absorption in the case of dual inoculation was better than the inoculation of each of them individually. It was also found that increasing the concentration of phosphorus in the soil caused a decrease in root colonization for both fungi, although the negative effect of phosphorus on the colonization of *R. irregularis* was more than that of *S. indica*. The measurement of glomalin in soil and root showed that the inhibitory effect of *S. indica* fungus on *R. irregularis* is less in soil than in root.

Keywords: Endophytic fungus, Monoclonal antibody, Co-inoculation, Simultaneous symbiosis, Arbuscular mycorrhizal fungus

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۶۱-۲۷۹

بررسی کلنیزاسیون دو گانه *Rhizophagus irregularis* و *Serendipita indica* در جو در سطوح مختلف فسفر با به کارگیری آنتی بادی منوکلونال

وحیده دین محمدی^{۱*} - ناصر علی اصغر زاد^۲ - لیلی عاقبتی ملکی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

چکیده

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اغلب گیاهان زراعی و باغی علاوه بر همزیستی با قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌توانند همراه با قارچ اندوفیت *S. indica* نیز ایجاد همزیستی کنند. مقدار بالای فسفر قابل جذب در خاک سبب محدودیت کلنیزاسیون قارچ‌های میکوریز آربوسکولار در ریشه می‌شود اما در خصوص تأثیر آن بر همزیستی قارچ اندوفیت اطلاعات کافی در دسترس نیست. در این آزمایش گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) با قارچ‌های *R. irregularis* (قارچ میکوریز آربوسکولار) و *S. indica* (قارچ اندوفیت) با سه سطح فسفر خاک (شامل صفر، ۱۰، ۲۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم) از منبع سوپر فسفات تربیل تلقیح شدند. میزان گلومالین (گلیکوپروتئین) در ریشه‌ها و خاک با استفاده از آنتی بادی منوکلونال MAb32B11 اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که در حالت تلقیح هر دو قارچ وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه نسبت به تلقیح انفرادی آن‌ها به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. در سطح صفر فسفر، غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه در تیمارهای دارای *R. irregularis* به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از تیمار بدون قارچ بود. در تلقیح‌های انفرادی یا دو گانه، افزایش سطح فسفر تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه نداشت. در تلقیح دو گانه قارچ‌ها، گرچه درصد کلنیزاسیون کل بیشتر بود اما سهم هریک از قارچ‌ها در مقایسه با تلقیح‌های انفرادی کاهش یافت. با افزایش سطح فسفر درصد کلنیزاسیون در تلقیح‌های منفرد و تلقیح دو گانه به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. مقدار گلومالین خاک در تیمار *R. irregularis* زیاد بود اما تیمارهای شاهد بدون قارچ و تلقیح منفرد قارچ *S. indica* دارای مقدار اندکی گلومالین بودند. گلومالین ریشه در حالت تلقیح دو قارچ ($106.94 \mu\text{g.g}^{-1}$) کم‌تر از تیمار *R. irregularis* ($1924.49 \mu\text{g.g}^{-1}$) بود که نشان می‌دهد حضور قارچ *S. indica* در ریشه، کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ *R. irregularis* را مهار می‌کند. هم‌چنین با افزایش سطح فسفر خاک، مقدار گلومالین ریشه به‌طور معنی‌دار کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی: تلقیح دو گانه، قارچ اندوفیت، قارچ میکوریز آربوسکولار، منوکلونال آنتی بادی، همزیستی همزمان

مقدمه

(2000 Turner et al., 2013). قارچ‌های میکوریزی از طریق افزایش مقدار عناصر غذایی و تأثیر بر ترشحات ریشه‌ای گیاه، رشد گیاه و فرآیندهای ریزوسفر را اصلاح و تغییر می‌دهد (Richardson et al., 2009). به‌علاوه، قارچ‌های میکوریز و ترشحات آن‌ها نظیر گلومالین به‌طور مستقیم در تشکیل ساختمان خاک مشارکت دارند (Rillig and

همزیستی دو گانه قارچ‌های میکوریزی و اندوفیت در یک گیاه اخیراً مورد توجه زیادی قرار گرفته است. قارچ‌های میکوریزی از طریق جذب آب و عناصر غذایی، به‌ویژه عناصر باقابلیت دسترسی کم مثل فسفر، از استقرار گیاه در انواع خاک‌ها حمایت می‌کنند (Koide and Kabir,

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

(*)- نویسنده مسئول: (Email: dinmohammadi.v.t@gmail.com)

۳- استادیار گروه ایمنولوژی، دانشکده ایمنولوژی پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تبریز

(Mummey, 2006). به دلیل نقش در خاکدانه سازی و پایداری آن‌ها و افزایش ذخیره کربن و نیتروژن خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار موردتوجه است (Zhu and Miller, 2003; Rillig, 2004).

قارچ اندوفیت *Serendipita indica* برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در شمال غرب هندوستان از گیاهان خشکی‌پسند کهور و کنار در یک آزمایش برای قارچ میکوریز آربوسکولار در بیابان تار ایالت راجستان کشور هند جداسازی گردید. قارچ در سطح ریشه کلنیزه می‌شود و بعد از دو هفته داخل کورتکس ریشه می‌شود و تولید کلامیدوسپورهای گلابی شکل می‌کند اما قادر به نفوذ به استوانه مرکزی ریشه نمی‌باشد. این قارچ در جذب عناصر غذایی از جمله فسفر به گیاه کمک می‌کند ولی احتمالاً کارایی آن در جذب فسفر به اندازه قارچ‌های میکوریز آربوسکولار نباشد. این قارچ اندوفیت، هم‌چنین در تعدیل تنش‌ها در گیاهان به‌ویژه شوری و خشکی کارایی بهتری از میکوریز آربوسکولار نشان می‌دهد (Verma et al., 1998).

برخلاف قارچ‌های میکوریز آربوسکولار که قادر به ایجاد همزیستی با برخی تیره های گیاهی نمی‌باشند، قارچ *S. indica* محدودیت میزبانی ندارد (Kumari et al., 2003). هم‌چنین قارچ *S. indica* همزیست اختیاری بوده و به آسانی در محیط‌های کشت مصنوعی قادر به رشد است. دامنه میزبانی این قارچ و توان رشد بر روی محیط کشت مصنوعی نقطه روشنی در موضوع قارچ‌های اندوفیت ایجاد کرده و محققان فعال در این عرصه را امیدوار به کشت و تکثیر این قارچ شبه میکوریزی بدون نیاز به کشت همراه با گیاه میزبان نموده است (Verma et al., 1998).

با توجه به اینکه گیاهان با پتانسیل تشکیل میکوریز، قادرند بطور همزمان با قارچ‌های آربوسکولار و قارچ اندوفیت *S. indica* همزیستی دوگانه ایجاد کنند لذا برهمکنش آنها در گیاهان مورد توجه محققین قرار گرفته است. در یک آزمایش گلدانی با بستر استریل، گیاه گوجه‌فرنگی تحت شرایط تنش شوری، بصورت انفرادی و دوگانه با قارچ‌های *R. irregularis* و *S. indica* تلقیح شدند. از اسیدهای چرب نشان برای تعیین زیست توده هر قارچ در ریشه استفاده شد. نتایج نشان داد که اسید چرب قارچ آربوسکولار در ریشه در حضور قارچ *S. indica* کاهش یافت. بطور مشابه، مقدار ارگسترول ریشه بعنوان مولکول نشان قارچ *S. indica* در حضور قارچ آربوسکولار کاهش یافت که نشان دهنده رفتار رقابتی دو قارچ در حالت همزیستی دوگانه است. علیرغم این برهمکنش منفی بین دو قارچ، کلنیزاسیون ریشه (کل) در تلقیح دوگانه بطور معنی‌داری بیشتر از تلقیح انفرادی آنها بود. وزن خشک گیاه در تلقیح انفرادی با *R. irregularis* کمی بیش‌تر از تلقیح انفرادی با *S. indica* بود ولی بیش‌ترین بیومس گیاهی در تلقیح دوگانه به‌دست

آمد (Heidarianpour et al., 2020).

مشاهده‌شده است که افزایش غلظت فسفر رابطه معکوس با میزان کلنیزاسیون^۱ میکوریزی در ریشه دارد؛ اما افزودن مقادیر کم فسفر در گیاهانی که دچار کمبود شدید فسفر هستند، میزان کلنیزاسیون را افزایش می‌دهد (Gholami and Kochaki, 2010). تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهند که زیادی فسفر قابل‌جذب در خاک سبب محدودیت فعالیت قارچ‌های میکوریز آربوسکولار می‌شود ولی در رابطه با اثر فسفر بر روی همزیستی قارچ اندوفیت *S. indica* اطلاعات اندکی موجود است. افزایش عملکرد دانه در گیاهان جو کلنیزه شده با قارچ *S. indica* مستقل از سطوح فسفر و نیتروژن بود. حتی زمانی که عرضه فسفر و نیتروژن بالا بود، اثرات مثبت قارچ مشاهده شد. اثرات قارچ روی عملکرد (حداقل در گیاه زراعی جو) به کود دهی فسفر وابسته نیست (Achatz et al., 2010).

در همزیستی دوگانه قارچ میکوریز آربوسکولار و اندوفیت *S. indica* به‌کارگیری مشاهدات میکروسکوپی قادر به تفکیک سهم هریک از آن‌ها در کلنیزاسیون نیست. در این تحقیق با اندازه‌گیری گلولمالین ریشه به‌عنوان مولکول نشان برای قارچ‌های میکوریز آربوسکولار، سعی شد سهم کلنیزاسیون هر یک از قارچ‌ها در تلقیح دوگانه مشخص شود. هم‌چنین تأثیر افزایش فسفر قابل‌جذب خاک بر درصد کلنیزاسیون ریشه توسط این دو قارچ در حالت انفرادی و دوگانه موردبررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

کشت و آماده‌سازی زاد مایه قارچ‌ها

قارچ *Serendipita indica* از گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تبریز تهیه شد. برای تکثیر قارچ از محیط کشت کفر^۲ استفاده شد. پس از توسعه کلنی قارچ، توده قارچی از سطح محیط کشت جمع‌آوری و در آب استریل حاوی ۰/۰۵ درصد تئوین ۲۰ تعلیق و سوسپانسیون حاصله به‌عنوان زادمایه قارچ مورد استفاده قرار گرفت. تعداد اسپورها در زادمایه قارچ با استفاده از لام نتوبار شمارش شد و تعداد آن‌ها $5/6 \times 10^6$ اسپور در میلی‌لیتر بود.

قارچ *Rhizophagus irregularis* از دپارتمان بیولوژی دانشگاه لوند سوئد اخذ گردید. برای تهیه زادمایه قارچی، از کشت گلدانی با میزبان گیاه ذرت در بستر استریل استفاده شد. دو ماه پس از شروع کشت، قسمت هوایی گیاه از سطح خاک قطع‌شده و محتویات گلدان، شامل هیف، اسپور و ریشه‌های میکوریزی به‌عنوان زادمایه استفاده شد. درصد کلنیزاسیون قارچی ریشه‌ها در زادمایه به‌عنوان شاخص پتانسیل زادمایه، اندازه‌گیری شد (Aliasgharzad et al., 2001).

آماده‌سازی خاک

یک خاک لوم شنی برای کشت گیاه از ایستگاه تحقیقاتی خلعت پوشان دانشگاه تبریز تهیه و پس از عبور از غربال ۴/۷ میلی‌متری، در اتوکلاو استریل شد. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نظیر بافت، pH (عصاره اشباع)، EC، کربن آلی، آهک، فسفر قابل جذب، پتاسیم قابل جذب و برخی از عناصر کم‌مصرف خاک (Mn, Fe, Zn, Cu) در تحقیقات قبلی توسط نجفی و همکاران (Najafi et al., 2013) اندازه‌گیری شده بودند که نتایج آن‌ها در جدول ۱ دیده می‌شود.

آماده‌سازی بذر

بذرهای گیاه جو (*Hordeum vulgare* L.) بعد از چندین بار شست‌وشو با آب مقطر و غوطه‌ورسازی در اتانول ۷۰٪ به مدت ۳۰ ثانیه، به داخل محلول هیپوکلریت سدیم ۱٪ انتقال یافتند و بعد از ده دقیقه، حدود ۱۰ بار با آب مقطر استریل کاملاً شست‌وشو داده شدند.

کشت گیاه و اعمال تیمارها

گلدان‌های پلاستیکی استریل حاوی دو کیلوگرم خاک استریل آماده شدند. پنج عدد بذر ضدعفونی شده جو در هر گلدان کشت شد. در تیمارهای قارچ *Rhizophagus irregularis* (RI)، مقدار ۵۰ گرم زادمایه در عمق پنج سانتی‌متری از سطح خاک به صورت یک لایه پخش گردید. در تیمارهای قارچ *Serendipita indica* (SI)، یک میلی‌لیتر از سوسپانسیون قارچ در مجاورت هر بذر ریخته شد. در تلقیح دوگانه نیز علاوه بر ۵۰ گرم زادمایه قارچ RI، یک میلی‌لیتر نیز سوسپانسیون قارچ SI به کنار بذر افزوده شد (RI+SI). گیاهان شاهد بدون قارچ (F_0)، فقط عصاره زادمایه قارچ (عبور داده‌شده از کاغذ واتمن شماره ۱) دریافت کردند. بعد از ظهور گیاهچه‌ها، تعداد آنها به سه عدد در هر گلدان تنک شد بطوریکه فقط گیاهچه‌های هم اندازه نگه داشته شدند. گیاهان در گلخانه با نور طبیعی نگهداری شدند. فسفر در سه سطح شامل صفر، ۱۰، ۲۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم، به ترتیب (P_{20}, P_{10}, P_0) از منبع کود سوپر فسفات تریپل استفاده شد. از کود اوره به مقدار ۱۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به عنوان منبع نیتروژن، از کودهای سولفات روی، سولفات مس و سولفات منگنز هر کدام به مقدار ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به عنوان منبع روی، مس و منگنز و از کود کلات آهن به مقدار ۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم به عنوان منبع آهن استفاده شد. بر اساس آزمون خاک، پتاسیم در مقادیر کافی برای گیاه وجود داشت به همین دلیل کود پتاسیم استفاده نشد. رطوبت گلدان‌ها در محدوده ۰/۸-۰/۷ رطوبت ظرفیت گلدانی (PC) در طول آزمایش به روش توزین، روزانه تنظیم شدند (Junker et al., 2015).

جدول ۱- برخی خصوصیات اندازه‌گیری شده در خاک مورد آزمایش

Table 1- Some properties measured in the tested soil

مقدار	خصوصیات خاک (واحد)
Value	Soil properties (unit)
7.2	pH پی‌اچ
0.71	EC ($dS.m^{-1}$) هدایت الکتریکی
3.4	P ($mg.kg^{-1}$) فسفر قابل جذب
224	K ($mg.kg^{-1}$) پتاسیم قابل جذب
3.8	Fe ($mg.kg^{-1}$) آهن قابل جذب
2	Zn ($mg.kg^{-1}$) روی قابل جذب
0.9	Cu ($mg.kg^{-1}$) مس قابل جذب
5.3	Mn ($mg.kg^{-1}$) منگنز قابل جذب
0.2	OC % کربن آلی
0.02	N % نیتروژن کل خاک
5.16	Clay % رس
12.97	Silt % سیلت
81.87	Sand % شن
شن لومی	Texture class
Loamy sand	
2.99	CCE % کربنات کلسیم معادل
24.47	PC (w/w %) رطوبت ظرفیت گلدانی خاک

*: نتایج گزارش شده در این جدول از کارهای قبلی در همین خاک اخذ شده است
*: The results reported in this table are obtained from previous works in the same soil (Najafi et al., 2013).

CCE: Carbonate calcium equivalent, PC: Soil moisture at Pot Capacity

برداشت گیاه و اندازه‌گیری خصوصیات

بعد از سپری شدن دوره رشد (قبل از تشکیل سنبله) (۹۰ روز)، بخش هوایی و ریشه‌ای به‌طور جداگانه برداشت شدند. ریشه‌ها به‌دقت از ذرات خاک جدا و چندین بار با آب شسته شده و بعد از گرفتن آب اضافی، توزین و وزن به دست آمد. هم‌چنین نمونه‌هایی از ریشه جهت اندازه‌گیری گلومالین (نگهداری در دمای منفی ۲۰ درجه سلسیوس)، تعیین درصد کلنیزاسیون قارچی (نگهداری در اتانول ۵۰ درصد) و اندازه‌گیری غلظت عناصر غذایی تهیه شد. بخش هوایی گیاهان از سطح خاک قطع و وزن تر آن‌ها اندازه‌گیری شد. کلیه نمونه‌های گیاهی در داخل پاکت‌های کاغذی به داخل آون فن دار منتقل شده و در دمای

۷۰ درجه سلسیوس به مدت دو روز خشک و پس از این مدت به کمک ترازو با دقت ± 0.1 g وزن خشک آن‌ها تعیین شد.

تعیین درصد کلنیزاسیون قارچی

برای تعیین درصد کلنیزاسیون قارچی، رنگ‌آمیزی ریشه‌ها با استفاده از روش تغییر یافته کورمانیک و مک‌گراو (Kormanik and Graw, 1982) انجام شد. نمونه‌های یک گرمی از ریشه‌های تازه تهیه شدند و به قطعات یک سانتی‌متری بریده شده و در اتانول ۵۰ درصد (حجمی/حجمی) تثبیت شدند. ریشه‌ها سه الی چهار مرتبه با آب شست‌وشو و در لوله‌های حاوی محلول KOH ده درصد به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند. در پایان این مرحله محلول KOH به رنگ زرد یا زرد کمرنگ درمی‌آید. سپس محلول مذکور دور ریخته شد و ریشه‌ها سه الی چهار مرتبه با آب شست‌وشو شدند. سپس نمونه‌ها حداقل به مدت پنج دقیقه در محلول اسیدکلریدریک یک درصد قرار داده شدند تا آماده رنگ‌پذیری شوند. در ادامه اسید را خالی کرده و بدون شست‌وشو با آب، محلول رنگی به ریشه‌ها اضافه شد و ۲۴ ساعت در دمای محیط نگهداری گردید. محلول رنگی شامل تربیان بلو ۰/۰۵ درصد در محلول رنگ‌بر (محلول رنگ‌بر به نسبت حجمی ۱۴:۱ از آب: گلیسرین: اسیدلاکتیک تشکیل شده بود) بود. جهت تعیین درصد کلنیزاسیون ریشه از روش تقاطع خطوط شبکه^۱ استفاده شد (Norris et al., 1992 Schenck and Perez, 1988).

اندازه‌گیری گلومالین خاک و ریشه

برای استخراج گلومالین کل خاک از محلول بافر ۵۰ میلی‌مولار سیترات سدیم (pH=۸) استفاده شد. یک گرم از خاک گلدان داخل لوله فالکون حاوی هشت میلی‌لیتر بافر سیترات سدیم ۵۰ میلی‌مولار قرار گرفت و یک دقیقه ورتکس شد، سپس به مدت ۶۰ دقیقه در دمای ۱۲۱ درجه سلسیوس اتوکلاو گردید. سپس در $1000 \times g$ به مدت ده دقیقه سانتریفوژ گردید (Rosier et al., 2006). سه سیکل متوالی ۶۰ دقیقه‌ای عصاره‌گیری تکرار شد و عصاره حاصل بعد از سانتریفوژ به عصاره قبلی افزوده شد. در مورد نمونه‌های ریشه یک گرم ریشه تازه جهت استخراج مورد استفاده قرار گرفت و سایر مراحل مشابه استخراج گلومالین از بستر کشت گلدانی بود (Wright and Upadhyaya, 1999). برای سنجش گلومالین به روش الایزای غیرمستقیم، ۵۰ میکرولیتر نمونه رقیق شده با بافر فسفات (pH=۷/۲، PBS^۲) (تقریباً معادل غلظت ۰/۰۲ میکروگرم پروتئین) به داخل چاهک‌های میکروپلیت U شکل از جنس پلی‌وینیل کلراید اضافه گردید. نمونه‌ها به مدت یک شب در دمای ۳۵ درجه سلسیوس داخل انکوباتور قرار گرفت.

پس از افزودن ۲۵۰ میکرولیتر شیر خشک بدون چربی (۲ درصد در PBS) تازه تهیه شده به داخل چاهک‌ها و انکوباسیون به مدت ۱۵ دقیقه بر روی شیکر، نمونه‌ها با افزودن ۵۰ میکرولیتر آنتی‌بادی منوکلونال 32B11 به هر چاهک به مدت یک ساعت روی شیکر انکوبه شدند. سپس محتویات میکروپلیت داخل ظرف شویی خالی شده و به صورت وارونه با وارد کردن ضرباتی روی کاغذ خشک‌کن کاملاً خشک گردید. چاهک‌ها سه بار با بافر شستشو (بافر PBS حاوی ۰/۰۲ درصد توئین ۲۰) شستشو گردید. برای آشکار کردن آنتی‌بادی‌های منوکلونال متصل به آنتی‌ژن گلومالین از کنژوگه^۳ پراکسیداز ضد ایمونوگلوبولین موش (HRP-Goat anti mouse-Igm) با رقت ۱:۱۰۰۰ (رقیق شده در ۱٪ BSA) استفاده شد. برای این منظور، ۵۰ میکرولیتر از کنژوگه آنزیمی به هر چاهک اضافه شد و به مدت یک ساعت روی شیکر انکوبه شد. بعد از اتمام زمان انکوباسیون، محتویات میکروپلیت تخلیه گردید و به صورت وارونه با وارد کردن ضرباتی روی کاغذ خشک‌کن کاملاً خشک شد. ۵۰ میکرولیتر از سوبسترای ۳، ۳، ۵، ۵ - تترامیل بنزدین (TMB, Merck) در هر چاهک به منظور تولید رنگ استفاده شد. ۳۰ دقیقه بعد از افزودن سوبسترای رنگی، قرار گرفتن در فضای تاریک، و پایان واکنش با اسیدسولفوریک ۷ درصد (Sigma) شدت رنگ تولیدی از طریق اندازه‌گیری میزان جذب نور در طول موج ۴۵۰ نانومتر توسط دستگاه قرائت گر الایزا (Stat Fax 303, Germany) قرائت و نتایج ثبت شد. همه مراحل انکوباسیون روی شیکر چرخشی انجام شد. نمودار استاندارد در محدوده غلظت ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۴ میکروگرم با استفاده از گلومالین حاصل از کشت گلدانی و نمونه‌های خاک با ۱۰۰ درصد واکنش‌پذیری با آنتی‌بادی تهیه گردید (Wright et al., 1996; Nichols and Wright, 2004; Rillig, 2004).

اندازه‌گیری فسفر گیاه

برای اندازه‌گیری غلظت عناصر در گیاه، از روش هضم خشک استفاده شد. یک گرم از نمونه‌های گیاهی (ریشه یا بخش هوایی) خشک و پودر شده، با ترازوی ± 0.01 گرم توزین و در بوتله‌های چینی ریخته شد. کروزه‌ها در کوره الکتریکی قرار داده شدند تا خاکستر آن‌ها کاملاً سفید گردید. پس از سرد شدن خاکستر، ۱۰ میلی‌لیتر اسیدکلریدریک یک نرمال داغ ریخته شد و به مدت ۲۰ دقیقه روی بن‌ماری گذاشته شد و روی کروزه‌ها با شیشه ساعت پوشانده شد. بعد از ۲۰ دقیقه، محتویات کروزه با استفاده از کاغذ صافی به داخل بالون ۵۰ میلی‌لیتری صاف گردید و با آب مقطر به حجم رسانده شد (Westerm, 1990). به منظور اندازه‌گیری فسفر از روش رنگ‌سنجی وانادات - مولیبدات (روش زرد) استفاده شد (Cottenie, 1980).

نحوه تعیین سهم هر قارچ در تلقیح دوگانه

پس از تعیین درصد کلنیزاسیون (روش میکروسکوپی) و مقدار گلومالین ریشه، رابطه خطی بین مقدار گلومالین و درصد کلنیزاسیون در گیاهانی که فقط قارچ آربوسکولار دریافت کرده بودند، به دست آمد. سپس در تیمارهای تلقیح دوگانه برای تعیین سهم هر یک از قارچ‌ها، ابتدا درصد کلنیزاسیون قارچ آربوسکولار از طریق مقدار گلومالین و به کارگیری رابطه خطی، محاسبه و از درصد کلنیزاسیون کل کسر گردیده و درصد کلنیزاسیون با قارچ اندوفیت تعیین شد.

طرح آزمایشی و آنالیز آماری

این آزمایش به صورت فاکتوریل در طرح پایه کاملاً تصادفی با سه تکرار اجرا شد. فاکتور اول شامل چهار سطح تلقیح قارچ (قارچ آربوسکولار، قارچ اندوفیت، تلقیح دوگانه و بدون قارچ) و فاکتور دوم شامل سه سطح فسفر بود. تجزیه واریانس و مقایسات میانگین داده‌ها به وسیله آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS و رسم نمودارها با Excel انجام گرفت.

نتایج

وزن خشک بخش هوایی و ریشه

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۲) اثرات متقابل قارچ و فسفر بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه معنی‌دار شد ($p < 0.01$). اثرات متقابل قارچ و فسفر بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه معنی‌دار بود (جدول ۲). بیش‌ترین وزن خشک بخش هوایی (۶/۷۱ گرم بر گلدان) در تیمار SI و P_{10} مشاهده شد که با تیمار (SI+RI) و P_{20} اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۱). بیش‌ترین وزن خشک ریشه (۶/۱۵ گرم بر گلدان) در تیمار (SI+RI) و سطح P_{20} مشاهده شد (شکل ۲).

درصد کلنیزاسیون ریشه

بر اساس نتایج جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) اثرات متقابل قارچ و فسفر بر درصد کلنیزاسیون در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود.

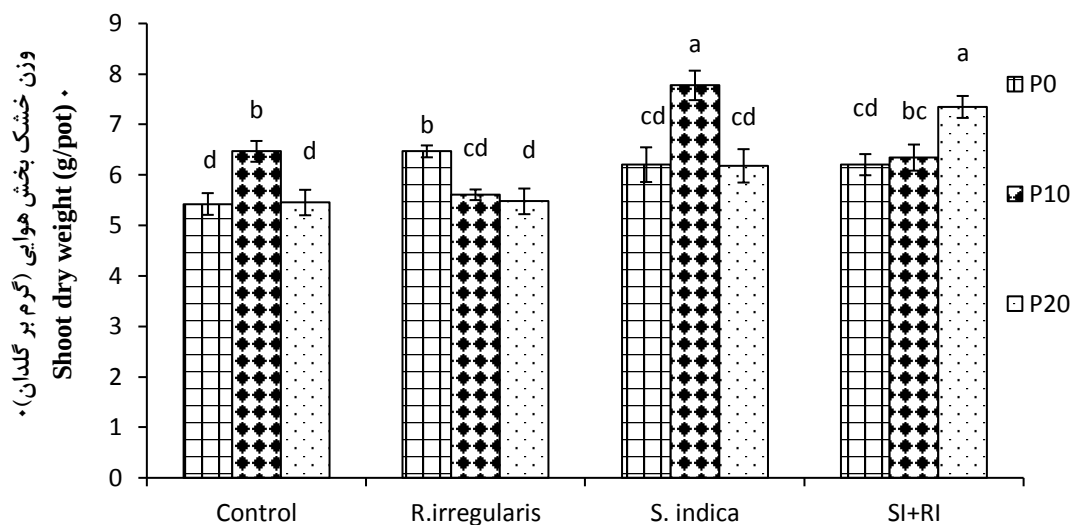
جدول ۲- تجزیه واریانس اثر تلقیح قارچ و سطوح قارچ و فسفر بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه

Table 2- Variance analysis of the effect of fungus inoculation and fungus and phosphorus levels on the dry weight of shoots and roots

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares	
		وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight
قارچ Fungus	3	2.047**	2.234**
فسفر Phosphorus	2	8.401**	0.826*
قارچ×فسفر Fungus×Phosphorus	6	3.116**	1.589**
خطا Error	24	0.138	0.178
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)		8.231	6.758

** معنی‌دار در سطح ۱٪

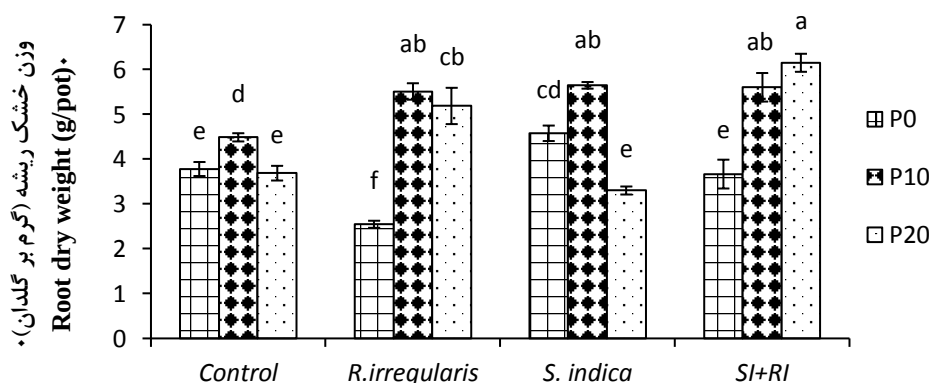
** significant at the 1% level



شکل ۱- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر وزن خشک بخش هوایی

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 1- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on the dry weight of the shoots
P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.



شکل ۲- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر وزن خشک ریشه

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 2- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on the dry weight of the roots
P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.

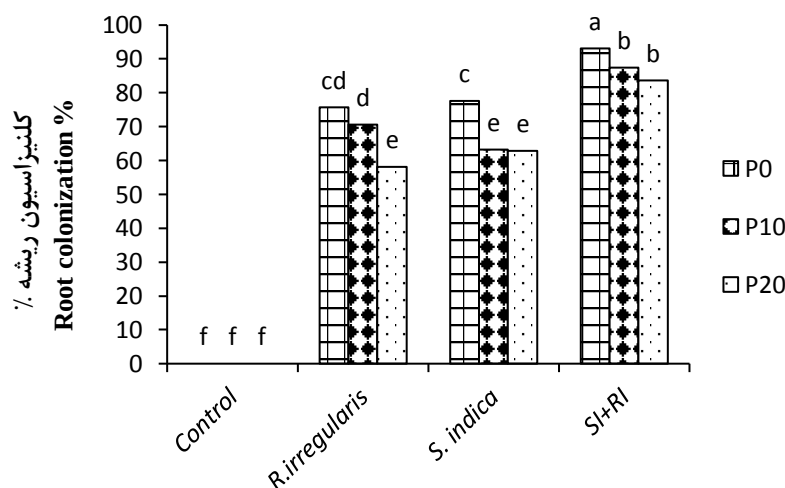
فسفر از P₀ و P₁₀ درصد کلنیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌دار کاهش یافت ولی از P₁₀ به P₂₀ تغییر معنی‌دار نداشت، همین روند در تیمار تلقیح دوگانه قارچ نیز دیده شد اگرچه درصد کلنیزاسیون ریشه در تیمار (SI+RI) در همه سطوح فسفر به‌طور کلی بیش‌تر از تلقیح منفرد هر یک از قارچ‌ها بود.

با توجه به (شکل ۳) در سطح فسفر P₀، درصد کلنیزاسیون ریشه در تیمار (SI+RI) بیش‌تر از SI و RI است. در این تیمار درصد کلنیزاسیون کل از سطح P₀ به سطح P₁₀ کاهش معنی‌دار داشت ولی با افزایش سطح فسفر به P₂₀ کاهش غیر معنی‌داری مشاهده شد. در تیمار RI، با افزایش سطح فسفر از P₀ و P₂₀، درصد کلنیزاسیون ریشه به‌طور معنی‌دار کاهش یافت درحالی‌که در تیمار SI، با افزایش سطح

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس اثر سطوح قارچ و فسفر بر درصد کلنیزاسیون ریشه و گلومالین خاک و گلومالین ریشه
Table 3- Variance analysis table of the effect of fungus and phosphorus levels on root colonization percentage and soil glomalin and root glomalin

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean of squares		
		گلومالین ریشه Root glomalin	گلومالین خاک Soil glomalin	% کلنیزاسیون ریشه Root colonization%
		Root glomalin	Soil glomalin	Root colonization%
Fungus قارچ	3	11010587.787**	685043.991**	13385.157**
Phosphorus فسفر	2	446608.056**	19590.19**	347.322**
قارچ×فسفر Fungus×Phosphorus	6	217667.739**	6408.726**	66.037**
Error خطا	24	21637.976	1357.816	10.454
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)		15.673	13.0562	5.76

** معنی دار در سطح احتمال ۱٪
** significant at the 1% level



شکل ۳- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر درصد کلنیزاسیون ریشه

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 3- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on the root colonization percentage.

P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.

گلومالین واکنش پذیر با آنتی بادی در خاک و ریشه

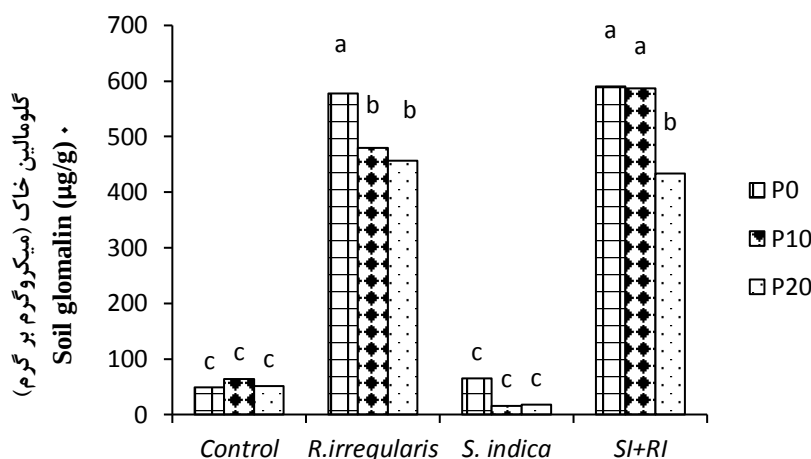
با توجه به جدول تجزیه واریانس (جدول ۳) مشخص شد اثرات متقابل قارچ و فسفر بر گلومالین خاک و ریشه در سطح احتمال یک درصد معنی دار بود. با توجه به (شکل ۴) مشخص می شود در سطح صفر فسفر P₀، گلومالین خاک در تیمار (SI+RI) بیش تر از RI است ولی از نظر آماری معنی دار نبود. در سطح فسفر P₁₀، گلومالین خاک در حالت (SI+RI) بیش تر از RI است به طوری که در این سطح فسفر کاهش معنی دار گلومالین در RI مشاهده شد. در سطح فسفر P₂₀، مقدار

گلومالین در حالت (SI+RI) به طور معنی دار کاهش یافت در حالی که در RI این کاهش معنی دار در سطح فسفر P₁₀ مشاهده شد. به طور کلی مقدار گلومالین خاک در تیمارهای دارای RI زیاد بود و تیمارهای شاهد و SI دارای مقدار اندک گلومالین در خاک بودند. با توجه به (شکل ۵) در حالت (SI+RI) مقدار گلومالین ریشه‌ای، با افزایش سطح فسفر از P₀ به P₁₀ به طور معنی دار کاهش نیافت اما با افزایش سطح فسفر به P₂₀ به طور معنی دار کاهش یافت. در تیمار RI با افزایش سطح فسفر از صفر به P₁₀ در مقدار گلومالین ریشه‌ای کاهش معنی داری مشاهده نشد.

رابطه خطی بین درصد کلنیزاسیون ریشه و مقدار گلومالین ریشه‌ای واکنش‌پذیر با آنتی‌بادی

با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده در اندازه‌گیری مقدار گلومالین ریشه در تیمارهای تلقیح انفرادی با قارچ اربوسکولار (جدول ۴)، رابطه خطی زیر بین درصد کلنیزاسیون و مقدار گلومالین ریشه به دست آمد (شکل ۶) (Malekzadeh et al., 2015).

در همین تیمار با افزایش سطح فسفر به P_{20} کاهش معنی‌داری در گلومالین ریشه‌ای مشاهده شد. بیش‌ترین مقدار گلومالین ریشه‌ای در تیمار RI و P_0 مشاهده شد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با مقدار گلومالین در $(SI+RI)$ و P_0 داشت.

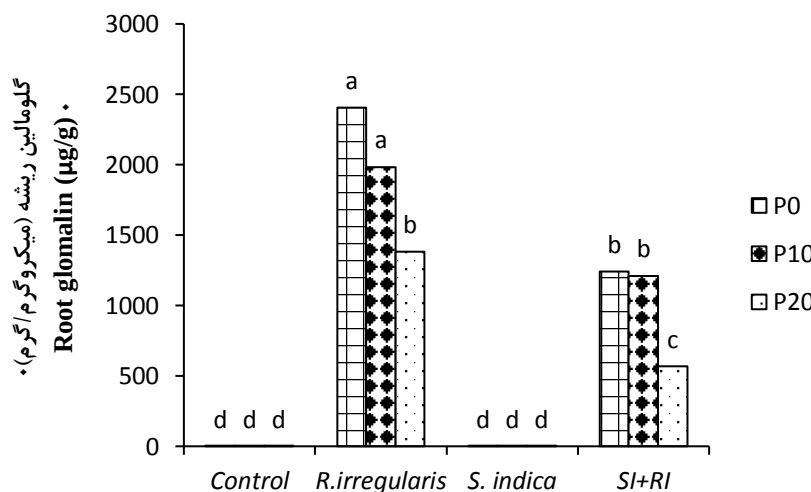


شکل ۴- اثر برهم‌کنش قارچ و فسفر بر گلومالین خاک

P_0 : بدون فسفر، P_{10} : ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گلدان و P_{20} : ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 4- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on soil glomalin.

P_0 : no phosphorus, P_{10} : 10 mg/kg pot and P_{20} : 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.



شکل ۵- اثر برهم‌کنش قارچ و فسفر بر گلومالین ریشه. P_0 : بدون فسفر

P_{10} : ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گلدان و P_{20} : ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

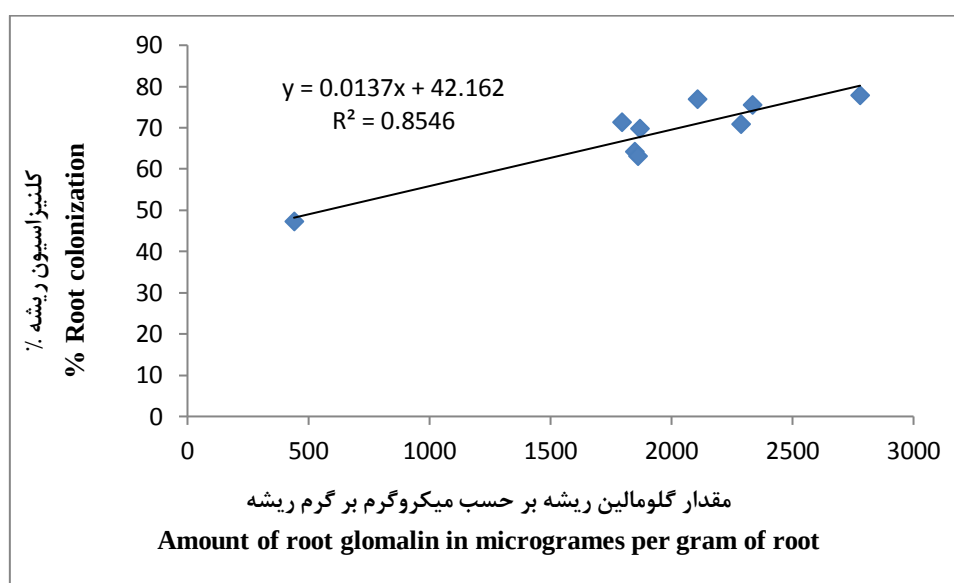
Figure 5- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on root glomalin

P_0 : no phosphorus, P_{10} : 10 mg/kg pot and P_{20} : 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.

جدول ۴- رابطه خطی بین مقدار گلومالین ریشه و درصد کلنیزاسیون ریشه

Table 4- Linear relationship between root glomalin amount and root colonization percentage

مقدار گلومالین ریشه واکنش پذیر با آنتی بادی Amount of root glomalin reactive with antibody (µg/g)	کلنیزاسیون ریشه % Root colonization %
2334.52	75.51
2106.36	76.86
2779.07	77.84
1795.77	71.26
1867.90	69.71
2287.42	70.84
1848.76	64.19
1860.54	63.14
440.06	47.18



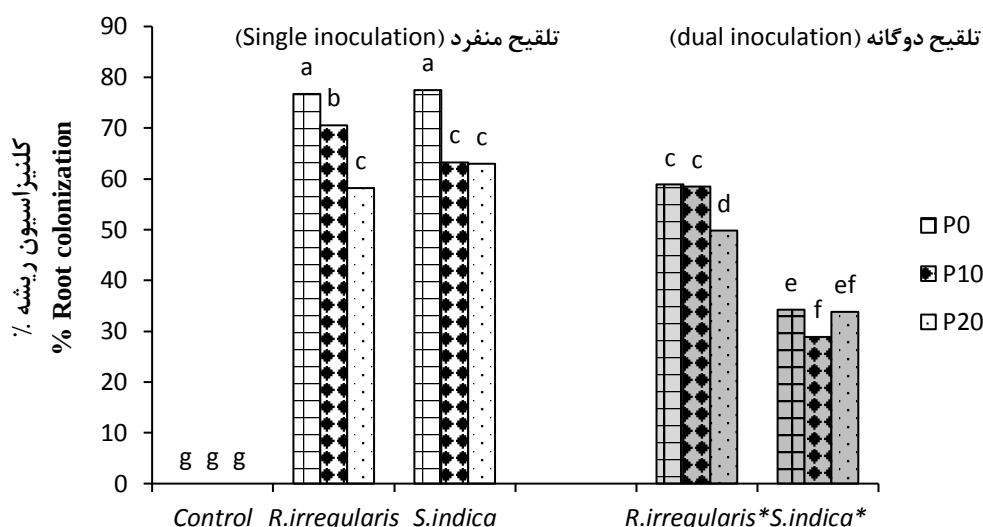
شکل ۶- رابطه خطی بین درصد کلنیزاسیون ریشه و گلومالین واکنش پذیر با آنتی بادی بر حسب میکروگرم بر گرم ریشه خشک

Figure 6- Linear relationship between root colonization percentage and antibody-reactive glomalin in micrograms per gram of dry root

کلنیزاسیون به طور معنی دار کاهش یافت. در حالت (SI+RI)، سهم درصد کلنیزاسیون قارچ *R. irregularis* با افزایش سطح فسفر از P_0 به P_{10} کاهش معنی داری مشاهده نشد؛ اما از سطح فسفر P_{10} به P_{20} ، به طور معنی دار کاهش یافت. در حالت SI با افزایش سطح فسفر از P_0 به P_{10} درصد کلنیزاسیون به طور معنی دار کاهش یافت ولی با افزایش سطح فسفر از P_{10} به P_{20} کاهش معنی داری در درصد کلنیزاسیون مشاهده نشد. در حالت (SI+RI)، سهم درصد کلنیزاسیون قارچ *S. indica* با افزایش سطح فسفر از P_0 به P_{10} به طور معنی دار کاهش یافت ولی با افزایش سطح فسفر از P_{10} به P_{20} درصد کلنیزاسیون به طور غیر معنی دار افزایش یافت (شکل ۷).

همان گونه که در بخش مواد و روش ها توضیح داده شد، در تیمارهای تلقیح دوگانه، ابتدا درصد کلنیزاسیون ریشه از روی مقدار گلومالین محاسبه و با کسر آن از درصد کلنیزاسیون کل، درصد تقریبی کلنیزاسیون با قارچ اندوفیت تعیین گردید. روش مورد استفاده در این آزمایش برای برآورد کلنیزاسیون ریشه با قارچ اندوفیت در تلقیح دوگانه، بصورت ابتکاری بوده و برای صحت سنجی آن نیاز به آزمایش های بیشتر است.

درصد (تقریبی) کلنیزاسیون قارچ ها در حالت تلقیح دوگانه با توجه به (شکل ۷) در حالت RI، با افزایش سطح فسفر درصد



شکل ۷- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر درصد کلنیزاسیون در حالت تلقیح منفرد و سهم هریک از آن‌ها در تیمار تلقیح دوگانه از طریق برآورد (*)
 P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 7- The effect of the interaction of fungus and phosphorus on the percentage of colonization in the single inoculation and the contribution of each of them in the dual inoculation treatment through estimation (*)

بر غلظت فسفر بخش هوایی نداشت. در سطح P₀، غلظت فسفر بخش هوایی در تیمار RI به‌طور معنی دار بیش تر از تیمار F₀ بود. کم ترین غلظت فسفر بخش هوایی در تیمار F₀ و سطح فسفر P₀ مشاهده شد. با توجه به (شکل ۹) در سطح صفر فسفر، غلظت فسفر ریشه فقط در تیمار RI افزایش معنی دار نشان داد. در تیمارهای SI و (SI+RI)، غلظت فسفر ریشه فقط در سطح فسفر P₂₀ نسبت به سطوح پایین تر فسفر، افزایش معنی دار نشان داد.

غلظت و محتوای فسفر بخش هوایی و ریشه

مطابق با (جدول ۵) اثرات متقابل سطوح فسفر و قارچ بر غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه (به ترتیب $p < 0.001$ و $p < 0.05$) و محتوای فسفر بخش هوایی و ریشه معنی دار بود ($p < 0.01$). با توجه به (شکل ۸) در تیمار F₀، غلظت فسفر بخش هوایی با افزایش سطح فسفر از P₀ به P₂₀ به‌طور معنی دار افزایش یافت درحالی که در تیمارهای تلقیح منفرد قارچ‌ها و تلقیح دوگانه آن‌ها، افزایش سطح فسفر تأثیر معنی داری

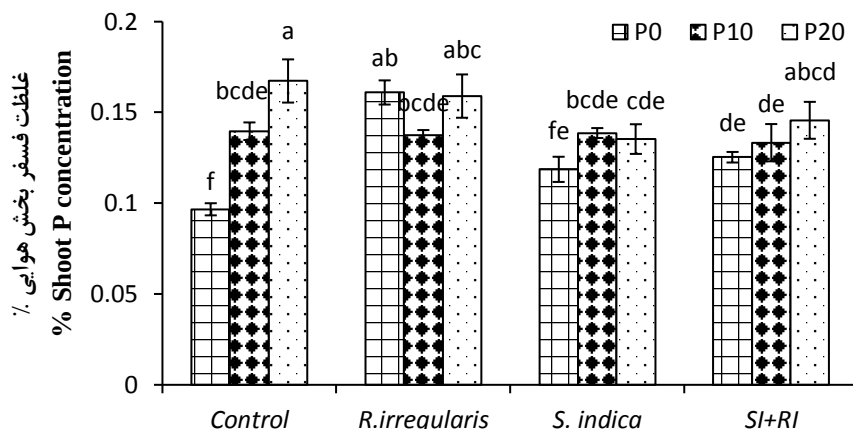
جدول ۵- تجزیه واریانس اثر سطوح قارچ و فسفر بر غلظت و محتوای فسفر بخش هوایی و ریشه

Table 5- Variance analysis of the effect of fungus and phosphorus levels on the concentration and phosphorus content of shoot and root

منابع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		Mean of squares			
Source of variation	Degree of freedom	محتوای فسفر ریشه Phosphorus content of roots	محتوای فسفر بخش هوایی Phosphorus content of Shoots	غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration	غلظت فسفر بخش هوایی Shoot phosphorus concentration
قارچ Fungus	3	12.18***	5.66**	0.00037 ^{ns}	0.00084**
فسفر Phosphorus	2	1.50*	11.77***	0.0019***	0.0021***
قارچ×فسفر Fungus×Phosphorus	6	2.463**	6.56**	0.00040*	0.00095***
خطا Error	24	0.432	1.098	0.00014	0.00017
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)		14.007	11.13	12.22	9.65

ns، ** و *** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ و ns غیرمعنی دار

*, **, and *** are respectively significant at the probability level of 0.05, 0.01, and 0.001, and non-significant ns

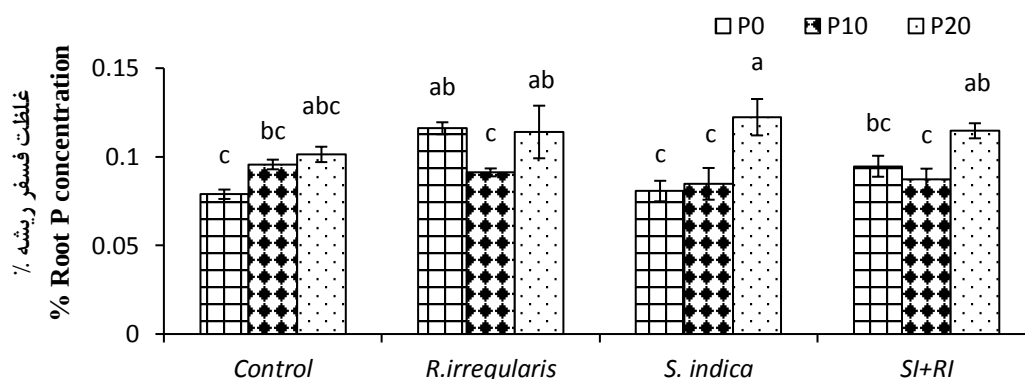


شکل ۸- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر غلظت فسفر بخش هوایی

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 8- The effect of fungus and phosphorus interaction on the concentration of shoot phosphorus

P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.



شکل ۹- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر غلظت فسفر ریشه

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 9- The effect of fungus and phosphorus interaction on the concentration of root phosphorus

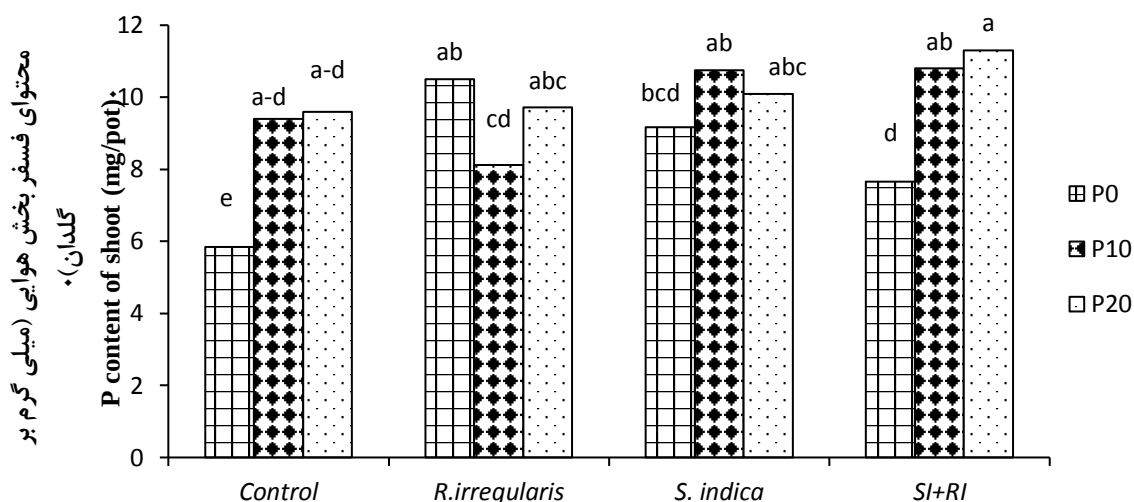
P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.

بحث

وزن خشک اندام هوایی و ریشه

نتایج نشان داد زمانی که هر دو قارچ همزمان تلقیح شدند وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه افزایش یافت. بنابراین کلنیزاسیون همزمان هر دو قارچ‌های *R. irregularis* و *S. indica* اثر مثبتی بر وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه داشت. البته ذکر شود که وزن تر و خشک اندام هوایی و ریشه در گیاهان تلقیح شده انفرادی با قارچ *R. irregularis* و *S. indica* بیش‌تر از گیاهان شاهد بدون قارچ بود.

در تیمار F₀ و (SI+RI)، محتوای فسفر بخش هوایی با افزایش سطح فسفر از P₀ به P₁₀ به‌طور معنی‌دار افزایش یافت درحالی‌که در تیمارهای تلقیح منفرد قارچ‌ها، افزایش سطح فسفر تأثیر معنی‌داری بر محتوای فسفر بخش هوایی نداشت. در P₀، محتوای فسفر بخش هوایی در تیمار RI به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از تیمار F₀ بود (شکل ۱۰). در P₀، محتوای فسفر ریشه فقط در RI افزایش معنی‌دار نشان داد. در تیمار SI، افزایش سطح فسفر تأثیر معنی‌داری بر محتوای فسفر ریشه نداشت. در تیمار (SI+RI)، محتوای فسفر ریشه فقط در سطح P₂₀ نسبت به سطوح پایین‌تر فسفر، افزایش معنی‌دار نشان داد (شکل ۱۱).

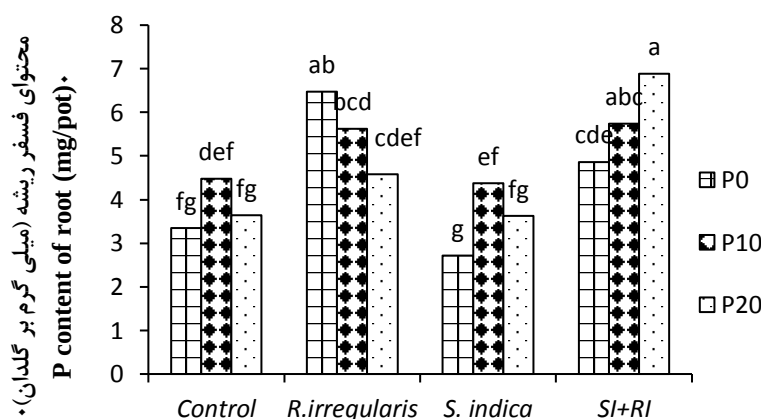


شکل ۱۰- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر محتوای فسفر بخش هوایی

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 10- The effect of fungus and phosphorus interaction on the phosphorus content of shoot

P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.



شکل ۱۱- اثر برهم کنش قارچ و فسفر بر محتوای فسفر ریشه

P₀: بدون فسفر، P₁₀: ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان و P₂₀: ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم گلدان. میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد هستند.

Figure 11- The effect of fungus and phosphorus interaction on the phosphorus content of root

P₀: no phosphorus, P₁₀: 10 mg/kg pot and P₂₀: 20 mg/kg pot. Means with at least one common letter have no significant difference by Duncan's multi-range test method at the 1% probability level.

همچنین گزارش شده است که وزن تر و خشک بیش‌تر گیاهان میکوریزی در مقایسه با گیاهان غیرمیکوریزی می‌تواند به دلیل انتشار میسلیوم‌های قارچ AMF و تشکیل یک سیستم جذب اضافی مکمل سیستم ریشه گیاه و تولید هورمون‌های رشد گیاه مانند اکسین و

در تحقیق دیگر نیز گزارش کردند که وزن خشک اندام هوایی و ریشه در تلقیح دوگانه گیاه گوجه فرنگی با این قارچ‌ها در شرایط تنش شوری به‌طور معنی‌دار بیشتر از تلقیح انفرادی آنها بود (Heidarianpour et al., 2020).

تلقیح انفرادی قارچ میکوریز و تلقیح دوگانه نه تنها نسبت به شاهد بدون فسفر، کاهش نداشت بلکه افزایش قابل ملاحظه نیز نشان داد و این در حالی است که درصد کلنیزاسیون ریشه در سطوح P_{10} و P_{20} کاهش معنی دار داشت (شکل ۳). بهره‌مندی گیاه از همزیستی میکوریزی علاوه بر مقدار فسفر قابل جذب خاک، به گونه گیاهی و مورفولوژی ریشه آن نیز بستگی دارد. گیاهان با ریشه افشان نظیر گرامینه‌ها، معمولاً وابستگی میکوریزی کمتری دارند ولی در بین آنها نیز تفاوت‌هایی دیده می‌شود. مثلاً در مقایسه سه گیاه گرامینه ذرت، جو و گندم، بیشترین درصد کلنیزاسیون میکوریزی در شرایط یکسان، مربوط به ذرت بوده و کم‌ترین آن در گندم مشاهده می‌گردد. مشاهدات مزرعه ای و گلدانی حاکی از آن است که کلنیزاسیون گیاه جو غالباً از گندم بیشتر می‌باشد (Aliasgharzarad et al., 2001). در برخی تحقیقات نشان داده شده که با افزایش فسفر قابل جذب خاک، میزان همزیستی و عملکرد قارچ همزیست کاهش می‌یابد و با توجه به اینکه قارچ همزیست فقط نقش تامین فسفر نداشته بلکه سایر اثرات مثبت نیز در گیاه دارد لذا با کاهش همزیستی مسلماً این اثرات نیز از بین رفته و در مقام مقایسه با گیاهان میکوریزی با فسفر قابل جذب متعادل، رشد و توسعه گیاه بهبود می‌یابد رتناپاک و همکاران (Ratnayake et al., 1978) گزارش کردند در زیادی فسفر، متابولیت‌های مورد نیاز برای ایجاد کلنیزاسیون قارچی به مقدار کافی از ریشه ترشح نمی‌شوند. در کمبود فسفر، افزایش نفوذپذیری غشا منجر به ترشح متابولیت‌ها در مقدار کافی برای تقویت رشد اولیه و افزایش تندش اسپورهای قارچ میکوریز می‌شود. کلنیزاسیون ریشه‌ها منجر به بهبود جذب فسفر شده و به دنبال آن، ترشحات ریشه‌ای کاهش می‌یابد.

درصد کلنیزاسیون ریشه

با افزایش سطح فسفر درصد کلنیزاسیون کاهش یافت و بیش‌ترین درصد کلنیزاسیون در سطح فسفر صفر P_0 مشاهده شد. با افزایش سطح فسفر به P_{10} و P_{20} درصد کلنیزاسیون به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. درصد کلنیزاسیون ریشه میزان موفقیت همزیستی بین قارچ میکوریز و شبه میکوریز و گیاه میزبان را نشان می‌دهد. بنابراین بین فسفر اضافه‌شده به خاک و درصد کلنیزاسیون ریشه رابطه منفی وجود دارد. البته ذکر این نکته ضروری است که رشد و توسعه قارچ میکوریزی در بستر ریشه زنده صورت می‌گیرد و برای رشد و نمو ریشه، وجود فسفر قابل جذب در مراحل اولیه ضرورت دارد و این مقدار نه تنها سبب محدودیت کلنیزاسیون نمی‌شود بلکه در استقرار اولیه قارچ نیز مفید واقع می‌گردد. هم‌چنین در بسیاری از تحقیقات نشان داده شده است که با افزایش فسفر قابل جذب در خاک، از یک حدی به بالا، اثر بازدارندگی بر قارچ نمایان می‌گردد ولی این حد بستگی به نوع گیاه دارد و در گیاهان پرتوقع نسبت به فسفر، این اثر بازدارندگی ممکن است در

سیتوکسین باشد و همین امر سبب بهبود تغذیه و تقویت رشد گیاهان میکوریزی می‌گردد. یکی از اصلی‌ترین کارکردهای قارچ AMF در نظام‌های کشاورزی افزایش دسترسی ریشه‌های گیاه به عناصر غذایی هست (Neumann and George, 2004; Jansa et al., 2011; Feddermann et al., 2010).

در مطالعات مختلف، تأثیر تلقیح قارچ *S. indica* را در افزایش زی‌توده گیاهان ذرت، تنباکو، جعفری، آرتمیزیا و درخت سپیدار مورد بررسی قرار دادند و نتایج آن‌ها حاکی از افزایش زیست‌توده قسمت های هوایی و ریشه گیاهان تلقیح شده با قارچ به میزان دو برابر نسبت به گیاهان شاهد تلقیح نشده بوده است (Verma et al., 1998). افزایش رشد و افزایش وزن خشک و تر بخش هوایی گیاه دارویی *Adhatoda vasica* در اثر تلقیح با قارچ *S. indica* را گزارش کردند (Rai and Varma, 2005; Rai et al., 2001). نشان دادند که قارچ *S. indica* وزن تر و خشک ریشه و بخش هوایی در گیاهان تلقیح شده را افزایش می‌دهد (Dolatbadi et al., 2010). تلقیح ریشه گیاه جو با قارچ *S. indica* سبب افزایش مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه نسبت به شرایط بدون تلقیح گردید. مقایسه وزن خشک اندام هوایی و ریشه گیاهان تلقیح شده با قارچ *S. indica* نسبت به گیاه شاهد در شرایط بهینه از نظر رطوبت خاک (ظرفیت مزرعه) به‌خوبی تأییدکننده اثر تحریک‌کنندگی رشد گیاه توسط قارچ است. به نظر می‌رسد که میسلیم‌های قارچ با پراکنش در اطراف ریشه‌های گیاه میزبان سطح جذب آب بالاتری را فراهم آورده و باعث می‌شوند تا در شرایط یکسان گیاهان تلقیح شده نسبت به شاهد آب بیش‌تری را در اختیار داشته باشند (Ghabuli et al., 2011).

به‌طور کلی تلقیح با *R. irregularis* فقط در سطح بدون فسفر توانست ماده خشک بخش هوایی را نسبت به شاهد بدون قارچ افزایش دهد و در سطوح بالاتر، تلقیح این قارچ نه‌تنها اثر مثبت نداشت بلکه سبب کاهش معنی‌دار نیز شد. در تلقیح با *S. indica* بیش‌ترین ماده خشک بخش هوایی در سطح P_{10} حاصل شد که احتمالاً به دلیل تأثیرپذیری کم‌تر این قارچ از فسفر قابل جذب است، گرچه سطوح بالاتر فسفر P_{20} سبب کاهش رشد بخش هوایی شده است.

افزایش فسفر قابل جذب در بستر کشت با محدود کردن فعالیت قارچ همزیست، سبب کاهش رشد گیاه نیز می‌شود. اثر مثبت قارچ‌های میکوریزی در رشد گیاه، عموماً در خاک‌هایی دیده می‌شود که غلظت عناصر غذایی نظیر فسفر در فاز محلول کم‌تر باشد (Aliasgharzarad, 1997). اثر بازدارندگی فسفر قاعدتاً در غلظت‌های بالای فسفر اتفاق می‌افتد گرچه آستانه غلظت فسفر نیز تابع شرایط دیگر از جمله گونه گیاهی است. در آزمایش حاضر، در سطح P_{10} ، گرچه وزن خشک شاخساره در تلقیح انفرادی قارچ میکوریز کاهش یافته ولی در تلقیح دوگانه، حتی در سطح P_{20} ، بیش‌ترین وزن خشک شاخساره دیده می‌شود (شکل ۸). علاوه بر این، وزن خشک ریشه در سطوح P_{10} و P_{20} در

غلظت‌های بالاتر فسفر قابل جذب اتفاق بیفتد. در این ارتباط، اختصاص کربن از گیاه به قارچ تابع مقدار فسفر تحویلی به گیاه از طرف قارچ است (Olsson et al., 2010).

تلقیح دوگانه دو قارچ منجر به افزایش معنی‌دار درصد کلنیزاسیون کل ریشه شد. این امر به حضور دوگانه قارچ‌ها در ریشه برمی‌گردد زیرا وقتی دو قارچ در ریشه حضور دارند حجم بیش‌تری از ریشه توسط قارچ‌ها اشغال می‌شود و درصد کلنیزاسیون ریشه بالا می‌رود. گرچه درصد کلنیزاسیون کل در حالت تلقیح دوگانه بیش‌تر است ولی سهم هر قارچ در این حالت، در مقایسه با تلقیح انفرادی آنها کمتر است و چنین حالتی نیز قابل تفسیر است چون محصولات فتوسنتزی گیاه بین دو قارچ تقسیم می‌شود و سهم هر یک از آنها کاهش می‌یابد و نتیجه آن در میزان کلنیزاسیون آنها منعکس می‌گردد.

گزارش‌های دیگری نیز وجود دارند که نشان می‌دهد، که حضور گونه‌های قارچ *Serendipita*، کلنیزاسیون ریشه توسط قارچ میکوریز آربوسکولار را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند (Hallasgo et al., 2020).

مطابق با (شکل ۳) در تیمار تلقیح دوگانه، درصد کلنیزاسیون در تمامی سطوح فسفر به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از سایر تیمارها بود و با افزایش سطح فسفر درصد کلنیزاسیون کل به نسبت تیمارهای منفرد کمتر کاهش یافت. به عبارت دیگر در تلقیح دوگانه اثر کاهشی فسفر بر درصد کلنیزاسیون کل، کمتر می‌شود. مطابق با (شکل ۷) در تلقیح دوگانه، اثر فسفر بر سهم کلنیزاسیون قارچ *R. irregularis* نسبت به تلقیح منفرد آن کمتر می‌شود به‌طوری‌که فقط در سطوح بالاتر فسفر P_{20} به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. به نظر می‌رسد که در داخل ریشه حضور قارچ *S. indica* سبب کاهش اثر منفی فسفر بر درصد کلنیزاسیون قارچ *R. irregularis* می‌شود. در این حالت در سطوح بالاتر فسفر که سهم درصد کلنیزاسیون قارچ *R. irregularis* به‌طور معنی‌دار کاهش یافت، سهم درصد کلنیزاسیون قارچ *S. indica* به‌طور غیر معنی‌دار افزایش یافت به عبارتی احتمالاً بین دو قارچ رابطه آنتاگونیستی وجود دارد. همان‌طور که در (شکل ۷) مشاهده می‌شود در تیمار تلقیح دوگانه (SI+RI)، سهم درصد کلنیزاسیون هر یک از قارچ‌ها، کمتر از تلقیح منفرد آنها می‌باشد و این کاهش در قارچ *S. indica* بیش‌تر از قارچ *R. irregularis* و غالبیت با قارچ *R. irregularis* بود.

مقدار گلومالین خاک و ریشه

گلومالین خاک در تلقیح دوگانه (SI+RI)، کمتر تحت تأثیر *S. indica* قرار گرفت ولی در ریشه کاهش یافت. به نظر می‌رسد که در داخل ریشه، حضور *S. indica* سبب کاهش زیست توده قارچ *R. irregularis* می‌شود. از آنجایی که گلومالین بعنوان مولکول نشانگر

برای زیست توده قارچ AM در ریشه و خاک است لذا حضور *S. indica* در ریشه باعث کاهش جمعیت قارچ *R. irregularis* نسبت به حالت تلقیح منفرد آن می‌شود. در حالت تلقیح منفرد RI مقدار گلومالین ریشه‌ای به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از تلقیح دوگانه (SI+RI) بود. این نشان می‌دهد در تلقیح دوگانه، همزیستی قارچ *R. irregularis* نسبت به حالت منفرد آن کاهش یافته است. در تلقیح دوگانه (SI+RI) مقدار گلومالین (فعالیت قارچ *R. irregularis*) به‌طور معنی‌دار کاهش یافت. در نتیجه، در تلقیح دوگانه حضور قارچ *S. indica* بر همزیستی قارچ *R. irregularis* تأثیر داشته است و همزیستی AMF را کاهش داده است. با افزایش سطح فسفر مقدار گلومالین ریشه‌ای کاهش یافت؛ می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش فعالیت قارچ در اثر افزودن فسفر به خاک تولید گلومالین کاهش می‌یابد. یک همبستگی منفی بین فسفر اضافه‌شده به خاک و تشکیل همزیستی میکوریزی گزارش شده است (Sanders and Tinker, 1973).

غلظت و محتوای فسفر بخش هوایی و ریشه

در مطالعه حاضر، غلظت فسفر بخش هوایی و ریشه تحت تأثیر کاربرد فسفر، قارچ میکوریز و شبه میکوریز قرار گرفت. با افزایش سطح فسفر مقدار فسفر بخش هوایی و ریشه افزایش یافت. این که کم‌ترین درصد فسفر ریشه در سطح P_{10} حاصل شده است (حتی کم‌تر از تیمار P_0 است) می‌تواند به دلیل اثر رقت^۱ باشد؛ بدین منظور محتوای فسفر در بخش هوایی و ریشه محاسبه شد.

بیش‌ترین مقدار فسفر بخش هوایی در تلقیح منفرد *R. irregularis* مشاهده شد؛ در تلقیح منفرد با قارچ *S. indica* و تلقیح دوگانه اختلاف معنی‌داری با شاهد بدون قارچ نداشت. این اتفاق نیز می‌تواند به دلیل اثر رقت باشد، وقتی در اثر تیماری (قارچ یا فسفر) وزن گیاه زیاد می‌شود ماده خشک هم زیاد شده و در نتیجه غلظت فسفر در ماده خشک کاهش می‌یابد. نتایج محتوای فسفر بخش هوایی و ریشه این گفته را به اثبات رساند. محتوای فسفر بخش هوایی در تلقیح دوگانه و تلقیح منفرد قارچ *S. indica* و *R. irregularis* در یک سطح آماری و دارای اختلاف معنی‌داری با شاهد بودند. اثرات قارچ بر غلظت فسفر ریشه معنی‌دار نشد ولی بر محتوای فسفر ریشه معنی‌دار بود. محتوای فسفر ریشه در تلقیح دوگانه و تلقیح منفرد *R. irregularis* به‌طور معنی‌دار بیش‌تر از شاهد بود و در تلقیح منفرد *S. indica* با شاهد اختلاف معنی‌داری نداشت. به نظر می‌رسد قارچ *R. irregularis* نقش بیش‌تری در مقدار فسفر جذب‌شده توسط ریشه دارد.

تلقیح منفرد *R. irregularis* در سطح صفر فسفر اثر مثبتی روی فسفر بخش هوایی و ریشه داشت. به عبارتی قارچ *R. irregularis* در سطوح پایین فسفر موجب افزایش غلظت فسفر گیاه می‌شود. در

کلنیزاسیون و مقدار گلومالین کاهش یافتند. به عبارت دیگر، افزایش غلظت فسفر قابل جذب خاک، گسترش همزیستی قارچ‌های *R. irregularis* و *S. indica* را محدود کرد و این محدودیت برای قارچ *R. irregularis* بیش‌تر بود. حضور همزمان هر دو قارچ در ریشه سبب برهم‌کنش منفی بین آن‌ها شد. به‌طوری‌که در تلقیح دوگانه، سهم درصد کلنیزاسیون هریک از قارچ‌ها نسبت به حالت تلقیح انفرادی آن‌ها کاهش یافت اما درصد کلنیزاسیون کل به‌طور معنی‌دار افزایش یافت. به‌طور کلی وضعیت رشد و جذب عناصر غذایی در حالت تلقیح دوگانه بهتر از تلقیح هریک از آن‌ها به صورت منفرد بود. در این تحقیق با اندازه‌گیری گلومالین به‌عنوان مولکول نشانگر قارچ *R. irregularis* توانستیم درصد کلنیزاسیون هریک از قارچ‌ها را در حالت تلقیح دوگانه برآورد نماییم ولی برای صحت‌سنجی روش، نیاز به آزمایش‌های بیشتری است.

تیمارهای تلقیح منفرد و تلقیح دوگانه قارچ‌ها افزایش سطح فسفر تأثیر معنی‌داری بر غلظت فسفر بخش هوایی نداشت زیرا با افزایش مقدار فسفر قابل جذب در بستر کشت فعالیت قارچ همزیست محدود می‌شود.

نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تغییرات کلنیزاسیون ریشه جو با قارچ‌های *R. irregularis* و *S. indica* در تلقیح انفرادی و دوگانه و در سطوح مختلف فسفر از طریق اندازه‌گیری گلومالین به عنوان مولکول نشان برای AMF بود. اثر منفی فسفر بر کلنیزاسیون قارچ آربوسکولار و هم‌چنین مقدار گلومالین (به عنوان شاخصی از زیست توده قارچ آربوسکولار) مشاهده شد که بیش‌ترین درصد کلنیزاسیون ریشه و مقدار گلومالین در سطح صفر فسفر بود و در سطوح بالاتر فسفر درصد

منابع

1. Achatz, B., Von Ruden, S., Andrade, D., Neumann, E., Pons-Kuhnemann, J., Franken, P., Kogel, K.H., & Waller, F. (2010). Root colonization by *Piriformospora indica* enhances grain yield in barley under diverse nutrient regimes by accelerating early plant development. *Plant and Soil*, 333, 59-70. <http://doi.org/10.1007/s11104-010-0319-0>
2. Aliasgharzad, N. (1997). *Soil Microbiology and Biochemistry (translation)*, First edition, Tabriz University Publications.
3. Aliasgharzad, N., Rastin, S.N., Towfighi, H., & Alizadeh, A. (2001). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in saline soils of Tabriz Plain of Iran in relation to some physical and chemical properties of soil. *Mycorrhiza*, 11, 119-122. <http://doi.org/10.1007/s005720100113>
4. Cottenie, A. (1980). *Soil and Plant Testing*. FAO soils Bullention, 38/2: 94-100.
5. Deshmukh, S., & Kogel, K. (2007). *Piriformospora indica* protects barley from root disease caused by *Fusarium*. *Journal of Plant Disease and Protection*, 114(6), 236-268. <http://doi.org/10.1007/BF03356227>
6. Dolatabadi, H.K., Mohammadi Goltape, A., Moeini, A., & Verma, A. (2012). Evaluation of different investigations of auxin and fungus *Piriformospora indica* and *Sebacina vermifera* on peppermint (*Mentha piperita*) and thyme (*Thymus vulgaris*) in vitro. *Quarterly Journal of Medicinal Plants*, 2(9), 13-22. (In Persian)
7. Feddermann, N., Finaly, R., Boller, T., & Elfstrand, M. (2010). Functional diversity in arbuscular mycorrhiza-the role of gene expression, phosphorus nutrition and symbiotic efficiency. *Fungal Ecology*, 3, 1-8. <http://doi.org/10.1016/j.funeco.2009.07.003>
8. Ghabuli, M., Shahriari, F., Sepehari, M., Marashi, H., & Hosseini Salekdeh, A. (2011). The effect of the endophytic fungus *Piriformospora indica* on some characteristics of barley *Hordeum vulgare* L. under drought stress conditions, *Journal of Agroecology*, 3(3), 328-336. (In Persian)
9. Gholami, A., & Kochaki, A. (2010). *Mycorrhiza in Sustainable Agriculture (translation)*, Shahrood University Publications.
10. Hallasgo, A.M., Spangl, B., Steinkellner, S., & Hage-Ahmad, K. (2020). The fungal endophyte *Serendipita williamsii* does not affect Phosphorus status but carbon and nitrogen dynamics in Arbuscular Mycorrhizal tomato plants. *Journal of Fungi*, 6(4), 233. <http://doi.org/10.3390/jof6040233>
11. Heidarianpour, M.B., Aliasgharzad, N., & Olsson, P.A. (2020). Positive effects of co-inoculation with *Rhizophagus irregularis* and *Serendipita indica* on tomato growth under saline conditions, and their individual colonization estimated by signature lipids. *Mycorrhiza*, 30(4), 455-466. <http://doi.org/10.1007/s00572-020-00962-y>
12. Jansa, J., Finlay, R., Wallander, H., Smith, F.A., & Smith, S.E. (2011). *Role of mycorrhizal symbioses in phosphorus cycling*. p.137-168. In :Phosphorus in action, vol 6. Springer, Berlin, Heidelberg.
13. Junker, A., Muraya, M.M., Weigelt-Fischer, K., Arana-Ceballos, F., Klukas, Ch., Melchinger, A.E., Meyer, Rh.C., Riewe, D., & Altmann, Th. (2015). Optimizing experimental procedures for quantitative evaluation of crop plant performance in high throughput phenotyping systems. *Plant Science*, 5, 770. <http://doi.org/10.3389/fpls.2014.00770>
14. Koide, R.T., & Kabir, Z. (2000). Extraradical hyphae of the mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* can hydrolyse organic phosphate. *New Phytologists*, 148(3), 511-517. <http://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00776.x>
15. Kormanic, P.P., & Graw, M.C. (1982). *Methods and Principles of Mycorrhizal Research*. Quantification of VA mycorrhizae in plant roots. p. 37-45. In: Schenck NC (Ed). Saint Paul Minnesota American, Phytopathological

- Society.
16. Kumari, R., Kishan, H., Bhoon, YK., & Varma, A. (2003). Colonization of cruciferous plants by *Piriformospora indica*. *Current Science*, 85, 1672-1674.
17. Malekzadeh, E., Majidi, J., Aliasgharzad, N., & Abdolalizadeh, J. (2016). The effect of lead on the glomalin content of hypha and root reactive with monoclonal antibody and Bradford in both in vitro and pot culture conditions. *Journal of Water and Soil*, 30(2), 605-618. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22067/JSW.V30I2.47802>
18. Najafi, N., Mostafaei, M., Dabagh Mohammadi Nasab, A., & Ostan, S. (2013). Effect of intercropping and farmyard manure on the growth, yield and protein concentration of corn, bean and bitter Vetch, *Science of Agriculture and Sustainable Production*, 23(1), 115-99. (In Persian with English abstract)
19. Neumann, E., & George, E. (2004). Colonization with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (Nicol & Gred) enhanced phosphorus uptake from dry soil in *Sorghum bicolor* (L.). *Plant and Soil*, 261, 245-255. <http://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000035573.94425.60>
20. Nichols, K.A. (2003). *Characterization of glomalin, a glycoprotein produced by arbuscular mycorrhizal fungi*. Ph.D Dissertation. p.285. University of Maryland, College Park, Mryland.
21. Nichols, K.A., & Wright, S.F. (2004). *Contribution of fungi to soil organic matter in agroecosystems*. p. 179-198. In: F Magdoff and RP Weil (eds). *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, Florida.
22. Norrif, IR., Read, D.J., & Varma, A.K. (1992). *Methods in Microbiology Techniques for Study of Mycorrhiza*. Academic press, London.
23. Olsson, PA., Rahm, J., & Aliasgharzad, N. (2010). Carbon dynamics in mycorrhizal symbioses is linked to carbon costs and phosphorus benefits. *FEMS Microbiology Ecology*, 72(1), 125-131. <http://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2009.00833.x>
24. Rai, M., Acharya, D., Singh, A., & Varma, A. (2001). Positive growth responses of the medicinal plants *Spilanthes calva* and *Withania somnifera* to inoculation by *Piriformospora indica* in a field trial. *Mycorrhiza*, 11(3), 123-128. <http://doi.org/10.1007/s005720100115>
25. Rai, M., & Varma, A. (2005). Arbuscular mycorrhiza-like biotechnological potential of *Piriformosporaindica*, which promotes the growth of *Adhatodavasica*. *Journal of Biotechnology*, 8, 107-111.
26. Ratnayake, M., Leonard, R.T., & Menge, J.A. (1978). Root exudation in relation to supply of phosphorus and its possible relevance to mycorrhizal formation. *New Phytologist*, 81, 543-552.
27. Richardson, A.E., Barea, J.M., McNeil, A.M., & Prigent-Combaret, C. (2009). Acquisition of phosphorus and nitrotrrogen in rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms. *Plant and Soil*, 321, 305-339. <http://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
28. Rillig, M.C. (2004). Arbuscular mycorrhizal and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 7(8), 740-754. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00620.x>
29. Rillig, MC., & Mummey, DL. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
30. Rosier, C.L., Hoyer, A.T., & Rillig, M.C. (2006). Glomalin-related soil protein: assessment of current detection and quantification tools. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8), 2205-2211. <http://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.021>
31. Sanders, F.E., & Tinker, P.B.H. (1973). Phosphate flow into mycorrhizal roots. *Pesticide Science*, 4, 385-395.
32. Schenck, N.C., & Perez, Y. (1988). *Manual for the Identification of VA Mycorrhizal Fungi*. p. 241. IN: Vesicle Arbuscular Mycorrhizal, 1453 Fifiel Hall, University of Florida, Gainesville, Florida, USA.
33. Turner, B.L., Lambers, H., Condron, L.M., Carmer, M.D., Leake, J.R., Richardson, A.E., & Smith, S.E. (2013). Soil microbial biomass and the fate of phosphorus during long-term ecosystem development. *Plant and Soil*, 367, 225-234. <http://doi.org/10.1007/s11104-012-1493-z>
34. Verma, S., Varma, A., Rexer, KH., Hassel, A., Kost, G., Sarabhoy, A., Bisen, P., Butehorn, B., & Franken, P. (1998). *Piriformospora indica*, gen. et sp. Nov., a new root-colonizing fungus. *Mycologia*, 90(5), 896-903. <http://doi.org/10.1080/00275514.1998.12026983>
35. Vlot, AC., Dempsey, DA., & Klessig, DF. (2009). Salicylic acid a multifaceted hormone to combat disease. *Annual Review of Phytopathology*, 47, 177-206. <http://doi.org/10.1146/annurev.phyto.050908.135202>
36. Waller, F., Achatz, B., Blatruschat, H., Fodor, J., Becker, K., Fischer, M., Heier, T., Huckelhoven, R., Neumann, C., Wettstein, D., Franken, P., & Kogel, KH. (2005). The endophytic fungus *Piriformospora indica* reprograms barley to salt-stress tolerance, disease resistance, and higher yield. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 102(38), 13386-13391. <http://doi.org/10.1073/pnas.0504423102>
37. Westerm, L.Z. (1990). *Soil Testing and Plant Analysis*. Soil Science Society of America Journal, Inc. Madison, Wisconsin USA.
38. Williams, S.C.K., Vestberg, M., & Uosukainen, M. (1992). Effects of fertilizers and arbuscular mycorrhizal fungi on the post-vitro growth of micropropagated strawberry. *Agronomie*, 12(10), 851-857. <http://doi.org/10.1051/agro:19921020>
39. Wright, S.F., Franke-Synder, M., Morton, J.B., & Upadhyaya, A. (1996). Time-course study and partial

- characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant and Soil*, 181(2), 193-203. <https://doi.org/10.1007/BF00012053>
40. Wright, S.F., & Upadhyaya, A. (1999). Quantification of arbuscular mycorrhizal fungi activity by the glomalin concentration on hyphal traps. *Mycorrhiza*, 8, 283–285 . <https://doi.org/10.1007/s005720050247>
41. Zhu, Y.G., & Miller, R.M. (2003). Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant system. *Trends in Plant Science*, 8, 407-409. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(03\)00184-5](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(03)00184-5)



Evaluation of Nutritional Status of Quince Trees (*Cydonia oblonga* Mill.) by Compositional Nutrient Diagnosis Method (CND) in Isfahan Province

A. Gandomkar Deligani¹, Z. Khanmohammadi^{2*}, M. Basirat³

Received: 06-12-2022

Revised: 28-01-2023

Accepted: 29-01-2023

Available Online: 29-01-2023

How to cite this article:

Gandomkar, A., Khanmohammadi, Z., & Basirat, M. (2023). Evaluation of nutritional status of quince trees (*Cydonia oblonga* Mill.) by compositional nutrient diagnosis method (CND) in Isfahan province. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 281-293. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79923.1231>

Introduction

Quince with the scientific name "*Cydonia oblonga* Mill." is one of the most important horticultural products in the word including Iran. According to the average production from 1994 to 2020, Iran was the fourth largest quince producer in the world. Isfahan province is one of the most important centers of high quality quince production with 2432 hectares of cultivated area and annual production of 25986 tons. Most of the quince orchards are located in the cities of Natanz and Isfahan. Plant nutrition as an important factor in growth, is a function of nutrients and environmental conditions interactions. Assessing the nutritional status of plants is based on precise determination of nutrients and appropriate application method to diagnosis and interpret the results. Various methods have been used to evaluate the nutritional status of the plant, such as the Critical Value Approach (CVA), the Deviation from Optimum Percentage (DOP), the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) and the Compositional Nutrient Diagnosis (CND). The CND method expresses interactions by considering the ratio of one element to the geometric mean of all elements. Then high and low functional groups are separated, by using mathematical and statistical methods and application of cumulative function of the variance ratio of nutrients and the chi-square distribution function. Finally, CND nutrients norms and indices such balance index are calculated step by step. Therefore, considering the importance of the quince production in the country and the lack of sufficient knowledge to determine its nutritional status, the present study was conducted with the aim of investigating the nutritional status of quince trees using the CND method and determining the nutrients norms for this product.

Materials and Methods

In order to evaluate the nutritional status of quince trees using the CND method, 28 orchards were selected in the cities of Isfahan and Natanz. The orchards were selected such a way that they had different ranges of yield. The geographical location was recorded for each orchard. Then random and composite sampling of leaves was done from branches without fruit in July 2018. Concentration of nitrogen phosphorous, potassium, calcium, magnesium, iron, manganese, zinc, copper and boron was measured in quince leaves. At the end of season, the yield was determined for each orchard. The orchards divided into two groups based on high and low yields. The CND norms, CND nutritional index and nutritional balance index (r^2) were computed based on steps of Parent and Dafir. The balance index of nutritional elements (r^2) was calculated by Keith-Nilson method based on the Chi-square statistical distribution function (K^2) in Excel software.

Results and Discussion

1 and 2- Scientific Staff and Assistant Professor, Departments of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: Z.khanmohamadi@areeo.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Soil Chemistry, Fertility and Plant Nutrition Researches, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Karaj, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.79923.1231](http://doi.org/10.22067/jsw.2023.79923.1231)

According to results of cumulative distribution function of nutrient variance and considering the yield of 23 tons per hectare as the intermediate yield, 25% of the studied orchards were in the high yield group and 75% of the orchards were in the low yield group. After solving the third-rank cumulative function equations of the studied nutrients, the highest yield was obtained for potassium Fci (VK) = 21.98 and the lowest value was for nitrogen Fci (VN) = 15.37. CND standard norms of nutrients and residual value were described as: $V^*N= 2.91$, $V^*P= 1.39$, $V^*K= 2.91$, $V^*Ca= 2.13$, $V^*Mg= 1.35$, $V^*Fe= -2.01$, $V^*Mn= -3.12$, $V^*Zn= -3.97$, $V^*Cu= -4.85$, $V^*B= -3.51$ and $V^*Rd= 6.78$. The CND nutrient index revealed that potassium and nitrogen had the most negative index among macronutrients in the low-yield orchard group. The low amount of soil organic matter and the high presence of sand can contribute to the negative nitrogen index. Among the micronutrients, the iron index was negative in 67.7% of the low-yield orchards. Zinc and copper had the next highest nutritional requirements in most orchards. The presence of calcareous conditions in the soil of the studied orchards may be one of the reasons for this observation. The estimation of the nutritional balance index indicated that the r^2 value in orchards with low yield was 60.3% higher than that in high-yield orchards.

Conclusion

CND nutritional balance index (r^2), specially in orchards with low yield was more than zero (20.85), indicating nutritional imbalance in these orchards. Proper management and balanced application of chemical fertilizers should be considered. This can increase the yield and quality of quince production.

Keywords: Nutritional balance, Quince tree, Standard norms

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۸۱-۲۹۳

ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات به (*Cydonia oblonga* Mill.) با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) در استان اصفهان

اکبر گندمکار^۱ - زهرا خان محمدی^{۲*} - مجید بصیرت^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹

چکیده

یکی از روش‌های مهم برای تفسیر نتایج تجزیه شیمیایی برگ و بررسی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان، روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) است. این پژوهش با هدف ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات (به) و برآورد اعداد مرجع (نرم‌های) عناصر غذایی برای این محصول در ۲۸ باغ از شهرستان های اصفهان و نطنز انجام شد. نمونه‌های مرکب از برگ‌های با رشد کامل بهاره درختان و از شاخه‌های بدون میوه، در تیرماه سال ۱۳۹۸ جمع‌آوری و غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی، مس و بور در آن‌ها اندازه‌گیری شد. در پایان فصل، عملکرد در هر باغ مشخص شد. سپس با استفاده از روش CND و با کاربرد تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی، اعداد مرجع (نرم) و شاخص‌های عناصر غذایی CND تعیین شدند. بر اساس نتایج حاصل از تابع توزیع تجمعی واریانس و با در نظر گرفتن عملکرد ۲۳ تن در هکتار به عنوان عملکرد حدواسط، ۲۵ درصد باغات مورد مطالعه در گروه با عملکرد زیاد و ۷۵ درصد باغات در گروه با عملکرد کم قرار گرفتند. پس از حل معادلات تابع تجمعی درجه سوم مربوط به عناصر غذایی مورد مطالعه، بیشترین عملکرد برای عنصر پتاسیم $F_i^c(V_K) = 21/98$ و کم‌ترین مقدار آن برای عنصر نیتروژن $F_i^c(V_N) = 15/37$ به دست آمد. اعداد مرجع CND برای عناصر غذایی و قسمت باقیمانده به شرح $V^*_N = 2/91$ ، $V^*_P = 1/39$ ، $V^*_K = 2/91$ ، $V^*_{Ca} = 2/13$ ، $V^*_{Mg} = 1/35$ ، $V^*_{Fe} = -2/01$ ، $V^*_{Cu} = -4/85$ ، $V^*_{Zn} = -3/97$ ، $V^*_{Mn} = -3/12$ ، $V^*_{B} = -3/51$ و $V^*_{Rd} = 6/78$ به دست آمد. در بین عناصر غذایی پرمصرف پتاسیم و نیتروژن و در بین عناصر غذایی کم‌مصرف آهن و روی منفی‌ترین شاخص را به خود اختصاص دادند و بیشترین الویت نیاز غذایی متعلق به آن‌ها بود. میانگین شاخص تعادل تغذیه‌ای (T^2) در باغات با عملکرد کم (۲۰/۸۵) بسیار بزرگتر از صفر بود که نشان دهنده عدم تعادل تغذیه‌ای در این باغات است.

واژه‌های کلیدی: اعداد مرجع، به، تعادل تغذیه‌ای

مقدمه

۱۹۹۴ تا سال ۲۰۲۰ ایران چهارمین تولیدکننده (به) در جهان بوده است. سطح زیر کاشت (به) در ایران در سال ۱۳۹۹ حدود ۱۱۲۲۸ هکتار و میزان تولید آن حدود ۹۱۱۰۳ تن بوده است (Anonymous, 2021). میزان تولید نهال شناسه دار (به) در کشور در سال ۱۳۹۵ حدود ۴۵۹۵۱۰ اصله بوده است و پنج استان برتر از نظر تولید نهال (به) در سال ۱۳۹۵

به نام علمی *Cydonia oblonga* Mill. از گیاهان تجاری خانواده Rosaceae است و بومی قفقاز و آسیای مرکزی می‌باشد. در حال حاضر این درخت در تمامی قاره‌ها در مناطق معتدله گرم و مناطق معتدل کاشته می‌شود (Postman, 2012). طبق میانگین تولید از سال

۱ و ۲- به‌ترتیب محقق و استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Z.khanmohamadi@areeo.ac.ir)

۳- استادیار بخش تحقیقات شیمی، حاصلخیزی خاک و تغذیه گیاه؛ موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

شامل اصفهان، فارس، مازندران، کرمان و البرز بودند (Anonymus, 2016). بر اساس اطلاعات آمارنامه کشاورزی سال ۱۳۹۹، استان اصفهان با ۲۴۳۲ هکتار سطح زیر کشت و تولید سالانه ۲۵۹۸۶ تن میوه، از مهمترین مراکز تولید میوه (به)، با کیفیت بسیار خوب در کشور است. بیشتر باغات (به) در این استان در شهرستان‌های نطنز و اصفهان واقع شده است (Anonymus, 2021). تغذیه گیاه به عنوان یک عامل مهم در رشد، تابعی از اثرات متقابل عناصر غذایی و شرایط محیطی است. بنابراین تعیین دقیق عناصر غذایی مورد نیاز گیاه نیازمند روش علمی مبتنی بر اندازه‌گیری است تا به کمک آن میزان کمبود عناصر غذایی تعیین گردد (Daryashenas and Rezai, 2011). برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاه روش‌های مختلفی از جمله روش غلظت بحرانی^۱ (CVA)، انحراف از درصد بهینه^۲ (DOP)، روش تلفیقی تشخیص و توصیه^۳ (DRIS) و روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی^۴ (CND) مورد استفاده قرار گرفته است (Feyzizadeh and Samadi, 2016; Daryashenas and Dehghani, 2006). در این روش‌ها به عدم تعادل عناصر غذایی در گیاه رتبه‌ای داده می‌شود و در نهایت اهمیت عناصر در تغذیه متعادل برای آن محصول و در منطقه مورد مطالعه مشخص می‌گردد. در هر یک از این روش‌ها نرم‌هایی برای هر یک از عناصر تعیین می‌گردد. در حقیقت نرم‌ها برای هر عنصر غذایی بسته به فراوانی کمبود آن عنصر رتبه‌بندی می‌گردد. تفسیر نتایج به روش غلظت بحرانی بصورت محدوده کمبود، کافی و زیاد بیان می‌شود که هر کدام از این محدوده‌ها بصورت ارقام مرجع (نرم‌ها) برای سنین معینی از رشد با وسعت زیادی از غلظت عناصر غذایی ارائه شده است. در این روش اثرات متقابل عناصر در درون محدوده‌های وسیع غلظت‌ها مستتر بوده و قابل تفکیک نیست. در روش DRIS با در نظر گرفتن نسبت دو عنصری (dual-ratio) نظیر N/P یا N/K تا حدود زیادی اثرات متقابل عناصر منظور شده است. یکی از روش‌های نسبتا جدید برای بررسی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان، روش CND است که اولین بار به وسیله پرنه و دفیر (Parent and Dafir, 1992) ارائه شد. این روش با در نظر گرفتن نسبت یک عنصر به همه عناصر (multi-ratio) و استفاده از روش‌های ریاضی و آماری، اثرات متقابل عناصر را بیان می‌دارد. در سامانه CND وضعیت هر عنصر غذایی نسبت به میانگین هندسی تمام عناصر محاسبه می‌گردد (Hernandez-Caraballo et al., 2008)؛ با کاربرد تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی و تابع توزیع مربع کای، گروه‌های عملکردی زیاد و کم از یکدیگر تفکیک می‌شوند و بعد شاخص‌های CND عناصر غذایی به روش گام به گام محاسبه می‌شوند (Khiari et al. 2001a,b). با کمک این روش می‌توان وضعیت تغذیه‌ای گیاه را شناسایی و استراتژی کودی را تعیین نمود. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی به منظور بررسی وضعیت

محصولات باغی با استفاده از روش CND انجام شده است. زندگی همکاران (Zandi et al. 2021) در پژوهشی به بررسی اثر مدیریت‌های مختلف کودی بر وضعیت تغذیه‌ای سیب با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که بر اساس روش تجزیه واریانس کیت-نلسون، عملکرد میوه ۸/۷۵ کیلوگرم در هر درخت به عنوان عملکرد میوه بحرانی برای تفکیک دو گروه با عملکرد میوه کم و زیاد انتخاب شد. در گروه با عملکرد میوه کم تیمارهای شاهد، کود دامی و کمپوست و در گروه با عملکرد میوه زیاد تیمارهای تلفیقی، کود شیمیایی و بیوپار قرار گرفتند. همچنین در گروه با عملکرد میوه زیاد میانگین اعداد مرجع برای نیتروژن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم برگ مثبت و برای فسفر، آهن، روی، مس و منگنز برگ منفی بودند. بررسی شاخص تعادل عناصر غذایی، عدم تعادل عناصر غذایی در مدیریت‌های کودی مختلف را نشان داد. گیكلویی و همکاران (Geiklooi et al., 2021) در پژوهشی به منظور بررسی وضعیت تغذیه‌ای مزارع گندم شرکت کشت و صنعت مغان استان اردبیل از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) استفاده نمودند. بر اساس شاخص‌های CND به دست آمده در این پژوهش، عنصر روی محدودکننده‌ترین عنصر غذایی در تغذیه گندم بود و پس از آن عناصر مس، آهن، منگنز و بور قرار گرفتند. همچنین عناصر نیتروژن، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و فسفر به ترتیب در گندم زیادبود داشتند. در این پژوهش عملکرد نقطه عطف، برابر با ۴۳۳۲ کیلوگرم در هکتار به عنوان معیار جداسازی گروه‌های با عملکرد کم و زیاد از یکدیگر در نظر گرفته شد. بر این اساس ۴۴/۸ درصد از نمونه‌ها در گروه با عملکرد زیاد قرار گرفتند. حسینی و همکاران (Hosseini et al. 2020) نیز وضعیت تغذیه‌ای باغ‌های لیموترش در هرمزگان را با روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج، کمبود عناصر نیتروژن، پتاسیم و منگنز محدودکننده‌های عمده تولید لیموترش در باغ‌های هرمزگان بودند. به علاوه زیادی عناصر فسفر، کلر، آهن و بور نیز تأثیر نامطلوبی بر عملکرد محصول لیمو داشت. در این پژوهش غلظت بهینه عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، آهن، منگنز، روی، مس، بور و کلر در برگ لیموترش باغ‌های مورد مطالعه تعیین شد. طبق نتایج به دست آمده در این باغ‌ها مصرف عناصر نیتروژن، منگنز و پتاسیم باید در اولویت قرار گیرد. نتایج پژوهش دیگری با هدف مقایسه وضعیت عناصر غذایی در ارقام مختلف زیتون با استفاده از شاخص‌های DOP، DRIS و CND نشان داد که در بین عناصر پرمصرف، پتاسیم و از عناصر کم مصرف، منگنز زیادبود داشتند. همچنین رقم مانزانیلا اختلاف معنی‌داری با سایر ارقام داشت و در جذب عناصر مؤثرتر بود. مقایسه نتایج هر یک از شاخص‌های DOP، DRIS و CND نیز نشان دهنده رویکرد متفاوت هر شاخص در نشان دادن میزان کمبود یا زیادبود

نیتروژن کل به روش کدال (Bremner and Mulvaney, 1982) و فسفر قابل دسترس خاک به روش اولسن اندازه‌گیری شد (Olsen and Sommers, 1982). پتاسیم قابل دسترس خاک با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری شده و با فلیم فتومتر قرائت شد (Knudsen et al., 1982). کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر با اسید کرومیک و تیتراسیون برگشتی با فروسولفات آمونیوم اندازه‌گیری شد (Nelson and Sommers, 1982). کربنات کلسیم به روش خنثی‌سازی با اسید و تیتراسیون و گچ خاک به روش استون اندازه‌گیری شد (Nelson, 1982). برای تعیین شکل قابل دسترس آهن، روی، مس و منگنز در خاک عصاره‌گیری با استفاده از DTPA ۰/۰۰۵ مولار انجام شد (Lindsay and Norvell, 1978).

سپس نمونه‌برداری تصادفی و مرکب از برگ‌های با رشد کامل بهاره درختان و از شاخه‌های بدون میوه، در تیرماه سال ۱۳۹۸ انجام شد. نمونه‌های برگ پس از شستشو با آب مقطر، در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت خشک شد. نمونه‌ها آسیاب و به روش اکسیداسیون تر هضم گردید (Issac, 1990). سپس نیتروژن کل با استفاده از روش کجلدال، فسفر کل در محلول با استفاده از روش رنگ‌سنجی (مولیبدات-وانادات) در طول موج ۴۷۰ نانومتر، پتاسیم کل به روش نشر شعله با دستگاه فلیم فتومتر، غلظت کل آهن، روی، مس و منگنز با روش جذب اتمی اندازه‌گیری شد. بور نیز پس از هضم خشک، به روش رنگ‌سنجی (آزومتین-H) در طول موج ۴۳۰ نانومتر با اسپکتروفوتومتر اندازه‌گیری شد (Khanmohammadi et al., 2010). به‌علاوه عملکرد تولید میوه نیز در باغات انتخاب شده در مهرماه (در درختانی که نمونه برگ از آن‌ها تهیه شده بود) اندازه‌گیری شد.

عناصر بود (Taheri et al., 2010). در پژوهش دیگری شریف‌مند و همکاران (Sharifmand et al., 2018) وضعیت تغذیه‌ای کدو را با روش CND در ۱۲۲ مزرعه در منطقه خوی مورد بررسی قرار داده و نرم‌های عناصر غذایی را تعیین نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که بین مزارع با عملکرد زیاد و کم از لحاظ غلظت عناصر غذایی تفاوت معنی‌داری وجود داشت. بر اساس شاخص CND عناصر پتاسیم و روی منفی‌ترین شاخص‌ها مربوط به عناصر پتاسیم و روی بود. شاخص‌های تعادل تغذیه‌ای در مزارع با عملکرد کم بزرگتر از صفر به دست آمد که نشان‌دهنده عدم تعادل عناصر غذایی در این مزارع بود. بصیرت و همکاران نیز (Basirat et al., 2011) در بررسی اعداد مرجع عناصر غذایی برای انگور رقم شاهرودی با استفاده از روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی در ۵۴ باغ مورد مطالعه دریافتند که بر اساس مدل کاربرد تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی، ۲۴ درصد از باغ‌ها در گروه عملکرد زیاد و ۷۶ درصد از باغ‌ها در گروه با عملکرد کم قرار گرفتند. این پژوهشگران میانگین عملکرد مطلوب ۳۳/۷۸ تن در هکتار را به عنوان عملکرد هدف تعیین نمودند.

با بررسی تغییرات غلظت عناصر غذایی در عملکردهای کم و زیاد در شرایط منطقه‌ای می‌توان وضعیت تغذیه‌ای هر منطقه را مورد ارزیابی و مقایسه قرار داد و نشان داد در عملکرد مطلوب چه شاخص‌هایی باید اصلاح گردد (Daryashenas and Saghafi, 2011; Motalebifard, 2022). همانطور که در ابتدا بیان شد ایران چهارمین تولیدکننده (به) در جهان بوده و استان اصفهان از تولیدکنندگان مهم (به) در کشور است. با این حال بر اساس بررسی منابع تا کنون پژوهش مناسبی درباره بررسی وضعیت تغذیه‌ای باغات (به) انجام نشده است. بنابراین با توجه به اهمیت تولید به در استان اصفهان، پژوهش حاضر با هدف بررسی وضعیت تغذیه‌ای درختان (به) با استفاده از روش CND و تعیین نرم‌های استاندارد عناصر غذائی برای این محصول انجام شد.

مواد و روش‌ها

جهت تعیین وضعیت تغذیه‌ای درختان (به) در شهرستان‌های اصفهان و نطنز با استفاده از روش CND، تعداد ۲۸ باغ در این مناطق انتخاب شد. باغ‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شدند که از لحاظ عملکرد با یکدیگر متفاوت باشند و شامل دامنه باغ‌های با عملکرد مطلوب، عملکرد متوسط و عملکرد پایین بودند. برای هر باغ پرسشنامه‌ای تکمیل گردید که در آن اطلاعات مدیریتی و جغرافیایی (GPS) باغ درج شد. باغ‌ها از لحاظ ویژگی‌های خاک تقریباً وضعیت عمومی یکسانی داشتند، اما محدودیت‌های غالب منطقه را نیز شامل می‌شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری‌شده در جدول ۱ نشان داده شده است. هدایت الکتریکی و pH در عصاره گل اشباع (Page et al., 1982)، بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1982)،

جدول ۱- دامنه ویژگی‌های شیمیایی خاک باغات مورد مطالعه

Table 1- Concentration range of some soil chemical characteristics of studied orchards

ویژگی Property	واحد Unit	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Average	انحراف معیار Standard deviation
هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع Electrical conductivity of saturated paste extract (EC _e)	dS m ⁻¹	0.5	18.5	4.7	4.5
pH of saturated paste extract (pH of saturated paste extract)	-	6.7	8.13	7.42	0.32
Calcium carbonate equivalent (CaCO ₃) کربنات کلسیم معادل	%	14	45.5	30.5	8.64
شن (Sand)	%	20	80	58.65	15.08
سیلت (Silt)	%	10	60	25.77	12.37
رس (Clay)	%	6	32	15.89	7.01
Gypsum (CaSO ₄) گچ	%	0	25.3	7.3	5.01
Organic carbon (OC) کربن آلی	%	0.5	2.1	1.13	0.44
Phosphorus (P) فسفر	mg kg ⁻¹	1.2	103.2	25.2	26.8
Potassium (K) پتاسیم	mg kg ⁻¹	200	1030	412	185.6
Iron (Fe) آهن	mg kg ⁻¹	0.16	6	0.91	3.9
Zinc (Zn) روی	mg kg ⁻¹	0.48	9.6	3.32	2.3
Manganese (Mn) منگنز	mg kg ⁻¹	0.17	17.7	4.2	1.42
Copper (Cu) مس	mg kg ⁻¹	0.15	6.1	1	1.05

عناصر غذایی با عملکرد زیاد بیانگر غلظت مطلوب بوده و به عنوان اعداد مرجع روش تشخیص چندگانه (CND) در نظر گرفته شد. این پارامتر برای عناصر مختلف معمولاً به شکل V_N^* ، V_P^* ، V_K^* و V_{Rd}^* بیان می‌شود. سپس غلظت هر عنصر غذایی در گیاه با غلظت مطلوب (نرم‌های CND) استاندارد و شاخص عناصر غذایی CND یا I_X بدست آمد (رابطه ۵)

$$I_X = \frac{V_X - V_X^*}{SD_X^*} \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه ۵، SD_X^* به ترتیب میانگین و انحراف معیار نسبت لگاریتم طبیعی عناصر غذایی هستند که بعنوان اعداد مرجع CND به حساب می‌آیند. V_X نیز نسبت لگاریتمی مربوط به نمونه مطالعاتی و I_X شاخص عنصر غذایی یا عناصر باقیمانده است. سپس با استفاده از مقادیر I_X مقدار شاخص بحرانی عناصر غذایی (I_X^2) به دست آمد. در مرحله بعد، از مجموع مربعات شاخص‌های عناصر غذایی به عنوان شاخص تعادل عناصر غذایی یا I^2 (رابطه ۶) محاسبه شد:

$$I^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \dots + I_{Rd}^2 \quad \text{رابطه ۶}$$

از لحاظ تئوری، هرچه مقدار شاخص تعادل غذایی CND (I^2) به عدد صفر نزدیکتر شود، تعادل عناصر غذایی در شرایط بهتری قرار دارد. به منظور تفکیک گروه‌های عملکردی کم و زیاد از یکدیگر، ابتدا واریانس مقادیر (V_X) برای هر عملکرد محاسبه شد. سپس نسبت واریانس مقادیر عملکردها بر اساس رابطه ۷ به دست آمد:

$$F_i(V_X) = \frac{V_{Xn1}}{V_{Xn2}} \quad \text{رابطه ۷}$$

تابع تجمعی نسبت واریانس محاسبه (رابطه ۸) و سپس رابطه تابع

روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND)

با استفاده از داده‌های غلظت عناصر غذایی برگ و عملکرد، اعداد مرجع به کمک روش تشخیص چندگانه عناصر غذایی (CND) محاسبه شد. در این روش کل ترکیبات بافت گیاهی شامل عناصر غذایی (بخش اصلی یا S_d) و یک بخش باقیمانده (R_d) در نظر گرفته می‌شود که مجموع آنها برابر ۱۰۰ شده و بر حسب درصد بیان می‌گردد (رابطه ۱) (Parent and Dafir, 1992). d در واقع نماینده تعداد عناصر غذایی است:

$$S_d (N + P + K + \dots) + R_d = 100 \quad \text{رابطه ۱}$$

به منظور استفاده از روش CND در این پژوهش، ابتدا عملکردهای اندازه‌گیری شده در باغات (به) از زیاد به کم مرتب گردید و بعد میانگین هندسی (G) عناصر غذایی (رابطه ۲) و نیز نسبت لگاریتم طبیعی عناصر غذایی به میانگین هندسی (رابطه ۳) محاسبه شد:

$$G = [N \cdot P \cdot K \dots R_d]^{1/(d+1)} \quad \text{رابطه ۲}$$

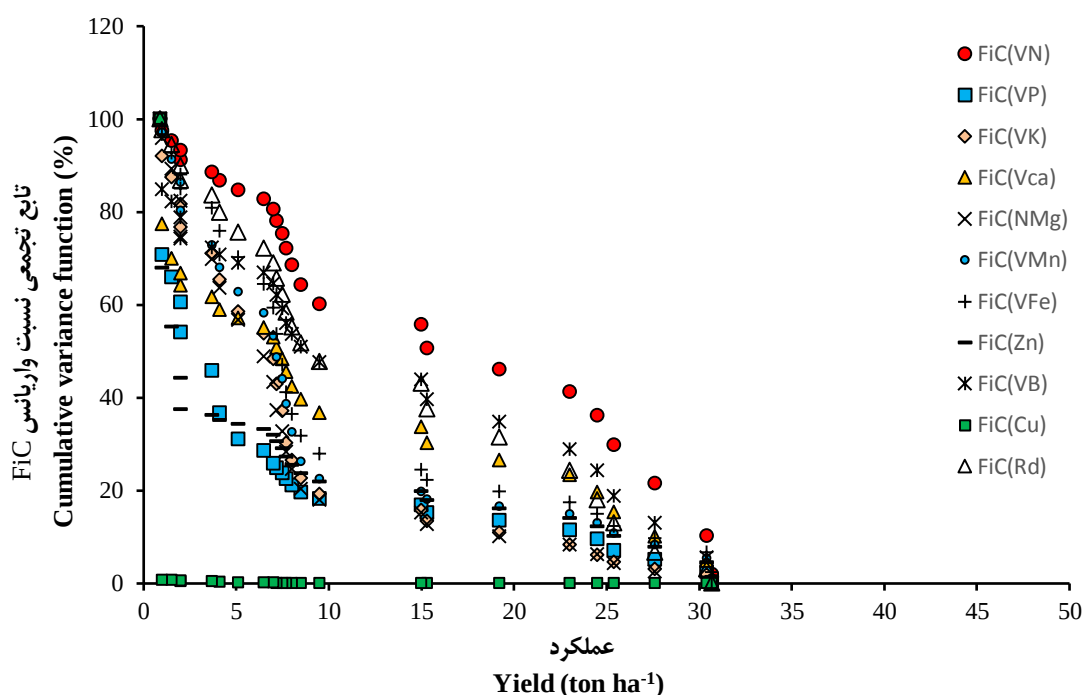
$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), \quad V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), \quad \dots, \quad V_{Rd} = \ln\left(\frac{R_d}{G}\right) \quad \text{رابطه ۳}$$

$$V_N + V_P + V_K + \dots + V_{Rd} = 0 \quad \text{رابطه ۴}$$

بر اساس رابطه ۳، V در واقع بیانگر نسبت لگاریتم طبیعی هر عنصر به کل ترکیبات گیاهی (عناصر + باقیمانده) است. از آنجا که مجموع ترکیبات گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است، مجموع نسبت لگاریتم طبیعی عناصر با احتساب مقدار لگاریتم طبیعی باقیمانده ترکیبات (R_d) برابر صفر خواهد بود (رابطه ۴). در واقع پارامتر V برای

جدول ۳- برآورد عملکرد حد واسط (نقطه عطف منحنی) بر اساس روش توابع تجمعی واریانس نسبت لگاریتمی عناصر غذایی ($F_i^c(V_X)$)
 Table 3- Estimation of mean yield (inflection points) based on cumulative variance function of logarithmic nutrients ratio

عناصر غذایی	معادله	R^2	نقطه عطف ($-b/3a$) (ton ha^{-1})
Nutrients	$F_i^c(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d$		
N	$-0.0053x^3 + 0.2445x^2 - 5.7668x + 104.92$	0.98	15.37
P	$-0.0132x^3 + 0.7465x^2 - 13.381x + 87.30$	0.94	18.85
K	$-0.0091x^3 + 0.6002x^2 - 13.336x + 107.61$	0.97	21.98
Ca	$-0.0071x^3 + 0.3867x^2 - 7.9601x + 87.428$	0.95	18.15
Mg	$-0.0112x^3 + 0.7065x^2 - 14.762x + 110.12$	0.98	21.03
Fe	$-0.0081x^3 + 0.5236x^2 - 11.958x + 111.41$	0.97	21.54
Mn	$-0.0096x^3 + 0.6089x^2 - 13.146x + 110.67$	0.98	21.14
Zn	$-0.01x^3 + 0.5521x^2 - 9.9611x + 74.291$	0.82	18.40
Cu	$-0.0083x^3 + 0.4555x^2 - 7.2619x + 30.256$	0.21	18.29
B	$-0.0059x^3 + 0.3022x^2 - 6.7369x + 94.125$	0.97	17.07
Rd	$-0.0048x^3 + 0.2861x^2 - 7.6544x + 105.35$	0.99	19.86



شکل ۱- نمودار تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی و بخش باقیمانده در برابر عملکرد میوه

Figure 1- The cumulative variance function of nutrient elements and residual value related to fruit yield

این پژوهشگران کلسیم را نیز به عنوان چهارمین عنصر محدود کننده در پژوهش خود بیان نمودند که مشابه با نتایج پژوهش حاضر است. بررسی مقادیر مس اندازه گیری شده در برگ درختان (به) (دامنه تغییرات ۲/۵ تا ۸۲/۱ میلی گرم بر کیلوگرم (جدول ۲)) و مقایسه آنها با میانگین غلظت مطلوب عنصر مس (۸/۶۷ میلی گرم بر کیلوگرم) نشان داد که تقریباً در ۵۳/۵۷ درصد باغات مورد مطالعه کمبود این عنصر مشهود است. با توجه به داده‌های حاصل از این مطالعه یکی از دلایل قرار گرفتن درصد بالایی از باغات در گروه عملکرد کم را می‌توان عدم تعادل عناصر غذایی و کم بودن غلظت عناصر غذایی مطلوب در این باغات دانست.

نتایج پژوهش سید کلایی و همکاران (Seedkolai et al., 2015) در بررسی اثر محلول پاشی نیتروژن، بور و روی بر عملکرد پرتقال تامسون ناول نشان داد که مصرف همزمان اوره با غلظت ۳ در هزار و اسید بوریک با غلظت ۰/۵ در هزار، بیشترین میزان عملکرد را به مقدار ۶۹/۸۳ کیلو گرم در درخت به دنبال خواهد داشت. از سوی دیگر پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مقدار زیاد پتاسیم در خاک و یا کاربرد زیاد کودهای پتاسیم، می‌تواند تعادل کلسیم در گیاه را بهم بزند (Samadi and Azizi, 2011). چاکرال‌حسینی و همکاران (Chakerolhosseini et al., 2016) در بررسی وضعیت تغذیه‌ای باغات پرتقال با استفاده از روش CND مشاهده نمودند که بیشترین میانگین عملکرد مربوط به عنصر پتاسیم است که با نتیجه این پژوهش همخوانی دارد. به علاوه

جدول ۴- اعداد مرجع روش تشخیص چندگانه (CND) و میانگین غلظت مطلوب عناصر غذایی در باغات به
Table 4- Compositional nutrient diagnosis norms and mean optimum concentration of nutrient in quince orchards

عناصر	اعداد مرجع CND	میانگین نرم	انحراف معیار نرم	میانگین غلظت مطلوب	انحراف معیار
Nutrients	CND norms	Norms mean	Norm SD	Mean optimum concentration	SD
N	V_N^*	2.91	0.26	1.99	0.47
P	V_P^*	1.39	0.23	0.43	0.08
K	V_K^*	2.91	0.13	1.95	0.13
Ca	V_{Ca}^*	2.13	0.54	1.01	0.42
Mg	V_{Mg}^*	1.35	0.19	0.42	0.09
Fe	V_{Fe}^*	-2.01	0.26	152.1	55.20
Mn	V_{Mn}^*	-3.12	0.18	47.87	10.41
Zn	V_{Zn}^*	-3.97	0.59	24.18	14.22
Cu	V_{Cu}^*	-4.85	0.27	8.67	2.52
B	V_B^*	-3.51	0.39	33.75	13.18
	V_{Rd}^*	6.78	0.16		
	$V^*\Sigma$	0			

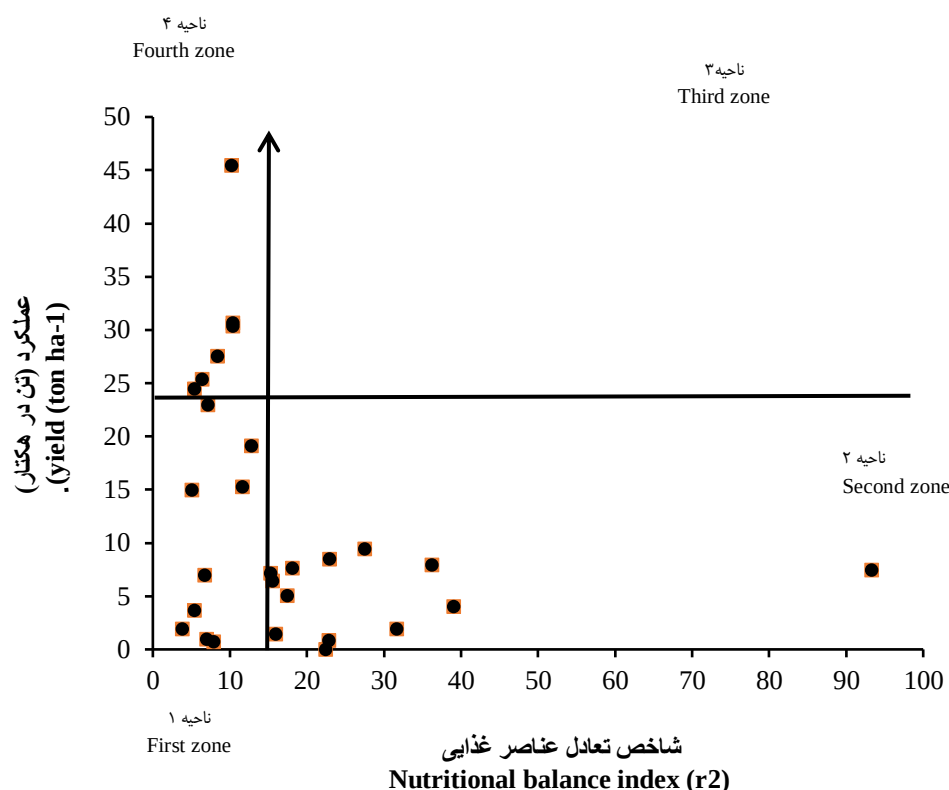
غلظت عناصر پر مصرف و کم مصرف به ترتیب بر حسب درصد و میلی گرم بر کیلوگرم است.

The concentration of macro and micro nutrients are in % and mg kg⁻¹, respectively.

با استفاده از اعداد مرجع (نرم) محاسبه شده و روابط مربوطه، شاخص عناصر غذایی CND یا (I_x) در مزارع مورد مطالعه به دست آمد. شاخص‌های CND نشان‌دهنده ترتیب نیاز غذایی و وضعیت تغذیه ای در باغات مطالعه شده است. ترتیب عناصر غذایی از منفی‌ترین به مثبت‌ترین نشان‌دهنده الویت عناصر غذایی مورد نیاز است. به عنوان نمونه شاخص عناصر غذایی CND در برخی از باغات گروه با عملکرد کم در جدول ۵ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، در بیشتر باغات در بین عناصر پرنیاز منفی‌ترین شاخص مربوط به عنصر پتاسیم و مثبت‌ترین مقدار آن مرتبط به عنصر منیزیم است. شاخص پتاسیم در ۷۱/۴ درصد از باغات با عملکرد کم، منفی به دست آمد. شاخص نیتروژن نیز در ۶۷/۷ درصد از باغات در رتبه دومین الویت نیازی در بین عناصر پر مصرف قرار گرفت. نیتروژن اهمیت زیادی در رشد رویشی، گلدهی و تشکیل و درشت شدن غده دارد. در بسیاری از باغات با عملکرد کم، مقدار کربن آلی خاک بسیار کم بود. همچنین در بیشتر این باغات خاک سطحی کم عمق و دارای شن و سنگریزه زیاد بود که سبب ظرفیت کم نگهداری آب و عناصر غذایی از جمله نیتروژن در این خاک‌ها شده است. این عوامل سبب می‌شود که بخش زیادی از کودهای نیتروژنی استفاده شده در باغات آبشویی شده و از دسترس گیاه خارج شود. در بین عناصر کم مصرف در ۶۷/۷ درصد از باغات با عملکرد کم، منفی‌ترین شاخص برای عنصر آهن به دست آمد. پس از آهن، روی و مس در درجه بعدی نیاز غذایی در اکثر باغات قرار گرفتند. (جدول ۵). مقدار آهک در باغات مورد مطالعه از ۱۴ تا ۴۵/۵ درصد و با میانگین ۳۰/۵ درصد متغیر بود، به گونه‌ای که در ۸۰ درصد باغات مقدار آن بیشتر از ۳۰ درصد بود. وجود شرایط آهکی می‌تواند موجب کاهش جذب عناصر آهن، روی و مس توسط گیاه شود. این مطلب با نتایج

بر اساس نتایج تعیین حد بحرانی عناصر غذایی به روش CND، مقدار پارامتر Rd تنها در ۱۷ درصد از باغات کمتر از مقدار بهینه بود و در ۸۳ درصد از باغات بیشتر از مقدار بهینه مشاهده شد. در روش تشخیص چندگانه (CND) غلظت عناصر در گروه با عملکرد زیاد به عنوان اعداد مرجع یا نرم‌ها یا همان حد بهینه در نظر گرفته می‌شوند (Khiari et al., 2001a,b). اعداد مرجع CND محاسبه شده (V_x^*) در این پژوهش در جدول ۴ گزارش شده‌اند. با توجه به این جدول، مقادیر برخی از اعداد مرجع مثبت و برخی منفی محاسبه شد. بر اساس رابطه ۳ ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها ($V_x = \ln(X/G)$)، هرگاه مقدار عددی داخل پرانتز کمتر از یک محاسبه شود، مقدار اعداد مرجع منفی به دست می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نهایت مجموع اعداد مرجع در روش CND صفر می‌شود که این مطلب درستی محاسبات و روش کار را نشان می‌دهد (جدول ۴). نتایج سایر پژوهش‌ها نیز تاییدکننده این موضوع است (Chakerolhosseini et al., 2016; Sharifmand et al., 2018; Zandi et al., 2021). میانگین غلظت عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم در گروه باغات با عملکرد کم به ترتیب ۱/۸۳، ۰/۴۵، ۱/۶۷، ۱/۲۳ و ۰/۴۳ درصد به دست آمد. میانگین غلظت عناصر آهن، منگنز، روی، مس و بور در گروه با عملکرد کم به ترتیب ۱۰۱/۲، ۶۵/۱۸، ۱۴/۴۵، ۱۱/۵ و ۳۴/۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مقایسه غلظت عناصر غذایی بین دو گروه با عملکرد کم و زیاد نشان داد که غلظت عناصر نیتروژن، پتاسیم، آهن و روی در گروه با عملکرد زیاد به ترتیب ۸/۲۷، ۱۴/۴۳، ۳۳/۴۸ و ۴۰/۲۲ درصد بیشتر از غلظت این عناصر در گروه با عملکرد کم است. این یافته می‌تواند بیانگر نقش و اهمیت این عناصر در تولید محصول و عملکرد آن باشد.

[illegible]



شکل ۲- رابطه بین عملکرد (تن در هکتار) و شاخص تعادل عناصر غذایی (r^2) در به
Figure 2- Relationship between yield (ton ha⁻¹) and nutritional balance index (r^2) in quince

هکتار و در باغات با عملکرد زیاد و کم به ترتیب ۲۹/۶ و ۶/۳ تن در هکتار به دست آمد که از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری داشتند. بررسی شاخص عناصر غذایی CND نشان داد که در گروه باغات با عملکرد کم و در بین عناصر غذایی پرمصرف بیشترین نیاز غذایی مربوط به عناصر پتاسیم و نیتروژن بود. از آنجا که بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه از مواد آلی خاک تامین می‌شود، کمبود ماده آلی خاک‌ها و نیز سبک بودن بافت خاک می‌تواند از دلایل منفی شدن شاخص نیاز غذایی نیتروژن باشد. همچنین در بین عناصر کم‌مصرف بیشترین نیاز غذایی برای عناصر آهن، روی و مس محاسبه شد. این یافته می‌تواند ناشی از مقدار زیاد آهک خاک‌ها باشد. در بین عناصر پرمصرف منیزم مثبت‌ترین شاخص نیاز غذایی را به خود اختصاص داد و در بین عناصر کم‌مصرف مثبت‌ترین شاخص برای منگنز مشاهده شد. برآورد شاخص تعادل تغذیه‌ای نشان داد که مقدار r^2 در باغات با عملکرد کم ۶۰/۳ درصد بیشتر از باغات با عملکرد زیاد است. به علاوه میانگین شاخص تعادل تغذیه‌ای در باغات با عملکرد کم معادل ۲۰/۸۵ بود که تفاوت زیاد آن با عدد صفر حاکی از وجود عدم تعادل تغذیه‌ای عناصر غذایی در این باغات و نیاز مبرم به توجه به این موضوع است.

بر اساس شکل ۲، ۲۵ و ۷۵ درصد از باغات (به ترتیب در دو گروه عملکرد زیاد و کم قرار گرفتند. به علاوه بیشتر نقاط در ناحیه دوم و چهارم نمودار واقع شدند که بیانگر صحت برآورد شاخص‌های عناصر غذایی است. نتایج پژوهش زندی و همکاران (Zandi et al. 2021) نشان داد که مقدار شاخص تعادل عناصر غذایی در همه مدیریت‌های کودی بیش از یک بود که نشان‌دهنده عدم تعادل عناصر غذایی در مدیریت‌های کودی مختلف بود. پژوهشگران دیگری نیز در رابطه با استفاده از شاخص تعادل تغذیه‌ای به نتایج مشابهی دست یافتند (Motaliebifard, 2022; Sharifmand et al., 2018; Chakerolhosseini et al., 2016).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که عملکرد ۲۳ تن در هکتار به عنوان عملکرد حد واسط در نظر گرفته شد. بر اساس عملکرد حد واسط، اعداد مرجع و شاخص‌های عناصر غذایی تعیین شده، ۲۵ درصد باغات (به مورد مطالعه در گروه با عملکرد زیاد و ۷۵ درصد در گروه با عملکرد کم قرار گرفتند. میانگین عملکرد در کل باغات ۱۲/۱ تن در

منابع

1. Anonymous. (2021). *Agricultural statistics*. Third volume: Crops Jihade-Agriculture Ministry, Tehran, Iran. P: 25-26.
2. Anonymous. (2016). Performance analysis report Seed and Plant Certification and Registration Institute.
3. Babalar, M., Mohebi, M., Askari, M.A., & Talaee, A. (2015). Effect of iron and nitrogen application on quantitative and qualitative characteristics of apple "cv. Fuji". *Iranian Journal of Horticultural Science*, 46(3), 399-407. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2015.55861>
4. Basirat, M., Akhiani, A., & Daryashenas, A. (2016). Estimating sufficiency norms in compositional nutrient diagnosis (CND1) method for Shahrودي table grape. *Iranian Journal of Soil Research*, 30(1), 1-11. (In Persian with English abstract)
5. Basirat, M., Haghighatnia, H., & Mousavi, S.M. (2018). Evaluation and determination of the nutritional status of valencia orange orchards in south of Fars province. *Journal of Water and Soil*, 32(1), 143-154. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V32I1.67597>
6. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). *Nitrogen-Total*. p. 595-622. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
7. Castr, J., & Sotomayor, C. (1997). The influence of boron and zinc sprays bloomtime on almond fruit set. *Acta Hort* 470: 402-405. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.470.55>
8. Chakerolhosseini, M.R., Khorassani, R., Fotovat, A., & Basirat, M. (2016). Determination of norms and limitation of nutrients for orange by the compositional nutrient diagnosis method. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 6(3), 161-172. (In Persian with English abstract)
9. Daryashenas, M., & Dehghani, F. (2006). Determination of DRIS reference norms for pomegranate in Yazd province. *Iranian Journal of Soil Research*, 20(1), 1-9. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2006.127142>.
10. Daryashenas, M., & Saghaei, K. (2011). Compositional nutrient diagnosis in sugar beet. *Iranian Journal of Soil Research*, 25(1), 1-12. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2011.126454>.
11. Daryashenas, M., & Rezai, H. (2011). Determination of DRIS reference norms for autumn sugar beet in Khuzestan province. *Journal of Sugar Beet*, 26(2), 185-204. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/JSB.2011.945>.
12. Feyzizadeh, M., & Samadi, A. (2016). Comparing of deviation from optimum percentage (DOP) method and diagnostic recommendation integrated system (DRIS) for nutritional balances of onion (*Allium cepa* L.). *Water and Soil Science*, 26(2/3), 271-286. (In Persian with English abstract)
13. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1982). *Particle size Analysis*. p. 404-408. In: Page, A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
14. Geiklooi, A., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2021). Critical indexes of compositional nutrient diagnosis (CND) and its validation in wheat fields. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia*, 38(3), 480-504. [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v38.n3.02](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v38.n3.02).
15. Hernandez-Caraballo, E.A., Rodriguez-Rodriguez, O., & Rodriguez-Perez, V. (2008). Evaluation of the Boltzmann equation as an alternative model in the selection of the high-yield subsample within the framework of the compositional nutrient diagnosis system. *Environmental and Experimental Botany*, 64(3), 225-231. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.05.010>.
16. Hosseini, Y., Saleh, J., & Chakerolhosseini, M.R. (2020). Evaluation of nutritional status of lime orchards in Hormozgan province of Iran using compositional nutrient Diagnosis Method. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(2), 81-92. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jcpp.10.2.34401>.
17. Issac, A. Robert. (1990). Associate chapter Editor, *Methods of Plant Analysis*, Official Methods of Analysis of the A.O.A.C.
18. Khanmohammadi, Z., Khoshgoftarmanesh, A.H., & Melali, A.H. (2010). *Methods of Plant Analysis*. Academic Jihad Publishing Center, Isfahan Industrial Unit.
19. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001a). Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. *Agronomy Journal*, 93, 809-814. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934809x>.
20. Khiari, L., Parent, L.E., & Tremblay, N. (2001b). The Phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. *Agronomy Journal*, 93, 815-819. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.934815x>.
21. Knudsen D., Peterson G.A., & Pratt P.F. (1982). *Lithium, sodium, and potassium*. p. 225-246. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
22. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil*

- Science Society of American Journal, 42, 421–428.
23. Motalebifard, R. (2022). Evaluation of nutritional status of Hamedan province grape fields by compositional nutrient Diagnosis Method. *Journal of Water and Soil*, 36(3), 365-375. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.74703.1137>.
24. Nelson, R.E. (1982). *Carbonate and Gypsum*. p. 181–196. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
25. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon and organic matter*. p. 539–579. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
26. Nyomora, A.M.S., Brown, P.H., & Freeman, M. (1997). Fall foliar applied boron increases boron concentration and nut set of almond. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 122(3), 405-410. <https://doi.org/10.21273/JASHS.122.3.405>.
27. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). *Phosphorus*. p. 403–430. In: Page A.L., Miller R.H., & Keeney D.R., (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
28. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
29. Parent, L.E., & Dafir, M. (1992). A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of American Society Horticulture Science*, 117, 239-242. <https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239>.
30. Postman, J.D. (2012). Quince (*Cydonia oblonga* Mill.) center of origin provides sources of disease resistance. *Acta Horticulturae*, 948, 229-234. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.948.26>.
31. Samadi, A., & Azizi, M. (2011). Norms establishment of the Diagnosis and recommendation intergrated system (DRIS) and comparison with DOP approach for nutritional Diagnosis of seedless grape (Sultana, cv) in Western Azarbaijan province, Iran. *Iranian Journal of Soil Research*, 24(2), 89-105. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2010.126553>.
32. Sharifmand, M., Sepehr, E., & Bybordi, A. (2018). Evaluation of nutritional status of squash by Compositional nutrient diagnosis (CND) method in Khoy region. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 1007-1013. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2018.225775.667619>.
33. Seedkolai, F., Sadeghi, H., & Moradi, H. (2015). Effects of foliar applications of nitrogen, boron and zinc on auxin contents, fruit set and fruit drop in orange (*Citrus sinensis*) cv. Thompson Navel. *Iranian Journal of Horticultural Science*, 46(3), 367-378. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijhs.2015.55858>.
34. Taheri, M., Vahedi, S., & Abasi, M. (2010). Comparison of nutrient status in different olive varieties with nutrition indicators. *Pomology Research Scientific Journal*, 5(1), 44-59. (In Persian with English abstract)
35. Zandi, S., Fatemi, A., Saiedi, M., & Hamedi, F. (2021). Investigation of different fertilizer management effect on nutritional status of apple by compositional nutrient diagnosis. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 2(11), 91-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2021.18030.1951>.



The Effect of Time and Wetting-Drying Cycles on Durability of Mulches in Soil to Control Wind Erosion

F. Nooralivand¹, A. Farrokhan Firouzi^{2*}

Received: 20-12-2021

Revised: 22-01-2023

Accepted: 06-02-2023

Available Online: 08-02-2023

How to cite this article:

Nooralivand, F., & Farrokhan Firouzi, A. (2023). The effect of time and wetting-drying cycles on durability of mulches in soil to control wind erosion. *Journal of Water and Soil*, 37(2), 295-314. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2023.74277.1127>

Introduction

Wind erosion is one of the important processes of soil degradation in arid and semi-arid regions. Increased soil surface resistance is a key factor to prevent wind erosion. Mulch can increase the resistance of soil surface against erosive agents by creating a coating on the soil surface. The effectiveness of mulch on wind erosion control is on the quantity, type, and durability of the used in dust sources of Iran for stabilizing soil surface against wind erosion. In recent decades, petroleum mulch has been broadly used for stabilizing soil surface against wind erosion in dust sources of Iran. Bio-polymers (e.g. cellulose hydrogel and biochar) and naturally accessible materials (e.g. nanoclay) as environment-friendly mulches can be an alternative to chemical polymers and petroleum mulches. In arid and semi-arid regions, wetting-drying cycles play a crucial role in soil aggregate formation and strength. However, there have been limited studies assessing the impact of wetting-drying cycles on the durability of applied mulches. The main objective of this study was to assess the effectiveness of different types of mulches, including inorganic montmorillonite nanoclay, chemical polyvinyl acetate polymer, and biological biochar and cellulose hydrogel, at various time intervals. The study aimed to improve the physical and mechanical properties of soil, as well as control wind erosion in a loamy sand soil using a wind tunnel. Additionally, the durability of these mulches was evaluated over time after subjecting them to four wetting-drying cycles.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications. The factors including mulch type (four levels: nanoclay montmorillonite, polyvinyl acetate polymer, biochar and cellulose hydrogel), mulch concentration (Nanoclay montmorillonite: 0, 16 and 32, Polyvinyl Acetate polymer: 0, 8, and 16, biochar and cellulose hydrogel: 0, 65 and 200 g/m²) and duration (21, 42, 63 and 126 days). The soil used in the wind tunnel experiments was collected from a dust source in the southeast of Ahvaz (Site Number 4). Trays measuring 50×30×5 cm were filled with this soil. The soil surface was then uniformly sprayed with an emulsion of Nanoclay and Polyvinyl Acetate. Additionally, biochar and cellulose hydrogel were mixed uniformly with the soil. Water was sprayed on the soil surface to maintain a constant moisture content of 75% of field capacity. After a specified period, soil properties such as mean weight diameter of aggregates, fractal dimension, penetration resistance, and shear strength were measured. The trays were then placed in a wind tunnel, and a wind erosion test was conducted at a wind speed of 20 m/s for a duration of 5 minutes. The amount of soil loss was measured using the weight method. Then, at each time, the best treatment from each mulch (in terms of reducing wind erosion) was selected and subjected to wet and dry cycles (four cycles).

Results and Discussion

The results showed a significant interaction effects ($p < 0.01$) of mulch type, mulch concentration and time factors on soil aggregate stability and fractal dimension, penetration resistance, shear strength were significant ($p < 0.01$). Soil loss decreased in soils amended with biochar and cellulose hydrogel and increased in the case of montmorillonite and polyvinyl acetate polymer over the time. The amount of soil loss in soil amended with

1 and 2– Ph.D Graduated of Soil Science and Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.

(*– Corresponding Author Email: a.farrokhan@scu.ac.ir)

DOI: [10.22067/JSW.2023.74277.1127](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.74277.1127)

cellulose hydrogel decreased by 99.3%. The highest amount of soil penetration resistance and shear strength was observed in cellulose hydrogel mulch at the fourth time which were equal to 1038 and 123 kPa, respectively. Over time, the mean weight diameter of aggregates increased in the soil treated with cellulose and biochar hydrogels, but decreased in the polyvinyl acetate and montmorillonite nanoclay treatments. There was a negative correlation between aggregate stability and the fractal dimension of aggregates. In terms of soil loss, at the fourth measurement time, soils modified with cellulose hydrogels, biochar, polyvinyl acetate, and montmorillonite nanoclay experienced reductions of 99%, 71%, 84%, and 85% respectively, compared to the control. After four wet and dry cycles, the soil loss further decreased by 98%, 64%, 76%, and 81% in the respective treatments, compared to the control.

Conclusion

In general, it can be concluded that cellulose hydrogel presented the greatest effect on reducing soil loss and controlling wind erosion. In the soils amended with biochar and cellulose hydrogel, the effect of mulches on reducing soil loss increased over the time. However, the opposite results were found in the case of polyvinyl acetate and montmorillonite nanoclay polymers. Therefore, biochar and cellulose hydrogel in the long term and polyvinyl acetate polymer and montmorillonite nanoclay in the short term can control wind erosion. Wet and dry cycles at all durations increased soil loss. But their effect remained on soil loss reduction until the end of the fourth cycle. The results revealed that environmentally friendly biopolymers synthesized from biomass components can be considered as sustainable sources to reduce wind erosion. Bio-polymers are a new window into the use of sustainable biomaterials instead of synthetics in wind erosion control.

Keywords: Biochar, Cellulose hydrogel, Montmorillonite nanoclay, Polyvinyl acetate polymer, Wind Erosion

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۲۹۵-۳۱۴

اثر زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر ماندگاری خاکپوش در خاک برای کنترل فرسایش بادی

فاطمه نورعلی‌وند^۱ - احمد فرخیان فیروزی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

چکیده

خاکپوش با ایجاد پوششی بر سطح خاک می‌تواند مقاومت سطحی خاک را در برابر جریان فرساینده‌ی باد افزایش دهد. هدف این مطالعه بررسی کارایی خاکپوش‌های معدنی (نانورس مونت‌موریلونایت)، شیمیایی (پلیمر پلی‌وینیل استات) و زیستی (زغال زیستی و هیدروژل سلولز) در زمان‌های مختلف برای اصلاح برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک و کنترل فرسایش بادی بود. همچنین دوام و پایداری این خاکپوش‌ها در زمان‌های مختلف با چهار چرخه تر و خشک شدن بررسی شد. آزمایش فاکتوریل به صورت طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. فاکتورها شامل (۱) نوع خاکپوش شامل چهار سطح: نانورس مونت‌موریلونایت، پلیمر پلی‌وینیل استات، زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم، (۲) غلظت خاکپوش شامل نانورس مونت‌موریلونایت: ۰، ۱۶ و ۳۲، پلیمر پلی‌وینیل استات: ۰، ۸ و ۱۶ و زغال زیستی و هیدروژل سلولز: ۰، ۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع و (۳) زمان شامل ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز بودند. خاک مورد مطالعه از کانون گرد و غبار جنوب شرق اهواز نمونه‌برداری شد. سینی‌های تونل باد با ابعاد ۵×۳۰×۵ (سانتی‌متر) با خاک پر شدند. خاکپوش نانورس و پلیمر پلی‌وینیل استات روی سینی‌ها به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری نمودن آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد. پس از گذشت مدت زمان مورد نظر ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شد و سینی‌ها در تونل با سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری سطح نمونه) به مدت ۵ دقیقه قرار داده شدند. مقدار فرسایش خاک به روش وزنی تعیین شد. سپس در هر زمان بهترین تیمار از هر خاکپوش (از نظر کاهش فرسایش بادی)، انتخاب شده و تحت چرخه تر و خشک شدن (چهار چرخه) قرار گرفت. نتایج نشان داد در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز با گذشت زمان مقدار فرسایش خاک کاهش یافت اما در خاکپوش نانورس مونت‌موریلونایت و پلیمر پلی‌وینیل استات با گذشت زمان مقدار آن افزایش یافت. مقدار فرسایش در خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز ۹۹/۳ درصد کاهش یافت. بیشترین مقدار مقاومت فروری و برشی خاک در خاکپوش هیدروژل سلولز در زمان چهارم مشاهده شد که به ترتیب برابر با ۱۰۳۸ و ۱۲۳ کیلوپاسکال بدست آمد. با گذشت زمان پایداری خاکدانه‌ها در حضور هیدروژل سلولز و زغال زیستی افزایش و در پلیمر پلی‌وینیل استات و نانورس مونت‌موریلونایت کاهش یافت. بین پایداری و بعد فرکتال خاکدانه‌ها رابطه منفی مشاهده شد. مقدار فرسایش خاک در زمان چهارم در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر پلی‌وینیل استات و نانورس مونت‌موریلونایت به ترتیب ۹۹، ۷۱، ۸۴ و ۸۵ درصد و بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، به ترتیب ۹۸، ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت. با توجه به نتایج این پژوهش هیدروژل سلولز به عنوان یک پلیمر زیستی و سازگار با محیط زیست، خاکپوشی مناسب برای کنترل فرسایش

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته دکتری علوم خاک و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: a.farrokhan@scu.ac.ir)

واژه‌های کلیدی: پلیمر پلی‌وینیل استات، فرسایش بادی، زغال زیستی، نانورس مونت‌موریلونایت، هیدروژل سلولز

مقدمه

فرسایش بادی یکی از فرآیندهای مهم بیابان‌زایی است که خسارات جدی به کشاورزی، منابع طبیعی، صنایع و سایر زیرساخت‌های مهم جامعه وارد می‌کند. اگر سرعت باد بیشتر از سرعت آستانه حرکت ذرات خاک باشد می‌تواند منجر به انتقال ذرات از سطح و ایجاد طوفان گرد و غبار شود (Cosentino et al., 2006). افزایش مقاومت سطح خاک در برابر تنش برشی جریان باد عامل کلیدی برای مبارزه با فرسایش بادی است (Naghizade Asl et al., 2017). تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل فرسایش بادی مورد استفاده قرار گرفته است؛ استقرار پوشش گیاهی طبیعی بهترین و پایدارترین روش است (Hong Miri et al., 2017; Miri et al., 2019 et al., 2020; Miri et al., 2017). با وجود این در صورت فراهم نبودن شرایط زیستی برای حیات گیاهان، روش‌های غیر زیستی مانند استفاده از بادشکن‌ها و انواع مختلف خاکپوش‌ها مورد توجه قرار می‌گیرند.

خاکپوش به عنوان یک پوشش که سطح خاک را از تماس با جریان فرساینده‌ی باد حفظ می‌کند تعریف شده است. طبق این تعریف انواع مختلفی از مواد طبیعی و مصنوعی را می‌توان به عنوان خاکپوش به کار برد (Sun et al., 2004; Naghizade Asl et al., 2018; Ahmadi 2011). افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش فرسایش‌پذیری ذرات خاک نیاز به استفاده از تثبیت‌کننده‌هایی با خاصیت سیمانی دارد. تقویت استحکام خاک سطحی با استفاده از مواد مختلفی از جمله سیمان، آهک، کلرید کلسیم، خاکستر، پلیمرهای آلی و امولسیون‌های نفتی ساله‌است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. ذرات ریز این تثبیت‌کننده‌ها، فضای بین ذرات خاک را پر می‌کند که به دلیل چسبندگی بین ذرات منجر به تخلخل کمتر ذرات و مقاومت بیشتر خاک می‌شود (Arzaghi et al., 2017; Kadokawa et al., 2008; Majdi et al., 2006).

خاکپوش‌های نفتی در برابر اثرات سودمند در تثبیت‌شن‌های روان، اثرات زیان‌باری مانند ضریب جذب حرارتی بالا و آلودگی محیط زیست دارند و تهدیدی برای سفره‌های آب زیرزمینی و سلامتی انسان و جانوران هستند (Vaezi, 2011). تقویت شیمیایی برای بهبود خاک نیز روشی رایج است که با استفاده از مواد افزودنی مانند تثبیت‌کننده‌های سنتی و مواد افزودنی غیر سنتی انجام می‌شود. تثبیت‌کننده‌های شیمیایی سنتی مانند آهک، خاکستر، گچ، زئولیت، سیمان و سایر پسماندهای صنعتی برای بهبود مقاومت خاک استفاده می‌شوند

(Abbawi, 2015). در سال‌های اخیر یک روند جهانی پدید آمده است که از مواد سازگار با محیط زیست در زمینه‌های مختلف استفاده می‌کند تا تأثیر منفی کمتری بر روی انسان و محیط بگذارد. بنابراین، ضروری است که استفاده از مواد جدید برای جایگزینی این مواد شیمیایی در کاهش فرسایش بررسی شود. اخیراً، مواد شیمیایی غیر سنتی مانند پلیمرهای مایع برای کاهش فرسایش و افزایش حاصلخیزی خاک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Cao et al., 2017; Arzaghi et al., 2016; Hueso-González et al., 2016).

نتایج پژوهش گونگ و همکاران (Gong et al., 2016) نشان داد که دو پلیمر پلی‌وینیل استات و کوپلیمر وینیل استات-اتیلن می‌توانند مقاومت فشاری^۱ خاک شنی را افزایش دهند و علاوه بر افزایش مقاومت خاک نسبت به فرسایش بادی، سبب افزایش رشد میکروبی و تولید محصول ذرت در خاک شنی شوند. استفاده از مواد معدنی طبیعی مانند خاکپوش‌های رسی یکی دیگر از مواد سازگار با محیط زیست در جهت کنترل فرسایش بادی است. خاکپوش رسی می‌تواند با به هم چسباندن ذرات شن و جلوگیری از حرکت آنها نقش مهمی در کنترل فرسایش بادی داشته باشد. بنابراین یکی از راه‌های مهار کردن فرسایش بادی و افزایش چسبندگی میان ذرات خاک استفاده از ذرات رس در قالب خاکپوش رسی است (Majdi et al., Ekhtesasi and Hazirei, 2006). افزودن خاکپوش نانورس به خاک، مقاومت فشاری و خاصیت چسبندگی خاک را افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش بهاری و شاه‌نظری (Bahari and Shahnazari, 2015) نشان داد با افزودن یک درصد وزنی نانورس به خاک مقاومت فشاری خاک افزایش یافت و استحکام خاک از حالت سخت به حالت بسیار سخت رسید. همچنین مجدی و همکاران (Majdi et al., 2006) تأثیر ترکیب، غلظت و ضخامت مالچ رسی را بر تثبیت‌شن‌های روان بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد افزودن کاه به مالچ‌های رسی و افزایش ضخامت مالچ مقاومت آن را در برابر جریان باد افزایش می‌دهد. نتایج پژوهش پدیدار و همکاران (Padidar et al., 2017) نشان داد که کاربرد نانوذرات رس در سطح خاک می‌تواند باعث تثبیت‌شن‌های روان، افزایش خاکدانه‌سازی و کاهش فرسایش بادی شود. پوسته‌های بیولوژیکی نیز خاک را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌کنند. رشته‌های قارچ، باکتری، جلبک و گل‌سنگ پوسته‌هایی بیولوژیکی روی خاک تشکیل می‌دهند و سطح خاکدانه‌های هوا خشک را در برابر فرسایش بادی مقاوم می‌سازند (Arzaghi et al., 2015; Naghizade Asl

(et al., 2018; Rajabi Agereh et al., 2019).

(Wang et al., 2013).

هدف این مطالعه استفاده از چهار نوع خاکپوش در چهار زمان مختلف برای بهبود مقاومت خاک شلومی در برابر فرسایش بادی بود. به همین منظور شاخص‌های پایداری خاک و تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقدار فرسایش خاک در حضور خاکپوش‌ها، در زمان‌های مختلف به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. فاکتورها شامل خاکپوش شامل هیدروژل سلولز کاه گندم، زغال زیستی اسیدی کاه گندم، پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت موریلونایت، غلظت خاکپوش شامل نانورس: ۰، ۱۶ و ۳۲، پلیمر پلی-وینیل‌استات: ۰، ۸ و ۱۶ و زغال زیستی و هیدروژل سلولز: ۰، ۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع و زمان به تعادل رسیدن اصلاحگرها با خاک شامل ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز بودند. اثر خاکپوش‌ها بر کنترل فرسایش بادی و برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در چهار زمان بررسی شد. برای بررسی اثر تر و خشک شدن بر کارایی و دوام خاکپوش‌ها در خاک، در پایان زمان‌های مورد بررسی، چهار مرحله چرخه تر و خشک شدن روی تیمارها اعمال شد. خاک مورد نیاز برای این مطالعه از جنوب شرق اهواز (منطقه بحرانی و غبارخیز استان خوزستان، کانون شماره ۴) به صورت دست‌خورده از عمق ۰ تا ۵ سانتی متری با بیلچه جمع‌آوری شد. کانون ریزگرد جنوب شرق اهواز با مساحت ۱۱۲۶۳۶ هکتار، از فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر اهواز آغاز و در امتداد بزرگراه اهواز-ماهشهر در مختصات جغرافیایی ۴۷°، ۴۸° تا ۱۷°، ۴۹° طول شرقی و ۴۵'، ۳۰° تا ۱۵'، ۳۱° عرض شمالی ادامه می‌یابد. هدایت الکتریکی خاک در سوسپانسیون ۲:۱ (خاک:آب) به ترتیب با استفاده از pH متر و EC سنج و درصد کربن آلی از روش والکی بلک (Sun et al., 2004) اندازه‌گیری شد. پایداری خاکدانه به روش الک خشک، چگالی حقیقی خاک به روش پیکنومتر و چگالی ظاهری خاک به روش حجمی اندازه‌گیری شد. پس از تعیین چگالی حقیقی و ظاهری خاک، تخلخل کل خاک محاسبه شد.

روش تهیه خاکپوش‌ها

پلیمر پلی‌وینیل‌استات با ترکیب شیمیایی $(C_4H_6O_2)_n$ ، چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول در آب از پژوهشگاه پتروشیمی ایران و نانورس مونت‌موریلونایت با ضخامت صفحات ذرات نانورس: ۱/۱۸ نانومتر از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان خریداری شد. زغال زیستی و هیدروژل سلولز مورد استفاده در این پژوهش از کاه گندم تهیه شدند.

پلیمرهای زیستی سازگار با محیط زیست که از اجزای زیست توده ساخته شده‌اند می‌توانند به عنوان منابعی پایدار برای کاهش فرسایش بادی در نظر گرفته شوند (Johannes and Verbeek 2012). مزیت مهم این مواد تجزیه‌پذیری و سازگاری با محیط زیست است و از این رو می‌توانند جایگزین پلیمرهای مصنوعی یا نمک‌های غیر آلی شوند که به طور مشابه برای مهار گرد و غبار استفاده می‌شوند. پلیمرهای زیستی علاوه بر افزایش مقاومت خاک، ظرفیت نگهداری آب و عناصر غذایی را در خاک افزایش می‌دهند و شرایط لازم را برای تثبیت زیستی فراهم می‌کنند (Jamshidsafa et al., 2015). یکی از روش‌های معمول افزایش پایداری خاکدانه‌ها در برابر نیروهای طبیعی افزودن مواد آلی و بقایای گیاهی می‌باشد (Oades, 1984). پایداری خاکدانه‌ها یک عامل موثر در فرآیند فرسایش خاک است (Falsone et al., 2012) و عموماً به عنوان شاخص فرسایش‌پذیری خاک در نظر گرفته می‌شود (Barthes and Roose, 2002).

نتایج گزارش شده توسط خاکشناسان، حاکی از قابلیت و پتانسیل نظریه فراکتال در مدل‌سازی و تخمین فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آن است (Ataee et al., 2014). پژوهشگران متعددی از مدل‌های فرکتالی برای مطالعه و کمی‌سازی ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها در کاربری‌های مختلف استفاده کرده‌اند (Ding and Ding 2007; Huang and Zhang, 2005; Pirmoradian et al., 2005). نتایج پژوهش‌های اخیر نشان داده که بعد فرکتال محاسبه شده ساختمان خاک همبستگی مثبت و معنی‌داری با عامل فرسایش‌پذیری، فرسایش پاشمانی و فرسایش بین‌شیاری داشته، به نحوی که پیش‌بینی فرسایش با استفاده از ابعاد فراکتالی با دقت خوبی امکان‌پذیر است (Ahmadi et al., 2011; Cantón et al., 2009). همچنین نتایج عطایی و همکاران (Ataee et al., 2014) نشان داد که بعد فراکتالی خاکدانه‌ها عامل گویایی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها می‌باشد. خاکدانه‌های پایدار با بعد فراکتالی کمتر در مزارعی مشاهده شدند که در آنها مدیریت‌های مناسب همانند افزودن کود دامی، کاهش عملیات خاکورزی و مدیریت نظام تناوب حاکم بود. در مقابل خاکدانه‌های ناپایدار و با بعد فراکتالی بزرگتر منعکس‌کننده شرایط نادرست مدیریتی همانند خاکورزی متراکم و شدید، شخم در جهت شیب و مدیریت نادرست بقایای گیاهی بودند.

چرخه‌های تر و خشک شدن از عوامل محیطی شناخته شده است که بر فرآیند خاکدانه‌سازی در برخی خاک‌ها اثر می‌گذارد (Cosentino 2007; Ma et al., 2015; Pires et al., 2006; et al., 2007). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در اثر اعمال چرخه‌های تر و خشک شدن کاهش می‌یابد (Bravo-Garza et al., 2009; Xu et al., 2017). تغییر در پایداری خاکدانه‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن، می‌تواند ویژگی‌های خاک به ویژه حساسیت نسبت به فرسایش را تحت تاثیر قرار دهد

تهیه زغال زیستی

گوارگام با ۱۰ گرم از حلال ۱-آلیل ۳ متیل ایمیدازولیوم کلرید در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت حرارت داده شد تا انحلال کامل انجام شده و ماده چسبناک همگن تولید شود. پس از اتمام واکنش، مخلوط در دمای اتاق خنک شده و هیدروژل به دست آمده چند مرتبه با آب مقطر شسته شد. pH و EC زغال زیستی و هیدروژل سلولز در نسبت ۱:۲۰ (آب: زغال زیستی/هیدروژل) و جرم مخصوص ظاهری طبق روش ASTM D-285 اندازه گیری شد.

آزمایش تونل باد

در این پژوهش جهت ارزیابی خاکپوش‌ها در کنترل فرسایش بادی از تونل باد آزمایشگاهی از نوع مدار باز استفاده شد. جریان باد در این نوع تونل، از مسیری مستقیم عبور کرده و هوا هیچ گونه برگشتی به داخل تونل ندارد. در واقع فن موجود در تونل‌های مدار باز، هوا را مستقیماً از محیط اطراف مکیده و پس از عبور از منطقه آزمایش از انتهای تونل خارج می‌سازد. همچنین به علت باز بودن قسمت‌های ورودی و خروجی، نیاز به در نظر گرفتن تمهیداتی جهت تمیز نمودن تونل نمی‌باشد (شکل ۱).

سینی‌های تونل باد با ابعاد ۵۰×۳۰×۵ (سانتی‌متر) با خاک مورد مطالعه (بافت شن لومی) تا لبه پر شد. خاکپوش نانورس (۱۸ و ۳۲ گرم بر متر مربع) و پلیمر پلی‌وینیل استات (۸ و ۱۶ گرم بر متر مربع) روی سینی‌های تونل باد به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم (۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع) ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد (شکل ۲).

پس از گذشت مدت زمان مورد نظر (۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز) سینی‌ها در تونل با سرعت باد ۲۰ متر بر ثانیه (در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری سطح نمونه) به مدت ۵ دقیقه قرار داده شد. حداکثر سرعت باد در منطقه طبق گزارشات سازمان هواشناسی استان، به طور میانگین ۱۹/۲ متر بر ثانیه است (Mehrabi et al., 2015). برای شبیه‌سازی یک سرعت باد همگن و ثابت که بیشتر از سرعت باد منطقه مورد مطالعه است، سرعت باد توسط یک بادسنج دیجیتال کنترل شد. مقدار فرسایش مربوط به هر نمونه با وزن کردن نمونه قبل و بعد از قرار گرفتن در تونل باد محاسبه و بر حسب گرم بر متر مربع در ثانیه گزارش شد.

پیش از گرماکافت، کاه گندم در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک شد و سپس به منظور تسهیل فرآیند تجزیه به قطعات کوچک (کمتر از ۲ سانتی‌متر) خرد شد. سپس نمونه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس در کوره الکتریکی تحت گاز نیتروژن (شرایط بدون اکسیژن) با نرخ افزایش ۵ درجه سانتی گراد در هر دقیقه به مدت ۳ ساعت پیرولیز شد (Jien and Wang, 2013). زغال زیستی تولید شده در محفظه های بسته در دمای اتاق برای مراحل بعدی نگهداری شد (Mandal and Singh, 2017).

اصلاح شیمیایی زغال زیستی

نتایج پژوهش چو و همکاران (Chu et al., 2018) نشان داد که اصلاح اسیدی زغال زیستی باعث افزایش سطح ویژه و تخلخل زغال زیستی خواهد شد. به منظور اصلاح اسیدی زغال زیستی از روش پنگ و همکاران (Murphy, 2015) استفاده شد. زغال زیستی در محلول ۴۲/۵ درصد اسید فسفریک با نسبت ۱:۲ (اسید: زغال زیستی) به مدت ۱۲ ساعت غوطه‌ور شد. مخلوط زغال زیستی و اسید در آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شد و به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰۰ درجه پیرولیز شد. پس از سرد شدن در دمای اتاق، به منظور حذف اسید فسفریک اضافی، زغال زیستی اصلاح شده با آب دیونیزه شسته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی گراد در آن خشک شد.

استخراج سلولز از کاه گندم

استخراج سلولز از کاه گندم به روش سان و همکاران (Sun et al., 2004) انجام شد. ابتدا ۲۰ گرم کاه گندم کاملاً خشک عبوری از مش ۶۰ (۰/۲۵ میلی‌متر) و باقیمانده روی مش ۸۰ (۰/۱۸ میلی‌متر)، درون ارلن با ۴۰۰ میلی‌لیتر محلول یک درصد سدیم هیدروکسید به مدت یک ساعت جوشانده شد و پس از صاف کردن و شستشو با آب مقطر، در داخل ارلن به همراه ۴۴۰ میلی‌لیتر مخلوط استیک اسید (۸۰ درصد) و نیتریک اسید (۶۷ درصد) با نسبت ۱۰ به ۱ به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس جوشانده شد. پس از پایان زمان واکنش و سرد شدن نسبی مخلوط، خمیرهای سلولزی به دست آمده صاف شد و تا خنثی سازی کامل با آب مقطر شستشو داده شدند و در آن در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت به طور کامل خشک شدند.

تهیه هیدروژل سلولز کاه گندم

هیدروژل سلولز کاه گندم با استفاده از روش کادوکاوا و همکاران (Kadokawa et al., 2009; Kadokawa et al., 2008) و لی و همکاران (Li et al., 2009) تهیه شد. مخلوطی از سلولز کاه گندم و



شکل ۱- تونل باد مورد استفاده در پژوهش
Figure 1- Wind tunnel used in the research

فرسایش محاسبه شد.

بررسی اثر خاکپوش‌ها بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک

در این پژوهش همچنین اثر خاکپوش‌ها بر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک، شامل چهار خاکپوش با دو غلظت و چهار زمان مختلف ۲۱، ۴۲، ۶۳ و ۱۲۶ روز مورد بررسی قرار گرفت. خاک مورد مطالعه (بافت شن‌لومی) در ظروف پلاستیکی با ابعاد $۱۳ \times ۵ \times ۲۲$ سانتی‌متر ریخته شد. خاکپوش نانورس مونت‌موریلونایت (۱۶ و ۳۲ گرم بر متر مربع) و پلیمر پلی‌وینیل‌استات (۸ و ۱۶ گرم بر متر مربع) روی خاک به صورت یکنواخت اسپری شد. خاکپوش زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاه گندم (۶۵ و ۲۰۰ گرم بر متر مربع) ابتدا با خاک مخلوط شد سپس با اسپری آب روی سطح خاک رطوبت در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی ثابت نگهداشته شد (شکل ۲).

بررسی دوام خاکپوش‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن برای درک عمیق‌تر در مورد دوام خاکپوش‌ها در خاک، یک روش آزمایشگاهی برای شبیه‌سازی چرخه‌های تر و خشک شدن در خاک‌های تیمار شده استفاده شد (Ayeldeen et al., 2016). پس از انجام آزمایشات تونل باد، در هر زمان بهترین تیمار از هر خاکپوش، از نظر کاهش فرسایش بادی، انتخاب شده و تحت چرخه تر و خشک شدن قرار گرفت. پس از تهیه نمونه‌های خاک تیمار شده، با اسپری آب و نگهداشت رطوبت هر نمونه تا ۶۰ درصد ظرفیت زراعی (چرخه تر شدن)، نمونه‌ها به مدت یک هفته در هوای آزاد نگهداری شدند (چرخه خشک شدن) و سپس در تونل باد مورد آزمایش قرار گرفتند. پس از اتمام مرحله قبل، نمونه‌ها بعد از مرطوب شدن، برای یک هفته دیگر در هوای آزاد نگهداری شدند (دومین مرحله خشک شدن). چرخه‌های تر و خشک شدن (۴ مرتبه) برای همه خاکپوش‌ها در همه زمان‌ها انجام شد. هر بار نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش تونل باد وزن شده و مقدار



شکل ۲- ظروف پلاستیکی حاوی خاک پس از اعمال تیمارها (الف)، سینی‌های حاوی خاک پس از اعمال تیمارها (ب)
Figure 2- Plastic containers containing soil after treatments (a), Trays containing soil after treatments (b)

فاکتورهای مورد مطالعه شامل نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بودند. تمام داده‌ها در Microsoft Office Excel طبقه‌بندی شده و برای رسم نمودارها مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد مقدار pH، EC و جرم مخصوص ظاهری زغال زیستی به ترتیب $4/45$ (dS m^{-1})، $15/55$ و $1/13 \text{ g/cm}^3$ است. مقدار pH، EC و جرم مخصوص خاکپوش هیدروژل سلولز مورد استفاده به ترتیب، $5/65$ (dS m^{-1})، $0/377$ و $0/16 \text{ g/cm}^3$ است. پلیمر پلی‌وینیل استات با ترکیب شیمیایی $(\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2)_n$ ، دارای چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول در آب است. همچنین نانورس مونت‌موریلونایت با ضخامت صفحات $1/18$ نانومتر مورد استفاده قرار گرفت.

بررسی اثر خاکپوش‌ها بر مقدار فرسایش خاک

نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بر مقدار فرسایش خاک (بافت شن‌لومی) نشان داد که تاثیر زمان، خاکپوش و غلظت و همچنین اثر متقابل دوگانه و سه‌گانه تیمارها در سطح احتمال یک درصد بر فرسایش خاک معنی‌دار می‌باشد (جدول ۲). اثر دوگانه خاکپوش و زمان بر مقدار فرسایش خاک معنی‌دار شده است زیرا در شرایط طبیعی به دلیل تابش خورشید، اکسیداسیون، فرسایش بادی، شستشو توسط آب باران و سایر عوامل طبیعی ممکن است اجزای شیمیایی مواد تثبیت کننده به شدت تغییر یابد. با گذشت زمان، عوامل محیطی ذکر شده می‌توانند طول عمر مواد تثبیت کننده را در مناطق بیابانی کوتاه کنند (Gong et al., 2016). همچنین اثر دوگانه خاکپوش و غلظت آن بر مقدار فرسایش خاک معنی‌دار شده است زیرا با افزایش غلظت خاکپوش‌ها امکان تماس ذرات خاک و خاکپوش بیشتر شده و این برهمکنش می‌تواند با افزایش خاکدانه‌های پایدار باعث کاهش فرسایش خاک شود.

در پایان دوره آزمایش، برای اندازه‌گیری مقاومت برشی لایه سطحی خاک از پره برشی (Eijkelkamp 14.10 POCKET VANE TESTER) در شرایط اشباع استفاده شد (Zimbone et al., 1996). مقاومت فروروی خاکپوش‌ها نیز با استفاده از فروسنج دستی که قادر به اندازه‌گیری مقاومت فروروی از صفر تا 6000 کیلوپاسکال بود، اندازه‌گیری شد (Das et al., 2012). برای ارزیابی کارایی خاکپوش‌ها برای بهبود پیوند ذرات و تشکیل و ثبات خاکدانه‌ها، پایداری خاکدانه با استفاده از روش الک خشک تعیین شد (Kemper et al., 1986). بدین منظور ابتدا خاک از الک 4 میلی‌متر عبور داده شد سپس 50 گرم خاک روی یک سری الک (به ترتیب از بالا به پایین $3/35$ ، $2/8$ ، 2 ، 1 ، $0/5$ ، $0/25$ ، $0/15$ ، $0/125$ ، $0/09$ و $0/053$ میلی‌متر) به صورت یکنواخت ریخته شد و در دستگاه شیکر به مدت 2 دقیقه تکان داده شد و در پایان، خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک توزین شد. در نهایت، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، به عنوان شاخص پایداری خاک (معادله ۱) محاسبه شد:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

که در آن X_i میانگین قطر خاکدانه‌ها روی هر الک (میلی‌متر) و W_i نسبت جرم خشک خاکدانه‌ها در هر کلاس اندازه بر حسب گرم به وزن کل خاک (50 گرم) می‌باشد. برای محاسبه بعد فرکتال خاکدانه‌ها از روش یانگ و لیو (Yang and Liu, 2006) (معادله ۲) استفاده شد:

$$\frac{M(r < R_i)}{M_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D_m} \quad (2)$$

در این معادله $M(r < R_i)$: جرم تجمعی خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک از کوچکترین قطر تا بزرگترین قطر در سری الک‌ها (گرم)، M_T : جرم کل ذرات (گرم)، R_i : میانگین قطر ذرات (میلی‌متر)، $R_{\max}$: قطر بزرگترین خاکدانه (میلی‌متر) و D_m : بعد فرکتال ذرات است.

تجزیه و تحلیل آماری

اثر خاکپوش‌ها بر فرسایش بادی و خصوصیات خاک بصورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16.0 و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن انجام شد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Some physical and chemical characteristics of the studied soil

فرسایش بادی Wind Erosion($\text{g/m}^2/\text{s}$)	کربن آلی (%) Organic Carbon(%)	ρ_s (g cm^{-3})	ρ_b (g cm^{-3})	EC (dS m^{-1})	pH	بافت Soil Texture
4.3	0.202	2.5	1.47	18.12	8.35	شن‌لومی loamy sand

نتایج آزمون مقایسه میانگین اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت خاکپوش بر مقدار فرسایش خاک (شکل ۳) نشان می‌دهد که بین سطوح مختلف غلظت خاکپوش پلیمر در تمام زمان‌ها تفاوت معنی‌دار وجود دارد اما در مورد خاکپوش نانو رس در زمان سوم اختلاف معنی‌دار نمی‌باشد؛ در حالی که سطوح مختلف زغال زیستی در هر چهار زمان با هم و با دو خاکپوش دیگر اختلاف معنی‌دار دارند. با توجه به شکل افزایش غلظت خاکپوش‌ها باعث کاهش فرسایش خاک شد. هیدروژل سلولز بیشترین تاثیر را در کاهش فرسایش خاک داشت. به گونه‌ای که مقدار فرسایش خاک از مقدار ۴/۳۳ گرم بر متر مربع بر ثانیه برای خاک شاهد، به ۰/۰۳ گرم برای خاک تیمار شده با ۲۰۰ گرم بر متر مربع هیدروژل سلولز رسید. مواد پلیمری محلول در آب پس از پاشیده شدن در سطح خاک، در معرض هوا تشکیل شاخه‌های گسترده پلیمری می‌دهد و می‌تواند با ایجاد پیوند بین ذرات موجب افزایش مقاومت ذرات در برابر فرسایش شود (Movahedan et al., 2013). با توجه به عدم چسبندگی بین ذرات، افزودن خاکپوش نانورس باعث چسبندگی ذرات

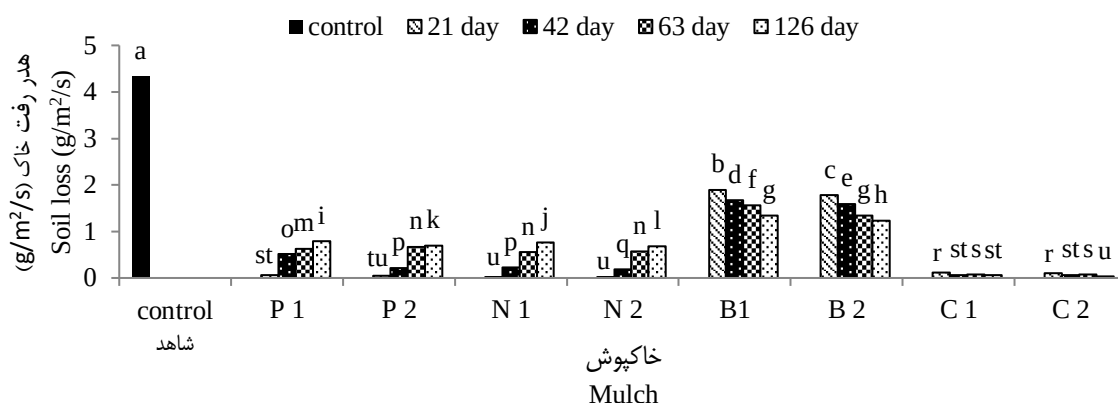
ریز و افزایش مقاومت ذرات در برابر تنش برشی باد شد. با گذشت زمان اثر پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت در کاهش فرسایش خاک کمتر شد به گونه‌ای که بیشترین تاثیر این دو خاکپوش در زمان اول مشاهده شد. اما با گذشت زمان مقدار فرسایش خاک در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز کاهش یافت. برهمکنش زغال زیستی و سلولز با ماتریکس خاک تحت تاثیر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی می‌تواند باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌های درشت‌تر شود (Verheijen et al., 2010) و در نتیجه با گذشت زمان باعث کاهش فرسایش خاک شود. نتایج به دست آمده نشان داد که پلیمر و نانو رس تاثیرگذاری سریعی در خاک داشتند و در کوتاهترین زمان آزمایش (۲۱ روز) بیشترین تاثیر را بر ویژگی‌های خاک نشان دادند. زغال زیستی در زمان‌های مورد بررسی بر ویژگی‌های خاک تاثیرگذار بود اما به حداکثر خود نرسید و به تدریج با گذشت زمان در حال افزایش بود بنابراین احتمالاً گذشت زمان باعث افزایش اثرگذاری زغال زیستی در خاک خواهد شد.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس تاثیر نوع خاکپوش، غلظت خاکپوش و زمان بر هدر رفت خاک در شنی لومی
Table 2- Analysis the effect of time, mulch and concentration on soil loss in loamy sand soil.

منبع تغییرات Source of variance	درجه آزادی Degree of freedom	میانگین مربعات Mean Square				
		هدر رفت خاک Soil loss	مقاومت فروروی Penetration resistance	مقاومت برشی Shear Strength	میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها MWD	بعد فرکتال Fractal dimension
زمان Time	3	0.131**	23914.764**	513.267**	0.012**	0.235**
خاکپوش Mulch	3	6.697**	1155966.199**	19089.696**	0.024**	1.007**
غلظت خاکپوش Mulch concentration	2	221.808**	1768824.929**	15624.732**	0.996**	4.035**
زمان × خاکپوش Time × Mulch	9	0.288**	6660.502**	470.171**	0.042**	0.290**
زمان × غلظت خاکپوش Time × Mulch concentration	6	0.035**	6672.709**	138.283**	0.004**	0.105**
خاکپوش × غلظت Mulch × Concentration	6	1.685**	291634.451**	4954.517**	0.006**	0.367**
زمان × خاکپوش × غلظت Time × Mulch × Concentration	18	0.076**	1753.693**	128.271**	0.011**	0.138**
خطا Error	96	0	138.688	27.148	5.644×10 ⁻⁵	0.007

** بیانگر تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد است.

**Significance at 1% level.

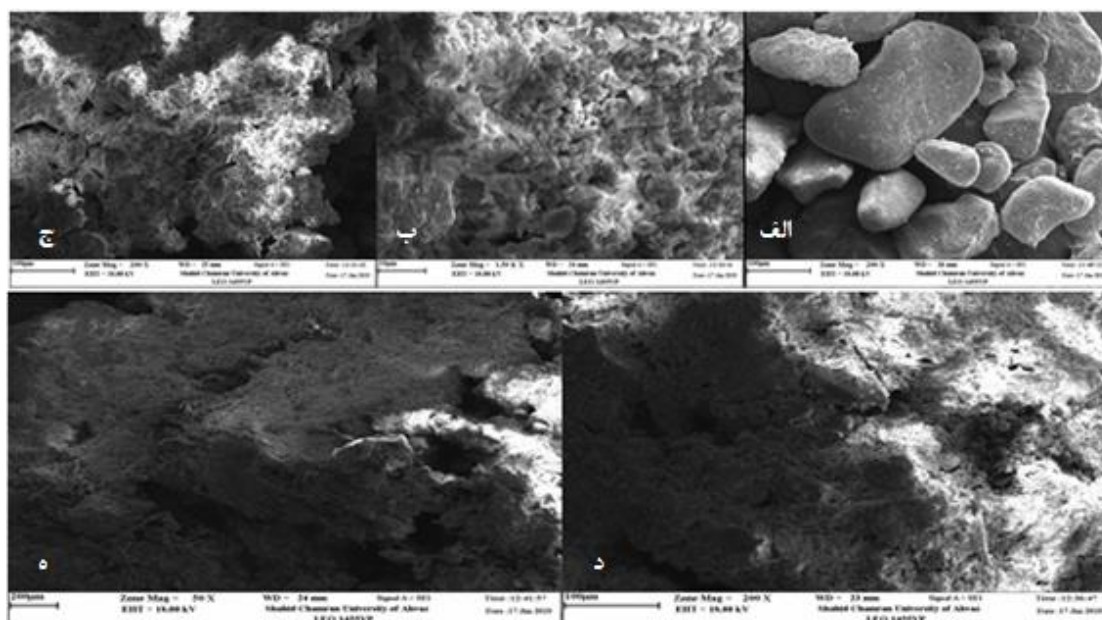


شکل ۳- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر مقدار فرسایش خاک

(P: پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

Figure 3- The effect of time, mulch and concentration on soil erosion

P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی خاک‌های تیمار شده با خاکپوش‌های مختلف بعد از ۱۲۶ روز

الف: شاهد، ب: خاک تیمار شده با نانورس مونت‌موریلونایت، ج: خاک تیمار شده با پلیمر پلی‌وینیل استات، د: خاک تیمار شده با زغال زیستی کاه گندم و ه: خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز کاه گندم.

Figure 4. Scanning electron microscope images of soils treated with different mulches after 126 days

a: Control, b: Soil treated with Montmorillonite nanoclay, c: Soil treated with polyvinyl acetate polymer, d: Soil treated with wheat straw biochar and e: Soil treated with wheat straw cellulose hydrogel.

بررسی تاثیر خاکپوش‌ها بر مقاومت برشی و مقاومت فروری خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر زمان، نوع خاکپوش و غلظت خاکپوش، اثر دوگانه و سه‌گانه فاکتورها بر مقاومت فروری و مقاومت برشی خاک در سطح یک درصد معنی‌دار است (جدول ۲). با

برای درک مقاومت خاک تیمار شده با خاکپوش‌های مختلف در برابر فرسایش بادی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی از خاک شاهد و خاک‌های تیمار شده عکس‌برداری شد (شکل ۴). تجمع خاکپوش‌ها در اطراف و بین ذرات خاک باعث افزایش انسجام بین ذرات خاک و در نتیجه افزایش مقاومت در برابر فرسایش می‌شود.

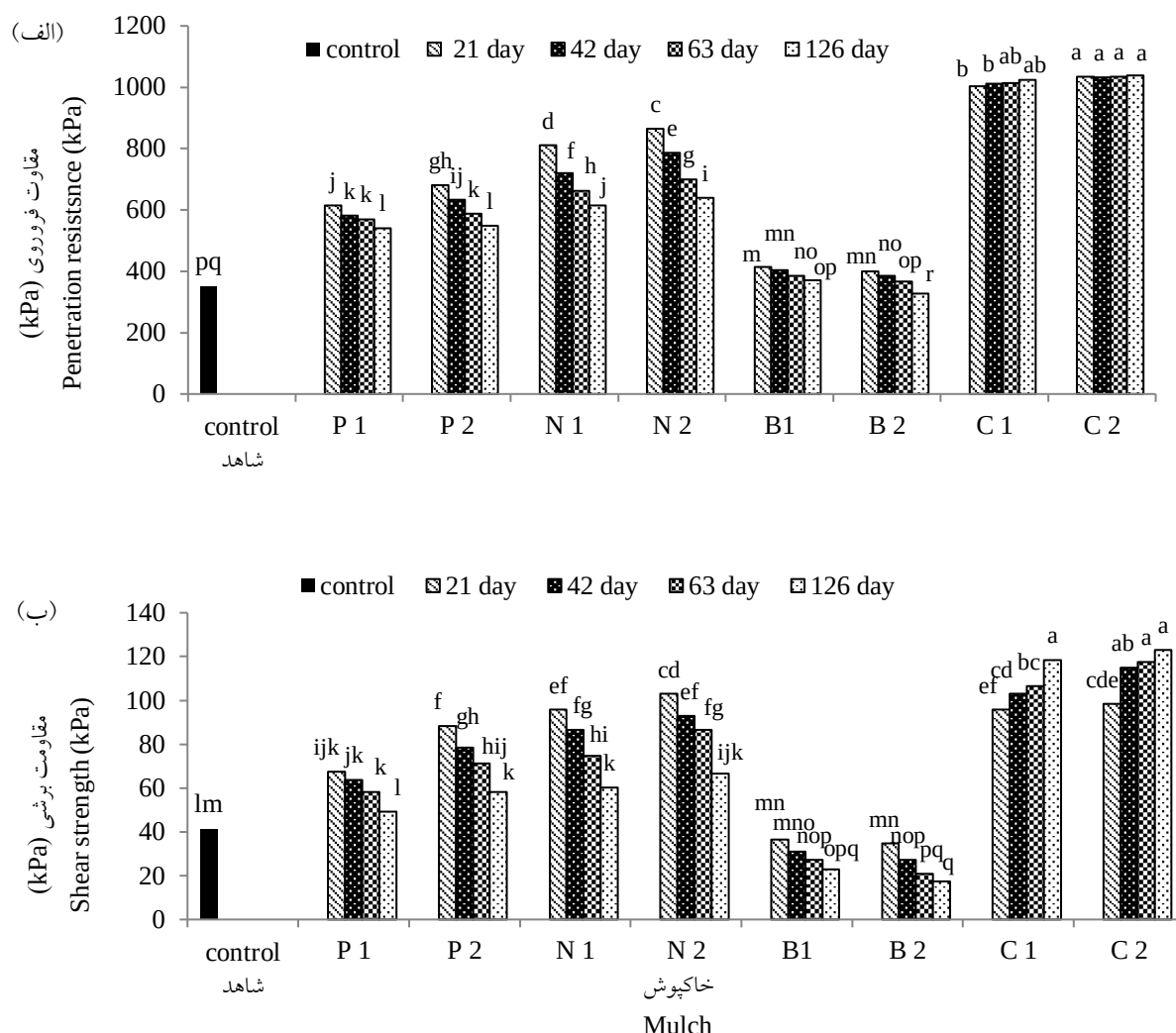
بر اساس نتایج پژوهش چانگ و چو (Chang and Cho, 2016) سطح ویژه بالای بیوپلیمرها واکنش آنها را با ذرات ریز خاک تقویت می‌کند و ارتباطی بسیار قوی بین ذرات خاک ایجاد می‌کند. استحکام ایجاد شده همراه با افزایش اصطکاک در حد فاصل ذرات درشت و خاکدانه‌ها باعث تقویت مقاومت خاک می‌شود. مقاومت برشی سطح خاک حاصل پیوند بین ذرات خاک و نشانگر مقاومت خاک در برابر حرکت ذرات است (Amiri Khaboushan et al., 2018). افزایش مقاومت برشی می‌تواند بر مقاومت خاک در برابر فرسایش بادی تأثیرگذار باشد (Ayeldeen et al., 2016). با گذشت زمان زغال زیستی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش نگهداشت رطوبت در خاک می‌شود همین عامل می‌تواند سبب کاهش مقاومت فروروی و برشی در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی شود. برهمکنش سلولز با ماتریکس خاک تحت تأثیر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژیکی می‌تواند باعث تشکیل و پایداری خاکدانه‌های درشت‌تر و افزایش مقاومت برشی و فروروی شود. با گذشت زمان، عوامل محیطی مانند تابش خورشید، اکسیداسیون، فرسایش بادی، شستشو توسط آب باران و سایر عوامل طبیعی می‌توانند طول عمر مواد تثبیت کننده را در مناطق بیابانی کوتاه کنند.

بررسی تأثیر خاکپوش‌ها بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر عامل‌های زمان، خاکپوش، غلظت، اثر دوگانه و سه‌گانه فاکتورها در سطح احتمال یک درصد بر پایداری خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. هر چهار خاکپوش باعث افزایش معنی‌دار پایداری خاکدانه نسبت به خاک شاهد شدند (شکل ۶-الف). به‌طور کلی هرچه اندازه خاکدانه‌ها بزرگتر باشد مقدار فرسایش کمتر خواهد بود (Shahabinejad et al., 2020). با گذشت زمان میانگین وزنی قطر خاکدانه در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز افزایش یافت و بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر ذرات در زمان چهارم مشاهده شد در حالی که گذشت زمان باعث کاهش کارایی خاکپوش‌های پلیمر پلی‌وینیل‌استات و نانورس مونت‌موریلونایت در خاک شد. یکی از دلایل اختلاف نسبی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در خاک شاهد و خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی را می‌توان به هدایت الکتریکی زغال زیستی نسبت داد (Burrell et al., 2016). زغال زیستی به علت هدایت الکتریکی بالا (۱۵/۵۵ ds/m) مقدار قابل توجهی از نمک‌های محلول را با خود به خاک اضافه می‌کند. افزایش غلظت الکترولیت باعث کاهش ضخامت لایه دوگانه و افزایش هم‌آوری شدن ذرات خواهد شد.

توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۵-الف) خاکپوش‌های کاربردی باعث افزایش معنی‌دار مقاومت فروروی خاک در مقایسه با خاک شاهد شدند. بیشترین مقدار مقاومت فروروی در خاکپوش هیدروژل سلولز مشاهده شد که با گذشت زمان افزایش یافت اما این افزایش در غلظت بالای آن (C₂) در زمان‌های مختلف از نظر آماری معنی‌دار نبود. حال آن‌که در غلظت کم آن (C₁) بین زمان‌های اول و دوم با سوم و چهارم تفاوت معنی‌داری وجود دارد. در سه خاکپوش دیگر با افزایش زمان مقاومت فروروی کاهش یافت. هنگامی که محلول پلیمر آلی به خاک اضافه می‌شود غشاهای پلیمری که با مخلوط پلیمر و آب تشکیل شده اند، ذرات خاک را محصور کرده و آنها را به هم متصل می‌کنند تا یک ساختار پایدار ایجاد کنند. هرچه غلظت پلیمر بالاتر باشد، مقدار غشاهای پلیمری برای پر کردن حفره‌های ذرات خاک برای حفظ ساختار خاک بیشتر شده و نیروهای پیوند دهنده قوی بین ذرات خاک مشاهده می‌شود (Liu et al., 2018). این عامل می‌تواند دلیلی برای افزایش مقاومت برشی و فروروی در خاک‌های تیمار شده با پلیمر پلی‌وینیل-استات باشد. احتمالاً با گذشت زمان در اثر تخریب و شستشو کارایی این پلیمر در خاک کاهش یافته است. خاک تیمار شده با بیوپار در مقایسه با سه خاکپوش دیگر کمترین مقدار مقاومت فروروی را نشان داد. زغال زیستی باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش نگهداشت رطوبت در خاک می‌شود همین عامل می‌تواند سبب کاهش مقاومت فروروی و برشی در خاک‌های تیمار شده با زغال زیستی شود (Ahmed et al., 2017).

نتایج مقایسه میانگین (شکل ۵-ب) نشان می‌دهد که هیدروژل سلولز در مقایسه با سایر خاکپوش‌ها بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت برشی خاک داشت. کمترین مقدار مقاومت برشی مربوط به خاکپوش زغال زیستی بود که کاهش آن در هر دو سطح غلظت آن، در زمان‌های دوم، سوم و چهارم نسبت به شاهد معنی‌دار بود. با گذشت زمان مقاومت برشی در خاک‌های تیمار شده با هیدروژل سلولز افزایش یافت اما در مورد سه خاکپوش دیگر عکس این روند رخ داد. در خاک‌های درشت بافت چسبندگی بین ذرات ضعیف بوده و در نتیجه مقاومت آن‌ها بسیار کم است، از این رو افزودن خاکپوش‌های نانورس مونت‌موریلونایت، پلیمر پلی‌وینیل‌استات، زغال زیستی کاه گندم و هیدروژل سلولز به خاک سبب به وجود آمدن پیوندهای فیزیکی-مکانیکی بین خاکپوش و ذرات خاک می‌شود که نتیجه آن به هم پیوستگی ذرات منفرد و افزایش مقاومت برشی خاک است. نتایج پژوهش زانگ و همکاران (Zong et al., 2014) نشان داد که افزودن زغال زیستی کلش گندم، چوب و لجن فاضلاب باعث کاهش چسبندگی، افزایش معنی‌دار اصطکاک داخلی و در نهایت کاهش مقاومت برشی خاک می‌شود. این در حالی است که



شکل ۵- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر مقاومت فروروی (الف) و مقاومت برشی (ب)

(P: پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

Figure 5. The effect of time, mulch and concentration on penetration resistance(a) and shear strength(b)

P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).

دهنده‌ی ذرات خاک عمل کند (Spaccini *et al.*, 2002)، یا به‌طور غیر مستقیم فعالیت میکروبی خاک را افزایش داده و باعث بهبود خاکدانه‌سازی و پایداری خاکدانه‌ها در خاک شود (Murphy, 2015). نتایج پژوهش میزوتا و همکاران (Mizuta *et al.*, 2015) نشان داد که در خاک تیمار شده با سلولز خاکدانه‌های درشت در مقایسه با تیمار شاهد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. در شرایط مرطوب پلیمر می‌تواند ذرات رس پراکند و خاکدانه‌های کوچک را جذب کند، در نتیجه خاکدانه‌های جدید به علت پل‌های کاتیونی (کلسیم و منیزیم) بین گروه‌های عاملی پلیمر و بار لبه‌ای منفی روی سطح کانی‌ها تشکیل می‌شوند (Peng *et al.*, 2017). رس مونت‌موریلونایت می‌تواند به

در حالت هم‌آوری شده، سایر مکانیسم‌های خاکدانه‌سازی می‌توانند با کارایی بیشتری عمل کنند، بنابراین پایداری کل خاک را با وجود شسته شدن نمک‌های محلول در طول زمان حفظ می‌کنند. سطوح زغال زیستی ممکن است مواد آلی ناپایدار را جذب کند، بنابراین بسترهایی برای میکروب‌ها ایجاد می‌شود که به نوبه خود، ممکن است خاکدانه‌های بیشتری را از طریق دفع مخاط ایجاد کنند (Liang *et al.*, 2010). بهبود شرایط خاک ممکن است برای قارچ‌های میکوریزا نیز مطلوب باشد (Fletcher *et al.*, 2014). این فرایندهای ثانویه ممکن است پس از فروپاشی اثر افزایش نمک، ثبات کل خاکدانه‌ها را حفظ کنند. مواد آلی می‌تواند به‌طور مستقیم به عنوان عامل اتصال

خاکپوش، زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن و اثر دوگانه و سه‌گانه عامل‌ها بر مقدار فرسایش خاک در سطح یک درصد معنی‌دار بود. با توجه به نتایج مقایسه میانگین (شکل ۷) در همه زمان‌ها، افزایش چرخه بر راندمان خاکپوش‌ها تأثیر منفی داشته و باعث افزایش مقدار فرسایش خاک و در نتیجه افزایش فرسایش بادی شده است. اگرچه چرخه‌های تر و خشک شدن تا حدی باعث کاهش کارایی خاکپوش‌ها شد، اما اثر آن‌ها در کاهش مقدار فرسایش خاک تا پایان چرخه چهارم وجود داشت. بیشترین مقاومت نسبت به تر و خشک شدن در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز مشاهده گردید به طوری که مقدار فرسایش خاک در زمان چهارم بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانو رس به ترتیب ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد (بدون خاکپوش) کاهش یافت. در خاک شاهد از چرخه اول تا سوم مقدار فرسایش خاک کاهش یافت اما چرخه چهارم باعث افزایش فرسایش خاک شد. نتایج تحقیقات نشان داده است که یک بار تر و خشک شدن باعث افزایش خاکدانه‌سازی می‌شود (Safadoust et al., 2012) اما تر و خشک شدن‌های متوالی، شکسته شدن خاکدانه‌های تولیدی (Utomo and Dexter, 1982) و افزایش ریز خاکدانه‌های فرسایش‌پذیر را به دنبال خواهد داشت. صفادوست و همکاران (Safadoust et al., 2012) علت کاهش پایداری ساختمان در اثر اعمال پنج چرخه تر و خشک شدن را ایجاد ترک‌های ریز در خاکدانه‌ها گزارش کردند. نتایج پژوهش الرسلانی (AL Rasslany, 2014) نشان داد چرخه‌های تر و خشک شدن باعث کاهش کارایی بیوپلیمرها در کنترل فرسایش شد اما مقاومت خاک در خاک‌های تیمار شده با نشاسته اصلاح شده حتی پس از چرخه پنجم قابل مشاهده بود. پلیمر پلی‌وینیل استات به آرامی در طی ۱۲ تا ۱۸ ماه تخریب می‌شود و سرعت تخریب در شرایط مرطوب تسریع می‌شود. چرخه‌های تر و خشک شدن در رس‌های انبساط پذیر (مونت موریلونایت) سبب توقف خاکدانه‌سازی می‌شود زیرا این رس‌ها در هنگام منبسط شدن از سایر ذرات جدا شده و سبب کاهش پایداری خاکدانه می‌شوند. احتمالاً با تخریب و آب شستگی پلیمر پلی‌وینیل استات و نانورس مونت‌موریلونایت در اثر چرخه‌های تر و خشک شدن به تدریج کارایی آن‌ها در چسبندگی ذرات و پایداری خاکدانه کاهش یافته است در نتیجه مقدار فرسایش خاک افزایش یافت. کاربرد مواد آلی در مناطقی که در معرض تر و خشک شدن قرار دارند می‌تواند برای استحکام بیشتر خاک و جلوگیری از عوامل مخرب ساختمان خاک استفاده شود (Khosravi and Moosavi, 2017).

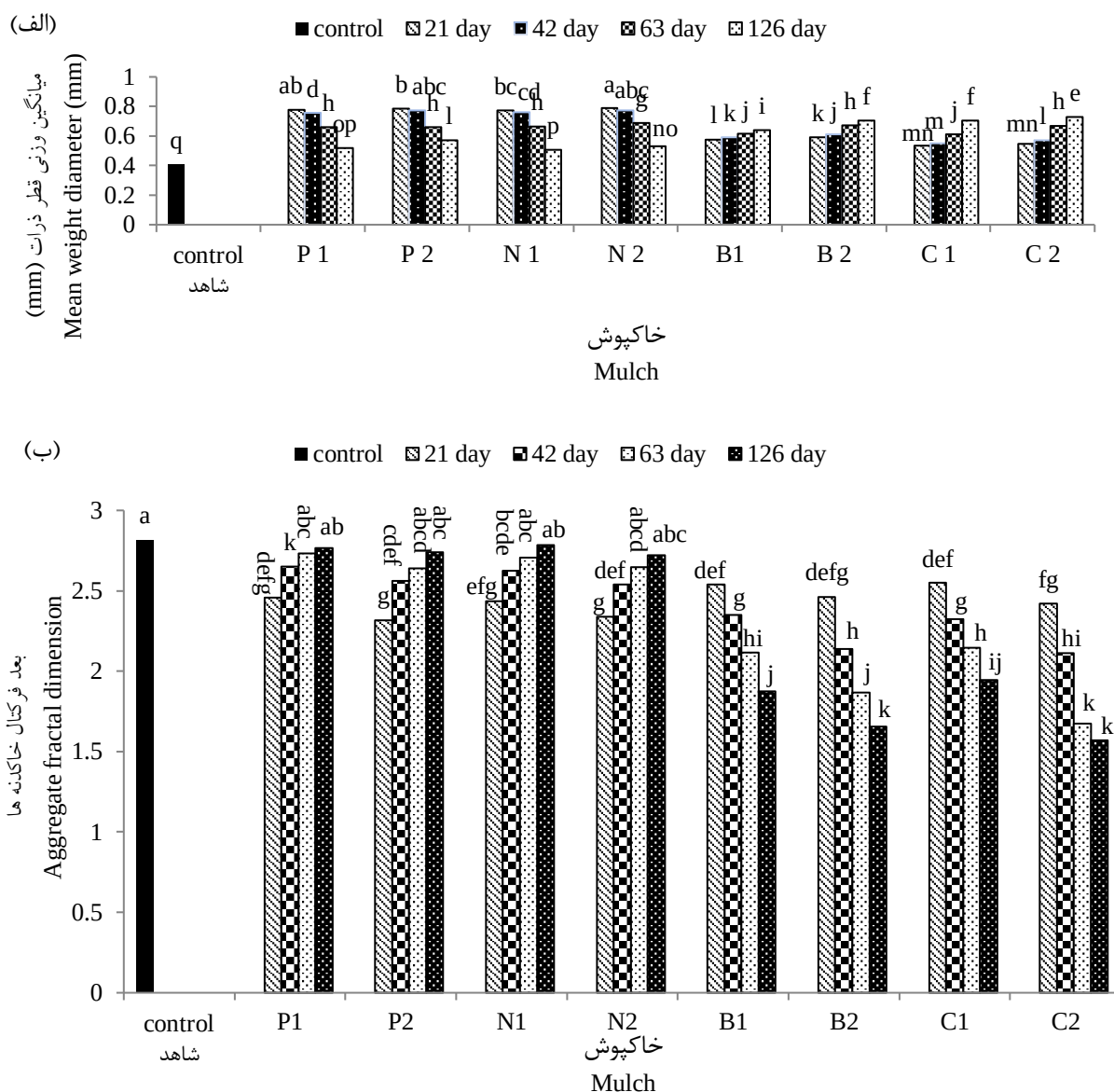
صورت پل بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث اتصال ذرات خاک شده و تولید خاکدانه را افزایش دهد (Nooralivand and Farrokhan, 2020).

بررسی تأثیر خاکپوش‌ها بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر عامل‌های زمان، خاکپوش، غلظت، اثرات متقابل دوگانه و سه‌گانه فاکتورها در سطح یک درصد بر بعد فرکتال خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. نتایج مقایسه میانگین (شکل ۶-ب) نشان می‌دهد خاکپوش‌ها در زمان‌های مختلف، تأثیرات متفاوتی بر بعد فرکتال خاکدانه داشته‌اند. به‌طور کلی مقدار بعد فرکتال در خاک‌های اصلاح شده با نانو رس و پلیمر بیشتر از مقدار آن در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز بود. دینگ و دینگ (Ding and Ding, 2007) گزارش کردند که مقادیر بیشتر بعد فرکتالی نشان دهنده‌ی تکه تکه شدن بیشتر ذرات است. بدین معنی که توزیع اندازه‌ی خاک غالباً با تعداد بیشتری از خاکدانه‌های کوچک تشکیل شده است. مقادیر کم بعد فرکتالی، بیان‌کننده‌ی این است که توزیع اندازه‌ی خاکدانه‌ها بیشتر از خاکدانه‌های بزرگتر تشکیل شده است. بعد فرکتالی خاکدانه‌ها عامل‌گویی در انعکاس تأثیر اقدامات مدیریتی بر توزیع اندازه خاکدانه‌ها و بهبود شرایط فیزیکی خاک است. این اقدامات به خوبی در ساختمان خاک نمود یافته و باعث کاهش بعد فرکتالی خاکدانه‌ها می‌شود (Ataee et al., 2014). نتایج به دست آمده برای بعد فرکتال با نتایج میانگین وزنی قطر خاکدانه مطابقت دارد. بعد فرکتال در تیمارهایی که میانگین وزنی بالاتری داشتند کمتر بود. بیشترین کمترین مقدار برای بعد فرکتال در زمان چهارم مشاهده شد که به ترتیب مربوط به تیمار نانورس و هیدروژل سلولز بود. رابطه منفی بین میانگین وزنی قطر ذرات و بعد فرکتال بیانگر آن است که با افزایش خاکدانه‌سازی، بعد فرکتال کاهش می‌یابد (Naghizade Asl et al., 2017).

تأثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر دوام و پایداری خاکپوش‌ها در خاک

به منظور بررسی تأثیر چرخه‌های طبیعی تر و خشک شدن بر کارایی خاکپوش‌ها در کنترل فرسایش خاک در هر یک از فواصل زمانی مورد مطالعه چهار چرخه تر و خشک شدن روی خاک‌های تیمار شده انجام شد. نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع خاکپوش، زمان و چرخه‌های تر و خشک شدن بر مقدار هدر رفت خاک نشان داد که اثر نوع



شکل ۶- اثر متقابل زمان، خاکپوش و غلظت بر پایداری خاکدانه‌ها (الف) و بعد فرکتال خاکدانه‌ها (ب)

(P: پلیمر پلی‌وینیل استات، N: نانو رس مونت‌موریلونایت، B: زغال زیستی و C: هیدروژل سلولز، ۱ و ۲: سطح اول و دوم غلظت خاکپوش‌ها).

Figure 6- The effect of time, mulch and concentration on aggregate stability (a) and aggregate fractal dimension (b)

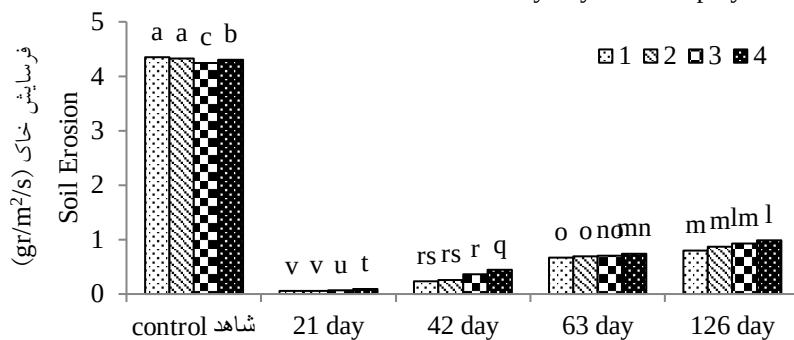
P: Polyvinyl Acetate polymer, N: montmorillonite nanoclay B: Biochar, C: Cellulose hydrogel, the first and second subscripts are concentration and time, respectively).

نتیجه‌گیری

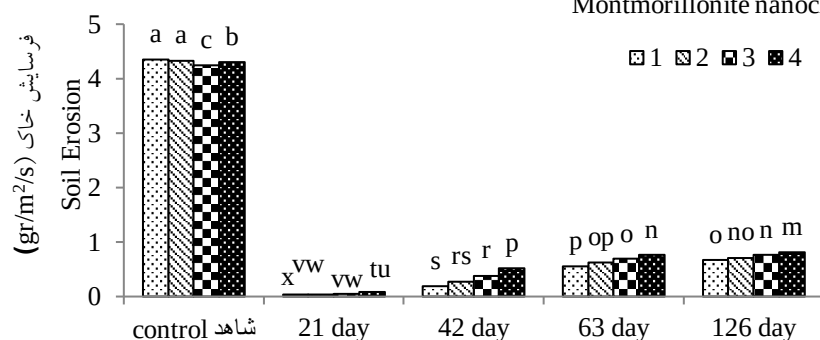
خاک شاهد کاهش یافت. در خاک‌های اصلاح شده با زغال زیستی و هیدروژل سلولز با گذشت زمان اثر خاکپوش‌ها بر کاهش فرسایش خاک بیشتر شد. اما در پلیمر پلی‌وینیل استات و نانورس مونت‌موریلونایت عکس این روند رخ داد و بیشترین تاثیر این دو خاکپوش در زمان اول مشاهده شد.

به‌طور کلی بر اساس نتایج این پژوهش کمترین فرسایش خاک در خاک تیمار شده با هیدروژل سلولز مشاهده شد. پس از ۱۲۶ روز مقدار هدر رفت خاک در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانو رس به ترتیب ۹۹، ۷۱، ۸۴ و ۸۵ درصد نسبت به

پلیمر پلی وینیل استات
Polyvinyl Acetate polymer

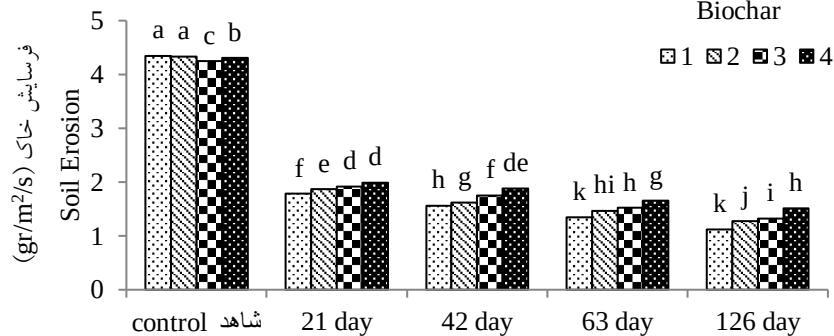


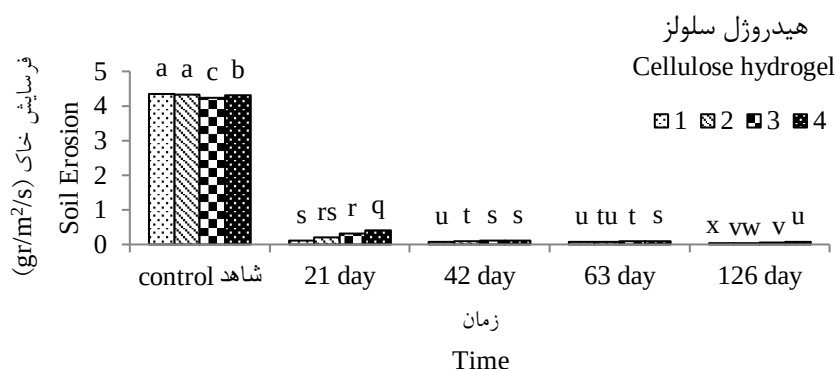
نانو رس مونت موریلونایت
Montmorillonite nanoclay



زغال زیستی

Biochar





شکل ۷- تاثیر چرخه‌های تر و خشک شدن بر فرسایش خاک
Figure 7- The effect of wet and drying cycles on soil erosion

خاک و جلوگیری از عوامل مخرب ساختمان خاک استفاده شوند، توصیه می‌شود اثر سایر مواد و اسیدهای آلی بر پایداری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها در خاک‌های مختلف بررسی شود تا بتوان ترکیبات آلی مناسب برای بهبود ساختمان خاک و در نتیجه جلوگیری از ایجاد فرسایش آبی و بادی و پیامدهای منفی ناشی از آن را پیشنهاد نمود. نتایج پژوهش نشان داد پلیمرهای زیستی سازگار با محیط زیست که از اجزای زیست توده ساخته شده‌اند می‌توانند به عنوان منابع پایدار برای کاهش فرسایش بادی در نظر گرفته شوند. پلیمرهای زیستی دریچه‌ای تازه‌ای برای استفاده از مواد زیستی پایدار بجای مواد مصنوعی باز خواهند کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تأمین هزینه مورد نیاز این تحقیق که قسمتی از قرارداد پژوهانه به شماره AS.SCU99.97 می‌باشد، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

این یافته‌ها نشان می‌دهد هیدروژل سلولز به عنوان یک بیوپلیمر و دوستدار محیط زیست نه تنها فرسایش بادی را به طور معنی‌داری کاهش می‌دهد بلکه با گذشت زمان پایدار بوده و کارایی آن حفظ شده است. لذا آن را می‌توان به عنوان خاکپوشی برای کنترل فرسایش در کانون‌های گرد و غبار پیشنهاد داد. البته شایان ذکر است که نتایج این مطالعه در شرایط تونل باد آزمایشگاهی انجام شده و بررسی کارایی آن در شرایط واقعی مزرعه ضروری است. چرخه‌های تر و خشک شدن نیز در همه‌ی زمان‌ها باعث افزایش فرسایش خاک شد و افزایش چرخه بر راندمان خاکپوش‌ها تاثیر منفی داشت. اما اثر خاکپوش‌ها بر کاهش فرسایش بادی تا چرخه چهارم قابل توجه بود. به گونه‌ای که مقدار فرسایش خاک بعد از چهار چرخه تر و خشک شدن، در خاک‌های اصلاح شده با هیدروژل سلولز، زغال زیستی، پلیمر و نانورس به ترتیب ۹۸، ۶۴، ۷۶ و ۸۱ درصد نسبت به خاک شاهد کاهش یافت. نتایج آزمایش چرخه‌های تر و خشک شدن نیز کارایی هیدروژل سلولز را به عنوان یک خاکپوش پایدار و موثر در کنترل فرسایش بادی نشان می‌دهد. به طور کلی با توجه به اینکه کاربرد مواد و اسیدهای آلی می‌توانند در مناطقی که در معرض تر و خشک شدن هستند برای استحکام بیشتر

منابع

- Abbawi, Z.W.S. (2015). Studying strength and stiffness characteristics of sand stabilized with cement and lime additives. *Engineering and Technology Journal*, 33(8), 1857-1875.
- Ahmadi, A., Neyshabouri, M.R., Rouhipour, H., & Asadi, H. (2011). Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility. *Journal of Hydrology*, 400, 305-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.045>
- Ahmed, A., Gariepy, Y., & Raghavan, V. (2017). Influence of wood-derived biochar on the compactibility and strength of silt loam soil. *International Agrophysics*, 31, 149-155. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0044>
- AL Rasslany, I.A., & AL, Z. (2014). Effects of poly vinyl alcohol/starch as Soil conditioners on the physical properties of loamy sand and loam soils following different wetting and drying cycles. *Journal of Natural Sciences Research*, 4(24), 36-41.
- Alipour, A., Tavili, A., Sangoony, H., & Alipouri, E. (2018). Operational, environmental and economic feasibility of using steel slag as mulch for controlling wind erosion. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 7(18), 15-26. (In Persian with English abstract)

6. Amiri Khaboushan, E., Emami, H., Mosaddeghi, M.R., & Astaraei, A.R. (2018). Estimation of unsaturated shear strength parameters using easily-available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 184, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.006>
7. Arzaghi, F., Farrokhiان Firouzi, A., Enayatizamir, N., & Khalilimoghaddam, B. (2017). Effect of Polyacrylamide Polymer on Wind Erosion Control of Sandy Soil in Azadegan Plain. *Journal of Water and Soil*, 31(4), 1070-1082. (In Persian with English abstract)
8. Arzaghi, F., Farrokhiان Firouzi, A., Enayatizamir, N., & Khalilimoghaddam, B. (2015). Consideration the effect of *Trichoderma harzianum* on windy erosion control of Azadegan plain sandy soil at laboratory and wind tunnel. *Soil Management and Sustainable Production*, 5(2), 239-251. (In Persian with English abstract)
9. Ataei, A., Gorji, M., & Parvizi, Y. (2014). Investigating the capability of fractal dimension of aggregates in evaluating different soil managements. *Iranian Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 28(4), 701-712. (In Persian)
10. Ayseldeen, M., Negm, A., El Sawwaf, M. & Gädä, T. (2016). Laboratory study of using biopolymer to reduce wind erosion. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 12(3), 228-240. <https://doi.org/10.1080/19386362.2016.1264692>
11. Bahari, M. & Shahnazari, A. (2015). Experimental study of the fine-grained earthen bed stabilization using nanoclay. *Journal of Water and Soil Sciences*, 19(72), 107-114. (In Persian)
12. Barthes, B., & Roose, E. (2002). Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: Validation at several levels. *Catena*, 47, 133-149. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00180-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00180-1)
13. Bravo-Garza, M.R., Bryan, R.B., & P. Voroney. (2009). Influence of wetting and drying cycles and maize residue addition on the formation of water stable aggregates in Vertisols. *Geoderma*, 151, 150-156. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.03.022>
14. Burrell, L.D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96-102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
15. Cantón, Y., Solé-Benet, A., Asensio, C., Chamizo S., & Puigdefábregas, J. (2009). Aggregate stability in range sandy loam soils relationships with runoff and erosion. *Catena* 77: 192-199. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.12.011>
16. Cao, Y., Wang, B., Guo, H., Xiao, H. & Wei, T. (2017). The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau. *Ecological Engineering*, 102, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.043>
17. Chang, I., Im, J., & Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally-friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, 8(3), 1-23. <https://doi.org/10.3390/su8030251>
18. Chu, G., Zhao, J., Huang, Y., Zhou, D., Liu, Y., Wu, M., Peng, H., Zhao, Q., Pan, B., E.W., & Steinberg, C. (2018). Phosphoric acid pretreatment enhances the specific surface areas of biochars by generation of micropores. *Environmental Pollution*, 240, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.003>
19. Cosentino, D., Chenu, C., & Le Bissonnais, Y. (2006). Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 2053-2062. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.12.022>
20. Das, K.C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehrh, D., & Schomberg, H. (2012). Biochars impact on soil-moisture storage in an ultisol and two aridisols. *Soil Science*, 177(5), 310-320. <http://doi.org/10.1097/SS.0b013e31824e5593>
21. Denison, M.R., & Hookham, P.A. (1996). Modeling of dust entrainment by high- speed airflow. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 34, 1392-1402. <https://doi.org/10.2514/3.13245>
22. Ding, Q., & Ding, W. (2007). Comparing stress wavelets with fragment fractals for soil structure quantification. *Soil and Tillage Research*, 93, 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.006>
23. Ekhtesasi, M.R., & Hazirei, F. (2016). Investigation of cement mulch on stabilization of windblown. *Journal of Range and Watershed Management*, 68(4), 739-750. (In Persian with English abstract)
24. Falsone, G., Bonifacio, E., & Zanini, E. (2012). Structure development in aggregates of poorly developed soils through the analysis of the pore system. *Catena*, 95, 169-176. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.02.014>
25. Fletcher, A.J., Smith, M.A., Heinemeyer, A., Lord, R., Ennis, C.J., Hodgson, E.M., & Farrar, K. (2014). Production factors controlling the physical characteristics of biochar derived from phytoremediation willow for agricultural applications. *Bioenergy Research*, 7, 371-380. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9380-x>
26. Gong, W., Zang, Y., Liu, B., Chen, H., Wu, F., Huang, R., & Wang, Sh. (2016). Effect of using polymeric materials in ecological sand-fixing of Kerqin Sandy Land of China. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(43), 1-7. <https://doi.org/10.1002/app.44102>
27. Grossman, J., Neves, E.G., & Luizão, F.J. (2010). Black carbon affects the cycling of nonblack carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
28. Hong, C., Chenchen, L., Xueyong, Z., Huiru, L., Liqiang, K., Bo, L., & Jifeng, L. (2020). Wind erosion rate for vegetated soil cover: A prediction model based on surface shear strength. *Catena*, 187, 104398. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104398>

29. Huang, G., & Zhang, R. (2005). Evaluation of soil water retention curve with the pore-solid fractal model. *Geoderma*, 127(1-2), 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.016>
30. Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J.F., & Ruiz-Sinoga, J.D. (2016). Effects of topsoil treatments on a orestation in a dry Mediterranean climate (southern Spain). *Solid Earth*, 7, 1479-1489.
31. Jamshidsafa, M., Khalili Moghadam, B., Jafari, S., & Ghorbani, SH. (2015). Feasibility investigation of FilterCake using in mulch production for sand dune stabilization in Ahvaz. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(1), 29-42. (In Persian with English abstract)
32. Jien, Sh.H., & Wang, C.Sh. (2013). Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.06.021>
33. Jingkuan, S., Fei, L., Zhongqi, L., Lingyan, Zh., & Zhengguo, S. (2014). Biochars derived from various crop straws: Characterization and Cd(II) removal potential. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 106, 226-231. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.04.042>
34. Johannes, C., & Verbeek, R. (2012). *Production and applications of Biopolymers*, InTech.
35. Kadokawa, J., Murakami, M., & Kaneko, Y. (2008). A facile preparation of gel materials from a solution of cellulose in ionic liquid. *Carbohydrate Research*, 343(4), 769-772. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2008.01.017>
36. Kadokawa, J., Murakami, M., Takegawa, A., & Kaneko, Y. (2009). Preparation of cellulose-starch composite gel and fibrous material from a mixture of the polysaccharides in ionic liquid. *Carbohydrate Polymers*, 75(1), 180-183. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.07.021>
37. Kalkan, E. (2009). Effects of silica fume on the geotechnical properties of fine- grained soils exposed to freeze and thaw. *Cold Regions Science and Technology*, 5, 130-135. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.03.011>
38. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). *Aggregate stability and size distribution*. (pp: 425-442). In: Klute A, (Ed.), *Methods of Soil Analysis*. ASA and SSSA, Madison, WI.
39. Khosravi, A., & Moosavi, A.A. (2017). Influence of organic acids and wetting-drying cycles on the aggregate stability and size distribution in a calcareous soil. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 31(2), 263-277. (In Persian with English abstract)
40. Li, L., Lin, Z., Yang, X., Wan, Z., & Cui, S. (2009). A novel cellulose hydrogel prepared from its ionic liquid solution. *Chinese Science Bulletin*, 54(9), 1622-1625. <https://doi.org/10.1007/s11434-009-0207-2>
41. Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S.P., Thies, J.E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Liu, J., Bai, Y., Song, Z., Lu, Y., Qian, W., & Kanungo, D.P. (2018). Evaluation of Strength Properties of Sand Modified with Organic Polymers. *Journal Polymers*, 10(5), 499-514. <https://doi.org/10.3390/polym10030287>
42. Ma, R., Cai, C.Z.L., Wang, J., Xiao, T., Peng, G., & Yang, W. (2015). Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based x-ray micro-computed tomography. *Soil and Tillage Research*, 149, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.12.016>
43. Majdi, H., Karimian- Eghbal, M., Karimzadeh, H.R., & Jalalian, A. (2006). Effect of Different Clay Mulches on the Amount of Wind Eroded Materials. *Journal of Crop Production and Processing*, 10(3), 137-149. (In Persian)
44. Mandal, A., & Singh, N. (2017). Optimization of atrazine and imidacloprid removal from water using biochars: Designing single or multi-staged batch adsorption systems. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(3), 637-645. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.02.010>
45. Mehrabi, sh., Soltani, S., & Jafari, R. (2015). Investigation of the relationship between climate parameters and dust phenomenon (Case study: Khuzestan province). *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources, Hydrology and Soil Science*, 19(71), 69-80. (In Persian with English abstract)
46. Memarzadeh, M., Emami, H., & Karimi, A.R. (2019). Evaluation the efficiency of mechanical and biological management practices on wind erosion in in Tal Hamid rail way Station of Tabas. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(3), 113-131. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22069/ejsms.2020.15601.1836>
47. Miri, A., Dragovich, D., & Dong, Z. (2017). Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion. *Scientific Reports*. 7(1): 12831-48. Miri, A., Dragovich, D. & Dong, Z. (2019). Wind-borne sand mass flux in vegetated surfaces-Wind tunnel experiments with live plants. *Catena*, 172, 421-434. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.006>
48. Mizuta, K., Taguchi, S., & Sato, Sh. (2015). Soil aggregate formation and stability induced by starch and cellulose. *Soil Biology and Biochemistry*, 87, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.04.011>
49. Movahedan, M., Abbasi, N., & Keramati Toroghi, M. (2013). Experimental investigation of Polyvinyl Acetat effect on wind erosion of different soils by impacting sand particles. *Journal of Water and Soil Conservation*, 20(1), 55-75. (In Persian with English abstract)
50. Murphy, B.W. (2015). Impact of soil organic matter on soil properties-a review with emphasis on Australian soils. *Soil Research*, 53(6), 605-635. <https://doi.org/10.1071/SR14246>
51. Naghizade Asl, F., Asgari, H. R., Emami, H., & Jafari, M. (2017). Stabilization of drifting sands using micro silica-lime- clay as a mulch. *Arabian Journal of Geoscience*, 10(536), 1-7. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3318-0>
52. Naghizade Asl, F., Asgari, H.R., Emami, H., & Jafari, M. (2018). Effect of micro silica (Silica fume) as mulch on

- soil losses of sand dunes. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 8(3), 139-145. <http://doi.org/10.22069/ejsms.2018.13963.1771>
53. Nooralivand, F., & Farrokhan Firouzi, A. (2020). Investigation of modified biochar, nanoclay and polyvinyl acetate on soil stabilization and wind erosion control of sandy and loamy sand soils. 51(4), 923-935. (In Persian with English abstract)
54. Oades, J.M. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76, 319-337.
55. Olawale, O.J., Abu, S.T., & Dorcas, O.O. (2016). Evaluation of soil aggregate stability under long term land management system. *International Journal of Plant and Soil Science*, 9(2), 1-7. <http://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/19691>
56. Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K., Abdouss, M., Najafi, P., Honarjoo, N., & Fallahzade, J. (2017). The impacts of nanoclay on sandy soil stability and atmospheric dust control. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(4), 193-196.
57. Paluszek, J. (2011). Physical quality of eroded soil amended with gel-forming polymer. *International Agrophysics*, 25, 375-382.
58. Peng, H.B., Gao, P., Chu, G., Pan, B., Peng, J.H., & Xing, B.S. (2017). Enhanced adsorption of Cu(II) and Cd(II) by phosphoric acid-modified biochars. *Environment Pollution*, 229, 846-853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.004>
59. Pires, L.F., Bacchi, O.O.S., & Reichardt, K. (2007). Assessment of soil structure repair due to wetting and drying cycles through 2D tomographic image analysis. *Soil and Tillage Research*, 94, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.10.008>
60. Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R., & Hajabbasi, M.A. (2005). Application of fractal theory to quantify soil aggregate stability as influenced by tillage treatments. *Biosystem Engineering*, 90(2), 227-234. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.002>
61. Rajabi Agereh, S., Kiani, F., Khavazi, K., Rouhipour, H., & Khormali, F. (2019). Evaluation of the efficiency of biological reformer in controlling wind erosion. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(4), 824-837. (In Persian with English abstract)
62. Rajaram, G., & Erbach, D.C. (1999). Effect of wetting -drying on soil physical properties. *Journal of Terramechanics*, 36, 39-49.
63. Refahi, H. (2009). *Wind Erosion and its Control*. 5th Ed. University of Tehran prees, 320 p. (In Persian)
64. Safadoust, A., Mahboubi, A.A., Mosaddeghi, M.R., Gharabaghi, B., Voroney, P., Unc, A., & Khodakaramian, G.h. (2012). Significance of physical weathering of two texturally different soils for the saturated transport of *E. coli* and bromide. *Journal of Environmental Management*, 107, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.007>
65. Shahabinejad, N., Mahmoodabadi, M., Jalalian, A., & Chavoshi, E. (2020). The influence of soil properties on the wind erosion rate at different regions of kerman province. *Journal of Water and Soil Science*, 24(9), 209-222. (in Persian with English abstract)
66. Spaccini, R., Piccolo, A., Mbagwu, J.S.C., Zena Teshale, A., & Igwe, C.A. (2002). Influence of the addition of organic residues on carbohydrate content and structural stability of some highland soils in Ethiopia. *Soil Use and Management*, 18, 404-411. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00259.x>
67. Sun, J.X., Sun, X.F., Zhao, H., & Sun, R.C. (2004). Isolation and characterization of cellulose from sugarcane bagasse. *Polymer Degradation and Stability*, 84(2), 331-339. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.02.008>
68. Tejedor, M., Jimenez, C., & Diaz, F. (2003). Volcanic materials as mulches for water conservation. *Geoderma*, 117, 283-295. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00129-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00129-0)
69. Utomo, W.H., & Dexter, A.R. (1982). Changes in soil aggregate water stability induced by wetting and drying cycles in non-saturated soil. *Journal of Soil Science*, 33, 623-637. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01794.x>
70. Vaezi, A. (2011). *Application of Petroleum mulches in controlling wind erosion and stabilization of Windblown*. 2th Conference National Wind Erosion and Dust Storms, 16-17 Feb, Yazd University, Yazd, Iran. (In Persian with English abstract)
71. Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., van der Velde, M., & Diafas, I. (2010). *Biochar application to soils a critical scientific review of effects on soil properties processes and functions*. EUR 24099 EN. Office for the Official Publications of the European Communities. Luxembourg, 149 pp.
72. Vidal, V.E., Vivas Miranda, J.G., & Paz Gonzalez, A. (2005). Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. *Ecology Modeling*, 182, 337-353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.012>
73. Walkly, A., & Black, I.A. (1934). An examination of digestion methods for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic and titration. *Soil Science Society of America Journal*, 37, 29-38.
74. Wang, B., Zheng, F.L., Römken, M.J., & Darboux, F. (2013). Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*, 187, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.01.018>

75. Xu, J., Tang, Y., & Zhou, J. (2017). Effect of drying-wetting cycles on aggregate breakdown for yellow-brown earths in karst areas. *Geoenvironmental Disasters*, 4, 1-13.
76. Yang, Y. & Liu, X. (2006). Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilongjiang region of North China. *Soil Tillage and Research*, 38, 231-243. <http://doi.org/10.1631/jzus.2006.B0858>
77. Zimbone, S.M., Vickers, A., Morgan, R.P.C., & Vella, P. (1996). Field investigation of different techniques for measuring surface soil shear strength. *Soil Technology*, 9, 101-111. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(96\)00002-5](https://doi.org/10.1016/0933-3630(96)00002-5)
78. Zong, Y., Chen, D., & Lu, S. (2014). Impact of biochar on swell-shrinkage behavior, mechanical strength and surface cracking of clayey soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 920-926. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300596>



Digital Mapping of Surface and Subsurface Soil Organic Carbon and Soil Salinity Variation in a Part of Qazvin Plain (Case Study: Abyek and Nazarabad Regions)

G. Rezaie¹, F. Sarmadian^{id*2}, A. Mohammadi Torkashvand³, J. Seyedmohammadi⁴, M. Marashi Aliabadi⁵

Received: 02-01-2023

Revised: 06-02-2023

Accepted: 13-02-2023

Available Online: 13-02-2023

How to cite this article:

Rezaie, G., Sarmadian, F., Mohammadi Torkashvand, A., Seyedmohammadi, J., & Marashi Aliabadi, M. (2023). Digital mapping of surface and subsurface soil organic carbon and soil salinity variation in a part of Qazvin plain (Case study: Abyek and Nazarabad regions). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 315-331. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.80369.1238>

Introduction

Knowledge of the spatial distribution of soil salinity and soil organic carbon (SOC) leads to obtaining valuable information that is effective in decision-making for agricultural activities. More than a third of the world's land is affected by salt, which threatens the growth and production of crops, and prevents the development of sustainable agriculture. The high electrical conductivity (EC) content in soils poses significant challenges in arid and semi-arid regions, greatly impacting agricultural production. Saline and sodic soils often exhibit high levels of sodium which is a key characteristic. The presence of sodium ions leads to the destabilization of soil aggregates and the dispersion of soil particles resulting in the closure of soil pores. Consequently, unfavorable changes occur in the soil physical, chemical, and biological properties increasing its susceptibility to water and wind erosion. Additionally, high sodium levels can lead to the decomposition of soil organic carbon (SOC). SOC is crucial for water retention, cation exchange, and nutrient availability, making its reduction in agricultural soils a significant threat to sustainable soil management. Therefore, the investigation of soils in terms of EC and SOC contents and their spatial distribution is of great importance to support decision-makers in agricultural development planning to reduce challenges related to food security in arid and semi-arid regions.

Materials and Methods

This study was conducted with the aim of investigating the EC and SOC in topsoil (0-30 cm) and subsoil (30-60 cm) layers using four machine learning (ML) algorithms namely, random forest (RF), decision tree (DTr), support vector regression (SVR) and artificial neural network (ANN) performed in Qazvin Plain. The study area includes a part of agricultural lands and natural areas of Alborz and Qazvin provinces, between the Nazarabad and Abyek cities in Iran. This region with an area of 60,000 hectares is located at latitude 35° 54' to 36° 54' to the north and 50° 15' to 50° 39' to the east. This research was carried out in four stages including (i) soil sampling and measuring the physical and chemical properties of the soil and preparation of environmental covariates from a digital elevation model (DEM) with spatial resolution 12.5 m and Landsat 8 satellite imagery with spatial

1- Ph.D. Student of Soil Genesis, Classification and Soil Evaluation of the Soil Science Department, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

2- Professor, Soil Science Department, Faculty of Agricultural, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: fsarmad@ut.ac.ir)

3- Professor of the Soil Science Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Assistant Professor, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

5- Assistant Professor of the Soil Science Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.80369.1238](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80369.1238)

resolution 30 m by SAGA GIS and ENVI software, (ii) spatial modeling of soil EC and SOC in the topsoil and subsoil layers by the RF, SVR, ANN, and DTr ML algorithms, (iii) evaluating the efficiency of the ML algorithms and determining the relative importance of environmental covariates, and (iv) preparation of spatial prediction maps of EC and SOC in the topsoil (0-30 cm) and subsoil (30-60 cm) layers in the study area.

Results and Discussion

The result of the spatial prediction maps of EC showed that the studied area has non-saline to very saline soils up to a depth of 60 cm. It is also possible that the EC equivalent shows a decreasing trend in soil salinity with a depth from 6.05 to 5.55 ds/m from the topsoil to the subsoil layer. The highest amount of SOC was observed in the surface layer equal to 3.3%. Globally SOC content decreased from the surface (average of 0.84%) to depth (average of 0.4%). The high spatial variability of SOC showed that the soils of the study area are affected by management activity.

Environmental covariates were extracted as a proxy of topography and remote sensing indices including elevation, diffuse Insolation (Diffuse), Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF), Normalized Differences Vegetation Index (NDVI), SAGA wetness index (SWI) and wind Effect (WE) were used as representatives of soil formation factors. The topography parameters, including the elevation, diffuse insolation, and Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness, were most closely related to EC and SOC variations in each topsoil and subsoil layer. Elevation can be justified around 50% and 35% of EC and 28.56% and 29.47% of SOC variations in the topsoil and subsoil layers, respectively, followed by the diffuse variable can succeed to justified 19.7% and 25.1% of EC and 27.28% and 27.67% of SOC spatial variations in the topsoil and subsoil layers, respectively.

The results confirmed that the RF was recognized as outperforming the ML model for predicting EC in the topsoil ($R^2=0.74$, RMSE =0.36, and nRMSE= 0.07), as well as predicting SOC in topsoil and subsoil layers ($R^2=0.90$ and $R^2=0.80$), followed by the DTr for predicting EC ($R^2=0.77$, RMSE/0.9, and nRMSE 0.17) in the subsoil layer in comparison other models.

Conclusion

The RF (Random Forest) and DTr (Decision Tree) models incorporating topographic parameters demonstrated satisfactory accuracy in predicting the variation of topsoil and subsoil electrical conductivity (EC) and soil organic carbon (SOC) in the study area. Topography plays a crucial role in soil formation, and elevation-based topographic attributes are commonly used as key predictors in digital soil mapping projects. The variability in topography influences water flow and sedimentation processes which, in turn, affects soil development and the spatial distribution of soil properties. The resulting soil maps can be valuable tools for decision-making programs related to soil management in the region.

Keywords: Environmental covariates, Soil properties mapping, Spatial modeling, Topsoil and subsoil variations

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۳۳۱-۳۱۵

نقشه‌برداری رقومی تغییرات سطحی و زیرسطحی کربن آلی و شوری خاک در بخشی از اراضی دشت قزوین (مطالعه موردی: مناطق آبیک و نظر آباد)

گردآفرین رضایی^۱ - فریدون سرمیدیان^{۲*} - علی محمدی ترکشوند^۳ - جواد سید محمدی^۴ - مریم مرعشی علی‌آبادی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۴

چکیده

آگاهی از توزیع مکانی شوری و کربن آلی خاک منجر به دستیابی به اطلاعات ارزشمندی می‌گردد که در اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای فعالیتهای کشاورزی موثر است. این مطالعه با هدف بررسی تغییرات مکانی قابلیت هدایت الکتریکی (EC) به عنوان بیانگر وضعیت شوری خاک و کربن آلی خاک (SOC) در دو لایه سطحی (صفر تا ۳۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۳۰-۶۰ سانتی‌متر) با استفاده از چهار الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF)، درخت تصمیم (DTr)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در دشت قزوین انجام شد. بدین منظور، از ۲۷۸ خاکرخت مطالعاتی نمونه‌برداری گردید و پس از عبور از الک دو میلی‌متر، مقادیر EC و SOC آنها اندازه‌گیری گردید. متغیرهای کمکی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و ماهواره لندست ۸، شامل ارتفاع (Elevation)، تابش پخشیدگی (Diffuse)، شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا (MrVBF)، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص خیسی ساگا (SWI) و شاخص جهت باد (WE) به عنوان نمایندگان عوامل خاکسازي مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که مدل RF برای پیش‌بینی EC خاک در لایه سطحی با R^2 برابر با ۰/۷۴ و RMSE ۰/۳۶ و $nRMSE$ ۰/۰۷ و همچنین پیش‌بینی کربن آلی در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی با R^2 به ترتیب برابر با ۰/۹۰ و ۰/۸۰ و به دنبال آن مدل DTr برای پیش‌بینی شوری خاک در لایه زیرسطحی با R^2 ۰/۷۷ و RMSE ۰/۰۹ و $nRMSE$ ۰/۱۷ نسبت به سایر مدل‌ها دارای صحت بالاتری بودند. همچنین، متغیرهای توپوگرافی شامل ارتفاع، شدت تابش پخشیدگی و شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا بیشترین ارتباط را با تغییرات شوری و کربن آلی خاک در هر دو لایه سطحی و زیرسطحی داشتند. به طور کلی مدل‌های RF و DTr به همراه متغیرهای توپوگرافی توانستند تغییرات شوری و کربن آلی سطحی و زیرسطحی خاک را با صحت قابل قبول در منطقه مورد مطالعه ارائه نمایند؛ که نقشه‌های تهیه شده می‌توانند برای اعمال تصمیم‌های مدیریتی لازم در مورد خاک‌های منطقه مورد استفاده قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: تغییرات سطحی و عمقی، متغیرهای محیطی، مدلسازی رقومی، نقشه‌برداری ویژگی‌های خاک

۱- دانشجوی دکتری پیدایش و رده بندی و ارزیابی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: fsarmad@ut.ac.ir

۳- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۴- استادیار پژوهشی، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

۵- استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

مقدمه

بیش از یک سوم اراضی جهان تحت تاثیر شوری قرار دارند که رشد و عملکرد محصولات را تهدید می کند و مانع از توسعه کشاورزی پایدار می شوند (Zhao et al., 2020). شوری خاک یکی از بزرگترین چالش ها در مناطق خشک و نیمه خشک است که به شدت بر تولیدات کشاورزی تاثیر می گذارد (Halima et al., 2019).

کربن آلی خاک (SOC) نقش مهمی در ظرفیت نگهداری آب، تبادل کاتیون-آنیون و در دسترس بودن مواد غذایی دارد که باعث رشد گیاه می شود. بنابراین، کاهش محتوای SOC در خاک های کشاورزی به طور کلی تهدیدی بزرگ برای پایداری کشت خاک در نظر گرفته می شود (Žižala et al., 2019). فرآیندهایی مانند زهکشی^۱ و تیغه کشی^۲ بسته به نوع خاک، سیلاب و شوری می توانند منجر به اکسیداسیون مستقیم SOC شوند (Holmquist et al., 2018). بنابراین، بررسی خاک ها از نظر شوری و کربن آلی و توزیع مکانی آن برای حمایت از تصمیم گیرندگان در برنامه ریزی توسعه کشاورزی برای کاهش چالش های مربوط به امنیت غذایی در اراضی متاثر از نمک از اهمیت بالایی برخوردار است. این در حالی است که گزارش وضعیت منابع خاک جهان (FAO and ITPS., 2015) اشاره می کند که اطلاعات در مورد میزان و ویژگی های خاک های آسیب دیده از نمک بسیار پراکنده است.

در سال های اخیر تعداد زیادی از مطالعات شوری خاک (Corwin, 2020; Ma et al., 2021; Wang et al., 2021; Zhou et al., 2019; Gholizadeh et al., 2019;) آلی (Lamichhane et al., 2019) مبتنی بر سنجش از دور انجام شده است. حسنی و همکاران (Hassani et al., 2020) با استفاده از مدل های یادگیری ماشین^۴ (ML) و مجموعه ای از داده های اقلیمی، توپوگرافی، خاک و سنجش از دور^۵ (RS) به پیش بینی مکانی خاک های شور و سدیمی در عمق خاک و با دوره های زمانی مختلف در مقیاس جهانی پرداختند. تقدسی و همکاران (Taghadosi et al., 2018) با استفاده از تصاویر سنتینل ۱ و با کمک مدل رگرسیون بردار پشتیبان^۶ (SVM) به پایش شوری خاک با R2 برابر با ۰/۹۷ و RMSE برابر با ۰/۳۵ در اراضی با خطر شوری شدید پرداختند. حمزه پور و همکاران

(Hamzehpour et al., 2019) مطالعه ای با هدف ارزیابی برهمکنش و تاثیر نسبی متغیرهای محیطی انتخاب شده بر تغییرات مکانی SOC انجام دادند. نتایج نشان داد تعامل قابل توجهی بین متغیرهای EVI، Sand، Wetness و تغییرات SOC وجود دارد. عبدالعماد و همکاران (Abd-Elmabod et al., 2019) به بررسی گسترش شهرسازی و تاثیر آن بر پتانسیل کشاورزی و ذخایر کربن آلی با استفاده از داده های ماهواره ای چندزمانی و تکنیک های سنجش از دور در دلتای نیل پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که گسترش شهری منجر به از دست رفتن ذخایر SOC و تغییر خاک های حاصلخیز کشاورزی به خاک های شور و با زهکشی ضعیف شده است.

آگاهی از توزیع مکانی شوری و SOC برای دستیابی به اطلاعات در اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای کشاورزی پایدار موثر است. در اکثر مطالعات انجام شده به روش کمی، سنسورهای سنجش از دور برای برآورد شوری خاک در سطح به کار گرفته شده اند، این در حالی است که شوری خاک زیر سطحی بر رشد گیاه تاثیر گذار است زیرا مانع از جذب رطوبت و مواد مغذی توسط ریشه می شود (Tripathi and Tiwari, 2021). العزیز و همکاران (AbdEl Aziz et al., 2018) اعلام کردند که اراضی دارای EC بین ۲/۲۵ تا ۵ دسی زیمنس بر سانتی متر از ۱۷ درصد در سال ۱۹۹۱ به ۳۷ درصد در سال ۲۰۰۶ افزایش یافت. سوالیم و همکاران (Swileam et al., 2019) نقشه های رطوبت و شوری خاک را در عمق ۳۰ و ۶۰ سانتی متری خاک تهیه کردند و نشان دادند، که ضریب همبستگی بین شوری و رطوبت لایه سطحی و زیر سطحی به ترتیب ۰/۴۸ و ۰/۶۸ بود. اولیاکولف و همکاران (Avliyakov et al., 2020) با استفاده از داده های سنجش از دور و تکنیک آنالیز نقشه بردار زاویه طیفی^۷ (SAM) با دقت کلی ۲۴/۷۴ درصد نقشه خاک های متاثر از نمک را در اعماق مختلف تهیه کردند. اردکانی و وحدتی (Ardakani and Vahdati, 2017) تغییرات SOC و شوری خاک را در بین سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ در استان یزد مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که در طی این مدت محتوای کربن آلی اراضی کشاورزی افزایش یافته و مساحت اراضی شور کاهش یافته است. با این حال، مطالعات بسیار کمی به بررسی همزمان تغییرات سطحی و زیر سطحی تغییرات مکانی قابلیت هدایت الکتریکی^۸ (EC) به عنوان بیانگر وضعیت شوری خاک و محتوای کربن آلی خاک در

1- Soil Organic Carbon

2- drainage

3- diking

4- Machine Learning

5- Remote Sensing

6- Support Vector Machine

7- Spectral angle mapper

8- Electrical conductivity

کشور شامل رسوبات آبرفتی و کوهرفتی مربوط به دوره کواترنر بیشتر متمرکز در بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه و کفه‌های گلی و نمکی عمدتاً در بخش‌های جنوبی منطقه می‌باشد. خاک‌های منطقه در سه رژیم رطوبتی زریک خشک، اریدیک ضعیف و اکوتیک و حرارتی ترمیک واقع شده‌اند (Rahmani et al., 2022) و از نظر رده‌بندی در سه رده اریدی سولز، انتی سولز و اینسپتی سولز قرار دارند (Soil survey staff, 2017).

روند اجرای تحقیق

شکل ۲ روندنمای اجرای تحقیق را در ۴ مرحله نشان می‌دهد: ۱. حفر نقاط نمونه‌برداری و اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و تهیه متغیرهای کمکی، ۲. مدل‌سازی پراکنش مکانی EC و درصد SOC در لایه سطحی و زیر سطحی توسط مدل‌های یادگیری ماشین RF، SVR، ANN و DTr، ۳. اعتبارسنجی کارایی مدل‌ها و تعیین اهمیت نسبی متغیرهای محیطی و ۴. تهیه نقشه پیش‌بینی توزیع مکانی سطحی و زیر سطحی EC و SOC در منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

مطالعات میدانی در مقیاس حدواسط نیمه‌تفضیلی تا اجمالی (طی یک دوره ۶ سال) انجام شد و براساس روش طبقه‌بندی تصادفی در نهایت ۲۷۸ خاکرخ مشاهداتی مورد مطالعه واقع گردید (شکل ۱-ج). نقاط مشخص گردیده تا عمق ۱۵۰ سانتی‌متری یا بالاتر از لایه محدودکننده حفر و براساس راهنمای تشریح صحرایی خاک‌ها تشریح و از کلیه افق‌های ژنتیکی قابل شناسایی نمونه‌برداری شد. پس از نمونه‌برداری و شماره‌گذاری، نمونه‌های خاک به آزمایشگاه منتقل شد. پس از هوا خشک شدن و عبور تمامی نمونه‌ها از الک دو میلی‌متر، مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک (EC) در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1982) به‌عنوان بیانگر وضعیت شوری خاک و کربن آلی خاک به روش واکلی بلک (Jackson, 1975) برای تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. در نهایت میانگین وزنی EC و SOC برای اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری محاسبه شد.

متغیرهای محیطی و انتخاب آن‌ها

در نقشه‌برداری رقومی خاک، توزیع مکانی کربن آلی و شوری خاک و روابط آنها با عوامل تشکیل‌دهنده خاک، از جمله خواص خاک، مواد مادری، اقلیم، موجودات زنده، پستی و بلندی و زمان براساس مدل مکانی اسکورپن که توسط مک برتنی و همکاران (McBratney et al., 2003) ارائه شده، توضیح داده می‌شود.

اراضی کشاورزی پرداخته‌اند. اکثر مطالعاتی مبتنی بر تغییرات سطحی ویژگی‌های خاک از جمله کربن آلی و شوری در سطح معطوف بوده (Taati et al., 2020; Khazaie et al., 2017) و در کمتر مطالعاتی به بررسی همزمان تغییرات سطحی و زیر سطحی آنها پرداختند. با توجه به اینکه جمله شوری یک ویژگی دینامیک خاک است و تغییرات آن در دوره‌های مختلف زمانی از سطح به عمق متغیر است. با توجه به تاثیر متقابل شوری و کربن آلی بر روی سایر ویژگی‌های خاک و همچنین سایر کارکردهای اصلی خاک اهمیت این بررسی فزونی می‌یابد. از دیگر سو، با توجه به اینکه بخش عمده منطقه مورد مطالعه تحت کشت گیاهان یکساله می‌باشد که نفوذ و توسعه ریشه آن‌ها تا اعماق زیرسطحی نیز گسترش می‌یابد، درک و اطلاع از تغییرات مقادیر شوری و کربن آلی خاک می‌تواند بر مدیریت تغذیه، حفظ حاصلخیزی و افزایش عملکرد محصولات زراعی موثر باشد. بنابراین جهت پوشش بیشتر اطلاعات در این زمینه مطالعه حاضر با اهداف (۱) تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی شوری و کربن آلی خاک در دو لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متری) و زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی‌متری) با استفاده از چهار الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی^۱ (RF)، درخت تصمیم^۲ (DTr)، رگرسیون بردار پشتیبان^۳ (SVR) و شبکه عصبی مصنوعی^۴ (ANN)، و (۲) شناسایی مهمترین متغیرهای کمکی محیطی تاثیرگذار بر روی پیش‌بینی مکانی شوری و کربن آلی خاک در دو عمق سطحی و زیرسطحی مورد نظر در بخشی از اراضی دشت قزوین که تحت کشت و برداشت دائمی بوده و از توان تولید قابل توجهی در تولید محصولات کشاورزی برخوردار است طراحی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

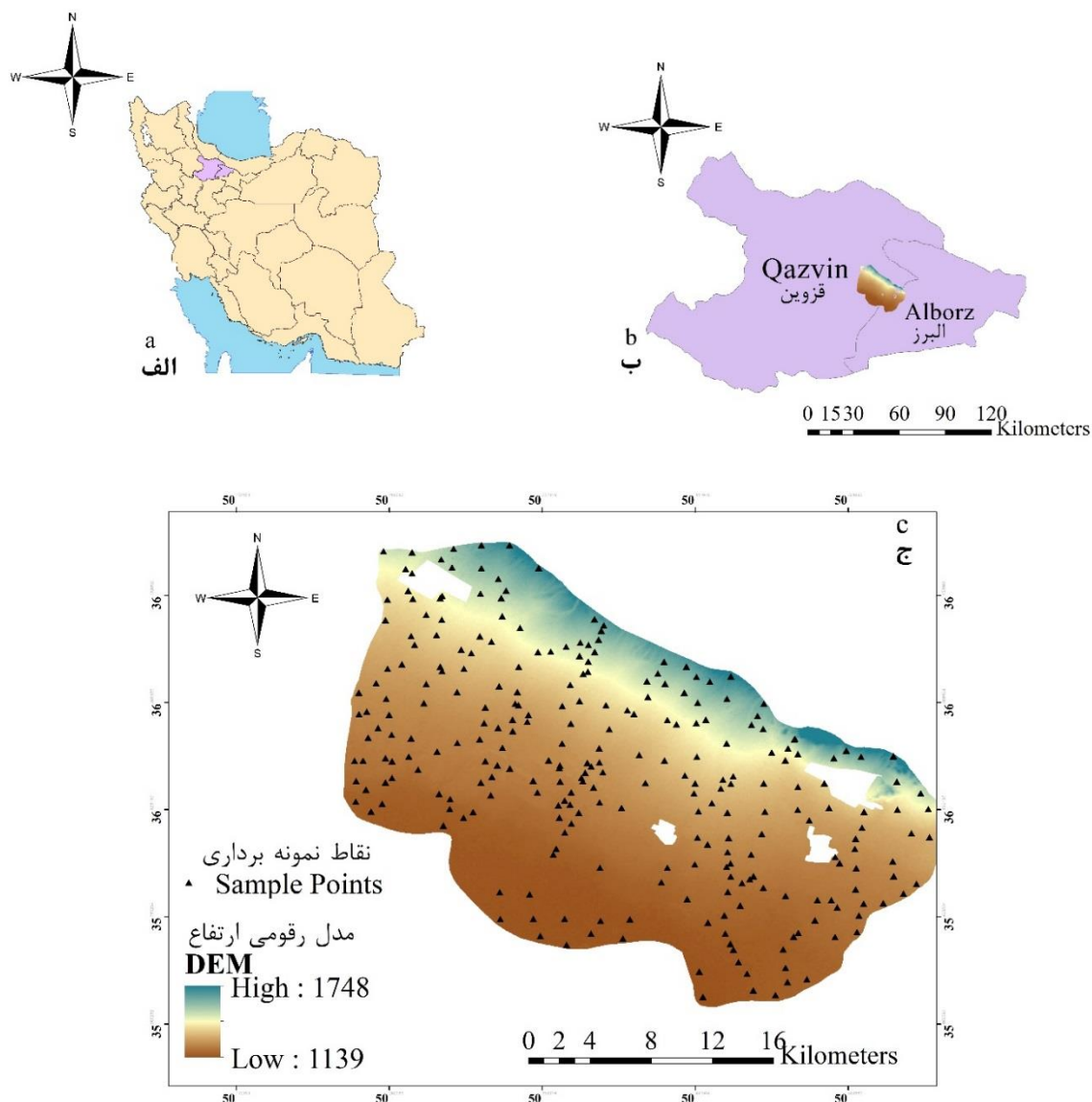
منطقه مورد بررسی شامل بخشی از اراضی کشاورزی و عرصه‌های طبیعی استان‌های البرز و قزوین، حدفاصل شهرستان‌های نظرآباد و آبیک قرار است. این منطقه با مساحت ۶۰۰۰۰ هکتار در عرض جغرافیایی ۳۵° ۵۴' تا ۳۶° ۵۴' شمالی و طول جغرافیایی ۵۰° ۱۵' تا ۵۰° ۳۹' شرقی واقع شده است (شکل ۱-الف، ب و ج). حداقل و حداکثر ارتفاع در این منطقه به ترتیب ۱۱۴۰ متر و ۱۷۴۷ متر نسبت به دریای آزاد است. این منطقه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک براساس روش کوپن است. واحدهای فیزیوگرافی منطقه مورد مطالعه شامل تپه و فلات در قسمت شمال، دشت دامنه‌ای قسمت مرکز و اراضی پست در جنوب می‌باشد. مواد مادری تشکیل‌دهنده خاک‌های منطقه بر اساس نقشه زمین‌شناسی (۱:۱۰۰۰۰۰) سازمان زمین‌شناسی

3- Support Vector Regression

4- Artificial Neural Network

1- Random Forest

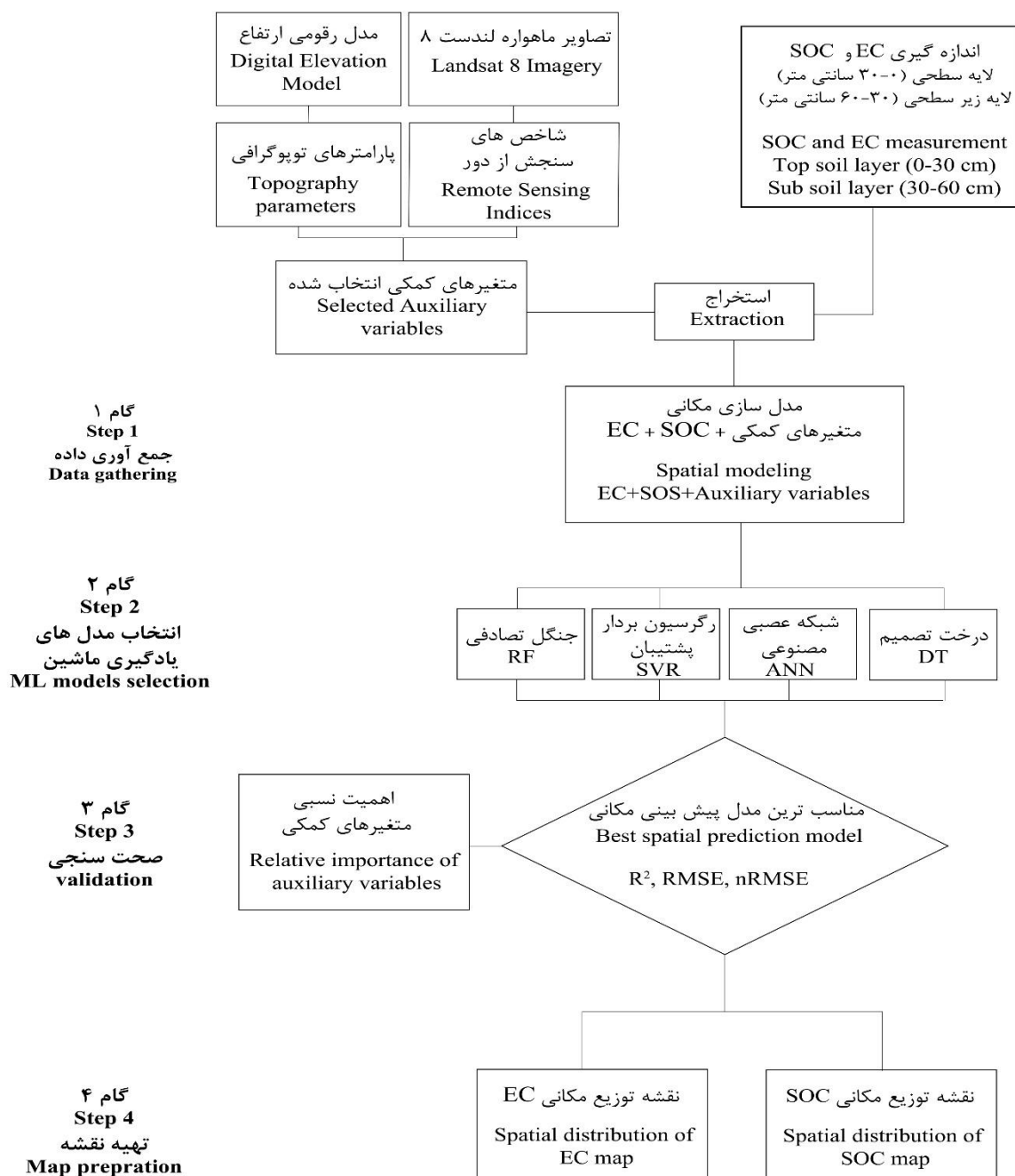
2- Decision Tree



شکل ۱- الف. نقشه استان‌های قزوین و البرز؛ ب و ج. منطقه مورد مطالعه و پراکنش مکانی نقاط نمونه‌برداری شده
Figure 1- A. Qazvin and Alborz provinces B. The study area and spatial distribution of soil samples

کنتراست انجام شد. در این تحقیق متغیرهای محیطی مورد استفاده براساس مطالعات پیشین صورت پذیرفته توسط رحمانی و همکاران (Mousavi et al., 2022)، موسوی و همکاران (Rahmani et al., 2022) و خاموشی و همکاران (Khamoshi et al., 2017) در منطقه مورد مطالعه، برای پیش‌بینی مکانی EC و SOC انتخاب شدند (جدول ۱).

متغیرهای توپوگرافی از مدل رقومی ارتفاع (آلوس پالزار^۱) با وضوح ۱۲/۵ متر در نرم افزار SAGA GIS مستخرج و متغیرهای سنجش از دور از میانگین تصاویر مربوط به فصل‌های تابستان، پاییز و زمستان (ماه‌های شهریور تا بهمن) طی سال‌های ۱۳۹۵ تا ۱۴۰۰ ماهواره لندست ۸ (با شماره ردیف و گذر به ترتیب ۳۵ و ۱۶۵ با قدرت مکانی ۳۰ متر) با استفاده از نرم افزار ENVI نسخه ۵،۳،۵ تهیه شدند. ابتدا کلیه پیش پردازش‌های لازم از جمله تصحیحات رادیومتری و بهبود



شکل ۲- روندنمای پیش‌بینی مکانی شوری و کربن آلی خاک

Figure 2- Flowchart of soil salinity and organic carbon spatial prediction

جدول ۱- متغیرهای کمکی مورد استفاده در پیش‌بینی EC و SOC
Table 1- Auxiliary variables used in predicting EC and SOC

منبع Source	متغیر کمکی Auxiliary variables	نماد Symbol	شرح Description	نماینده عامل خاکساز Scorpan
مدل رقومی ارتفاع Digital elevation model	ارتفاع Elevation	Elevation	تابش مستقیم انعکاس یافته از سطوح	توپوگرافی R
	شدت تابش پخشیده Diffuse Insolation	Diffuse	Direct radiation reflected from surfaces	توپوگرافی-اقلیم r-c
	شاخص خیسگی ساگا SAGA Wetness Index	SWI	شاخص رطوبت توپوگرافی بر اساس حوضه آبریز اصلاح شده	توپوگرافی-اقلیم r-c
	شاخص جهت باد Wind Effect	WE	مناطق در معرض باد با توجه به جهت باد	توپوگرافی-اقلیم r-c
	شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness	MrVBF	اندازه‌گیری همواری و پستی Flatness and postural measurement	توپوگرافی r-c
سنجش از دور Remote sensing	شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده Normalized Differences Vegetation Index	NDVI	$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$	موجودات-خاک r-c

مجموعه داده‌ها

به صورت تصادفی ۸۰ درصد برای آموزش و ۲۰ درصد برای ارزیابی مدل‌ها تقسیم گردیدند. درجه اهمیت هریک از متغیرهای محیطی در مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده طبق تابع^۱ اهمیت متغیر (varImp^۲) در بسته caret انجام گردید. همچنین جهت حصول پایداری نتایج در برازش مدل‌ها از رویکرد ۱۰ گام ۱۰ تکرار استفاده گردید. نحوه دقیق عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی ویژگی‌های ذکر شده به شرح ذیل ارائه شده است:

جنگل تصادفی (RF)

جنگل تصادفی که توسط بریمن (Breiman, 2001) توسعه یافته است، یک روش یادگیری ماشین است که به طور گسترده برای طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. یک درخت تصمیم منفرد به دلیل واریانس و سوگیری بالای آن طبقه‌بندی و رگرسیون ضعیفی را ارائه می‌دهد. در حالی که RF تمایل به تولید مدل‌های قوی دارد زیرا می‌تواند مشکلات یاد شده را با استفاده از مجموعه‌ای از درختان کاهش دهد. RF هزاران درخت دوتایی تصادفی را برای ایجاد جنگل تصادفی تولید می‌کند. هر درخت براساس یک نمونه بوت استرپ، با استفاده از روش درختان طبقه‌بندی و رگرسیون^۳ (CART) با زیرمجموعه تصادفی از متغیرهای انتخاب شده در هر گره رشد می‌کند. برای هر درختی که بر روی یک نمونه بوت استرپ رشد می‌کند، نرخ خطای خارج از کیسه^۴ (OOB) با استفاده از مشاهدات خارج از بوت استرپ محاسبه

بر اساس تعریف ارائه شده در جدول ۱، SWI یکی از شاخص‌های ژئومورفومتری مستخرج از مدل رقومی ارتفاع می‌باشد و همانطور که از نامش مشخص است، شبیه به «شاخص خیسگی توپوگرافی» است، اما بر اساس یک حوضه آبریز اصلاح شده محاسبه می‌شود که به مقدار کمتری بیانگر میزان جریان می‌باشد. در نتیجه برای سلول‌های (پیکسل‌های) واقع در موقعیت‌های پست زمین‌نما با فاصله عمودی کم تا شبکه آبراهه یا کانال مجاور، رطوبت خاک را با پتانسیل واقعی‌تری در مقایسه با شاخص استاندارد خیسگی توپوگرافی محاسبه می‌نماید؛ که اینجا محل تفاوت دو شاخص خیسگی ساگا و شاخص خیسگی توپوگرافی می‌باشد، همانطور که در نرم‌افزار SAGA GIS این دو شاخص در دو ماژول مجزا تهیه می‌گردند. در رابطه روبه رو معادله ریاضی محاسبه شاخص خیسگی ساگا (SWI) ارائه شده است (Boehner et al., 2002).

$$SWI = \left(\frac{MSCA}{\tan \beta} \right)$$

در اینجا: SWI شاخص خیسگی ساگا، MSCA = حوضه آبخیز اصلاح شده و $\tan \beta$ تانژانت زاویه شیب بر حسب رادیان می‌باشد.

مدل‌سازی مکانی

چهار مدل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از بسته‌های تخصصی random Forest، svmKernlab، nnet، apart و caret و کد نویسی در نرم‌افزار R-studio نسخه ۴،۱،۱ برای پیش‌بینی توزیع مکانی EC و SOC در دو عمق سطحی و زیر سطحی مورد استفاده قرار گرفت. به طور کلی

3- Classification and Regression Tree
4- Out Of Bag

1- Function
2- Variable importance

کننده ماشین بردار پشتیبان و ب: مدل رگرسیون بردار پشتیبان. برای حل مسائل طبقه‌بندی داده‌ها در کلاس‌های مختلف از مدل ماشین بردار پشتیبان و برای حل مسائل پیش‌بینی از مدل SVR استفاده می‌شود. منظور از رگرسیون به دست آوردن ابر صفحه‌ای است که با داده‌های داده شده برازش می‌کند. فاصله از هر نقطه در این ابر صفحه نشان‌دهنده خطای آن نقطه خاص است (Shabani et al., 2020).

صحت‌سنجی

فرایند اعتبارسنجی مدل‌های تولید شده با استفاده از ۲۰٪ از کل داده‌ها، انجام گرفت. برای این منظور، مقادیر برآورد شده برای هر نمونه از زیرمجموعه‌ای مستقل تعیین شد. صحت مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) ، میانگین ریشه مربعات خطا $(RMSE)$ و میانگین ریشه مربعات خطای نرمال شده $(nRMSE)$ برآورد شد. رتبه‌بندی مقادیر ضریب تعیین (معادله ۱) برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک عبارت است از: خیلی خوب $(R^2 > 0.81)$ ، خوب $(R^2 = 0.61 - 0.81)$ ، متوسط $(R^2 = 0.41 - 0.6)$ و ضعیف $(R^2 < 0.4)$ (Rossel and McBratney, 2009). $RMSE$ یک معیار پرکاربرد برای تخمین تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط یک مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده است. همچنین $RMSE$ مقیاسی از اندازه خطا را برآورد می‌کند که به مقادیر پرت حساس است و توسط معادله ۲ محاسبه می‌شود. همچنین مقادیر $nRMSE$ (معادله ۳) کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده پیش‌بینی عالی، بین ۰/۱ و ۰/۲ خوب، بین ۰/۲ تا ۰/۳ متوسط و بیشتر از ۰/۳ ضعیف خواهد بود (Wallach et al., 2006).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{معادله ۱}$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}}{N} \quad \text{معادله ۲}$$

در اینجا $\hat{y}_i$ داده اندازه‌گیری شده و y_i مقدار پیش‌بینی شده است. همچنین $\bar{y}$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده و $\bar{\hat{y}}$ میانگین داده‌های پیش‌بینی شده است. همچنین N ، تعداد داده‌ها است (Batista et al., 2020).

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\text{Mean}} \quad \text{معادله ۳}$$

می‌شود. برای اجرای مدل RF کاربر باید دو پارامتر پیش‌بینی، تعداد درختان در جنگل (ntree) و تعداد متغیرهای قابل استفاده در انتهای هر گره (mtry) را بهینه کند تا خطای OOB را به حداقل برساند و عملکرد مدل خوبی را به دست آورد.

درخت تصمیم (DTr)

مدل درختی تصمیم‌گیری طبقه‌بندی، یک روش ناپارامتری است که قادر به پیش‌بینی متغیرهای کمی یا متغیرهای طبقه‌بندی شده بر اساس مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی کننده کمی و کیفی است. ایجاد درخت تصمیم شامل دو مرحله است. مرحله اول شامل ایجاد و رشد درخت با پیوند و انشعاب و مرحله دوم، مرحله توقف و هرس می‌باشد. هدف از مرحله دوم به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی است. فرایند طبقه‌بندی یک ویژگی از ریشه درخت شروع می‌شود، داده‌های آزمون ارزیابی شده و شاخه مناسب برای نتیجه انتخاب می‌شود و تا زمانی که یک برگ ظاهر شود این فرایند ادامه می‌یابد. با ظاهر شدن برگ ادعا می‌شود که آن ویژگی متعلق به کلاس نامگذاری شده توسط برگ است. روش درخت تصمیم برای طبقه‌بندی کاربری اراضی دارای مزایای قابل توجه است زیرا بین ویژگی‌ها و طبقات انعطاف‌پذیری و توانایی مدیریت روابط غیر خطی در این مدل وجود دارد، بنابراین دقت طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد (Osmani et al., 2018).

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی گروهی از الگوریتم‌های غیرخطی و مبتنی بر داده‌های عمومی هستند که پس از قرار گرفتن در معرض تغییرات ناگهانی پایدار می‌مانند و می‌توانند در محیط‌های غنی از داده، آموزش داده و تولید شوند (Esfandiarpour-Boroujeni et al., 2020). ساختارهای شبکه عصبی مصنوعی (ANN) از مجموعه‌های به هم پیوسته نورون‌ها تشکیل شده‌اند که همبستگی‌های غیرخطی بین هر متغیر را تخمین می‌زنند. متغیرهای محیطی به عنوان نورون‌های ورودی ابتدا به یک یا چند لایه از نورون‌های پنهان و سپس به نورون‌های خروجی که متغیر هدف خاک هستند متصل می‌شوند (Heung et al., 2016).

ماشین بردار پشتیبانی (SVM)

ماشین بردار پشتیبانی یکی از روش‌های یادگیری ماشین معرفی شده توسط بوسر و همکاران (Boser et al., 1992) است که براساس نظریه یادگیری آماری توسعه داده شده است. مدل‌های ماشین بردار پشتیبانی به دو پروه اصلی تقسیم می‌شوند. الف: مدل‌های طبقه‌بندی

جدول ۲- توصیف آماری شوری و کربن آلی در دو لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی متر) و زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی متر)

Table 2- Descriptive statistics of salinity and organic carbon in two surface (0-30 cm) and sub-surface (30-60 cm) layers					
ویژگی های خاک Soil properties	حد اقل Minimum	واحد Unit	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation
لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی متر) Top soil later (0-30 cm)					
هدایت الکتریکی (EC) Electrical conductivity (EC)	0.14	دسی زیمنس بر متر dS/m	151.11	6.05	17.02
کربن آلی خاک (SOC) Soil Organic Carbon (SOC)	0.11	درصد %	3.3	0.84	0.49
لایه زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی متر) Subsoil layer (30-60 cm)					
هدایت الکتریکی (EC) Electrical conductivity (EC)	0.08	دسی زیمنس بر متر dS/m	107.85	5.55	14.43
کربن آلی خاک (SOC) Soil Organic Carbon (SOC)	0.02	درصد %	2.09	0.4	0.29

نتایج

توصیف آماری

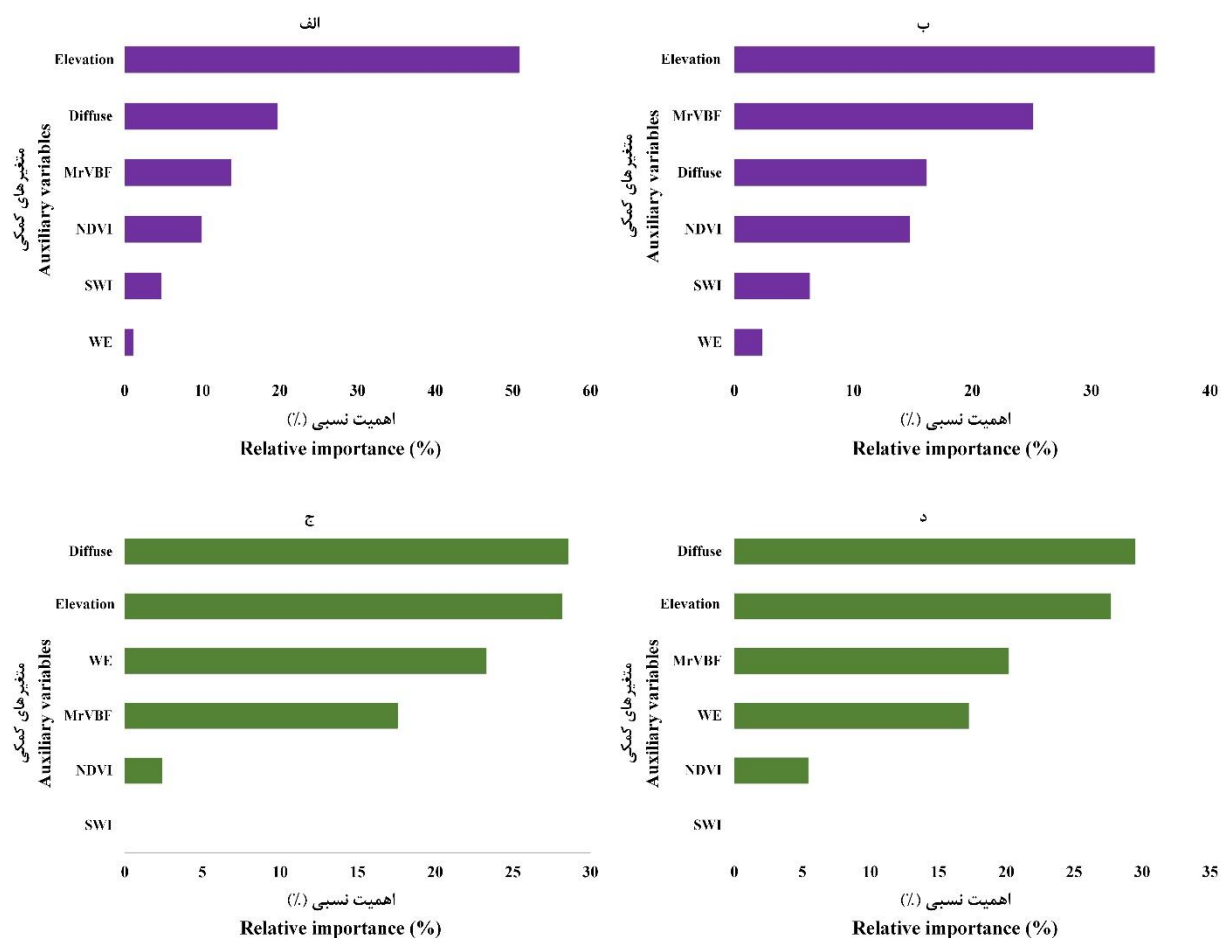
خلاصه آماری مقادیر سطحی و زیر سطحی EC و کربن آلی خاک در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر حداقل و حداکثر EC در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی نشان داد که منطقه مورد مطالعه دارای خاک های غیر شور تا بسیار شور تا عمق ۶۰ سانتی متری است. همچنین، میانگین مقادیر EC روند کاهشی را در شوری خاک با عمق از ۶/۰۵ به ۵/۵۵ دسی زیمنس بر متر از لایه سطحی به لایه زیر سطحی نشان داد. این یافته ها با نتایج فتحی زاده و همکاران (Fathizadeh et al., 2020) منطبق است. میانگین SOC از سطح به عمق به ترتیب برابر با ۰/۸۴ و ۰/۴ درصد است. این در حالی است که بیشترین مقدار SOC در لایه سطحی و برابر با ۳/۳ درصد مشاهده شد. براساس طبقه بندی ویلدرینگ (Wilding, 1984) کلاس تغییر پذیری EC و SOC در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی در کلاس حداکثر (بیش از ۳۵) قرار دارد. تغییر پذیری زیاد SOC و EC خاک نشان داد که خاک های منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر مدیریت، متغیرهای محیطی و تخریب قرار دارند (Mahmoudzadeh et al., 2020).

متغیرهای کمکی و اهمیت آن ها

اهمیت متغیرهای کمکی استفاده شده برای پیش بینی EC و SOC در لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی متر) و لایه زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی متر) در شکل ۳ نشان داده شده است. متغیر Elevation و Diffuse به عنوان پیش بینی کننده های مهم EC و SOC در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی تعیین شدند. متغیر ارتفاع ۵۰ و ۳۵ درصد و متغیر Diffuse ۱۹/۷ و ۲۵/۱ درصد از تغییرات EC (شکل ۳-الف و ۳-ب) را در لایه سطحی و زیر سطحی تبیین نمودند. متغیر Elevation

۲۸/۵۶ و ۲۹/۴۷ و متغیر Diffuse ۲۸/۱۵ و ۲۷/۶۷ درصد از تغییرات SOC (شکل ۳-ج و ۳-د) را در لایه سطحی و زیر سطحی را نشان دادند. همچنین MrVBF با ۱۹/۷ و ۲۰/۶ درصد اهمیت نسبی برای پیش بینی EC در لایه سطحی و زیر سطحی، سومین متغیر کمکی مهم بود. به طوری که مقادیر بالای EC در منطقه مورد مطالعه با مقادیر بالای MrVBF منطبق بود.

متغیرهای توپوگرافی به عنوان تاثیرگذارترین متغیرهای پیش بینی کننده برای پیش بینی هر دو متغیر EC و SOC در دو عمق سطحی و زیر سطحی مورد مطالعه شناسایی شدند. به طور کلی توپوگرافی یکی از مهمترین عوامل تشکیل خاک است و متغیرهای توپوگرافی مبتنی بر DEM معمولاً به عنوان پیش بینی کننده های کلیدی برای رقومی کردن نقشه های خاک استفاده می شوند. پستی و بلندی ها با کنترل جریان آب و رسوبگذاری به نوبه خود بر توسعه خاک و توزیع مکانی خواص خاک تاثیر می گذارند (Zhou et al., 2020). مطابق با یافته های تقی زاده و همکاران (Taghizadeh et al., 2021) متغیرهای DEM و MrVBF مهمترین متغیرهای کمکی در پیش بینی EC خاک سطحی و زیر سطحی شناسایی شدند (شکل ۴). ژو و همکاران (Zhou et al., 2020) نیز در مطالعه خود اعلام کردند که متغیرهای توپوگرافی دارای همبستگی بیشتری نسبت به سایر متغیرهای کمکی مورد استفاده با محتوای SOC و نیتروژن خاک داشتند. ژو و همکاران (Zhou et al., 2019) نیز تاکید کردند که متغیرهای توپوگرافی به عنوان مهم ترین متغیرهای پیش بینی کننده SOC در یک منطقه در یک بازه زمانی بیست ساله شناسایی شدند. در همین راستا محمودزاده و همکاران (Mahmoudzadeh et al., 2020) نیز نتایج مشابهی را در پیش بینی SOC در غرب ایران گزارش نمودند.



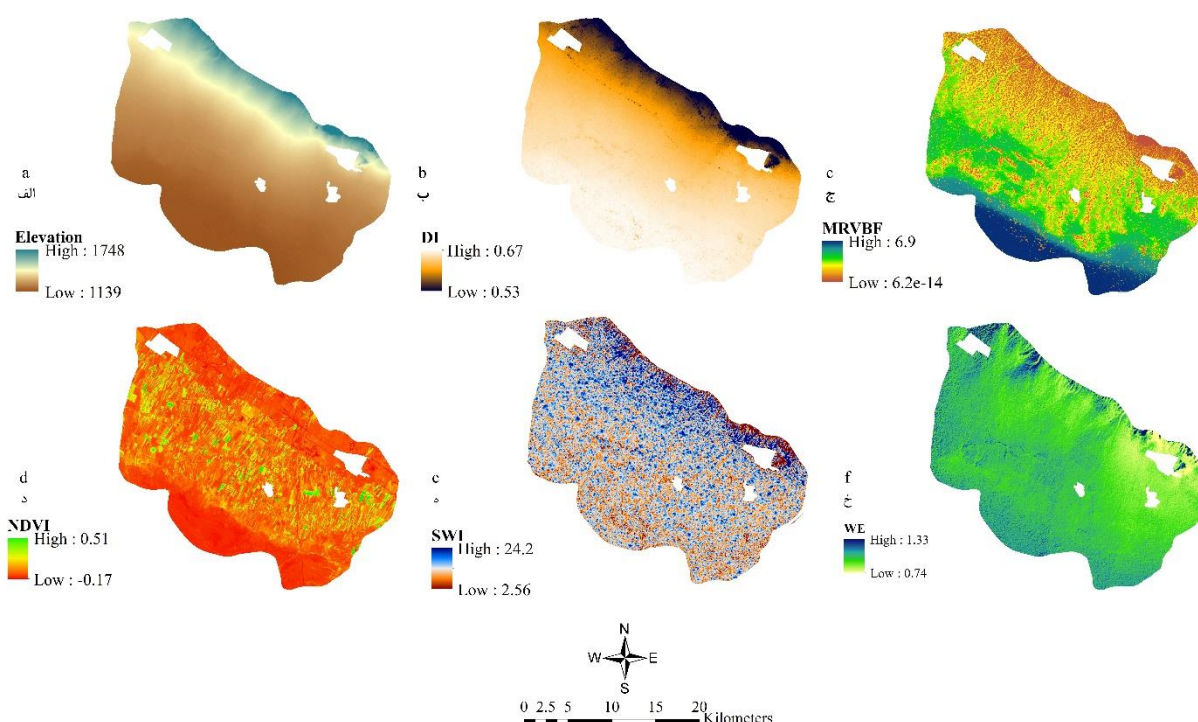
شکل ۳- اهمیت نسبی متغیرهای کمکی برای پیش‌بینی الف: EC لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) براساس مدل RF، ب: EC لایه زیرسطحی (۳۰-۶۰ سانتی‌متر) براساس مدل RF، ج: SOC لایه سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) براساس مدل RF، د: SOC لایه زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی‌متر) براساس مدل RF

Figure 3- The relative importance of auxiliary variables for predicting a: EC of the top layer (0-30 cm) based on the RF model, b: EC of the sub soil layer (30-60 cm) based on the RF model, c: SOC of the top soil layer (0-30 cm) based on the RF model, d: SOC of the sub soil layer (30-60 cm) based on the RF model

را برای پیش‌بینی EC داشت. به‌طور کلی هر دو مدل RF و DTr با R^2 بیش از ۰/۷ در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی دارای صحت خیلی خوب برای پیش‌بینی EC بودند. مدل ANN با R^2 ۰/۶۴ و ۰/۶۸ برای لایه‌های سطحی و زیر سطحی دارای عملکرد خوب برای پیش‌بینی EC بود و مدل SVR عملکرد متوسط داشت. همچنین نتایج پیش‌بینی SOC خاک در اعماق مورد مطالعه بیانگر این است که مدل RF در پیش‌بینی کربن آلی خاک در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی دارای بیشترین صحت با مقادیر R^2 برابر با ۰/۸۹ و ۰/۹ و RMSE برابر با ۰/۱ و ۰/۳ بود. با توجه به راسل و مک‌برتنی (Rossel and McBratney, 2009) سایر مدل‌ها با R^2 کمتر از ۰/۴ عملکرد ضعیفی در پیش‌بینی کربن آلی خاک داشتند.

ارزیابی عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین

عملکرد چهار مدل RF، ANN، DTr و SVR با استفاده از متغیرهای کمکی منتخب برای پیش‌بینی EC و SOC در دو لایه سطحی و زیر سطحی (۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر) با استفاده از شاخص‌های ارزیابی R^2 ، RMSE و nRMSE در جدول ۳ ارائه شده است. نتایج پیش‌بینی EC در لایه سطحی نشان داد که مدل RF و DTr دارای بیشترین میزان صحت با مقادیر R^2 به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۲ و RMSE به ترتیب برابر با ۰/۳۶ و ۰/۸۲ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند. این در حالی است که در لایه زیر سطحی مدل DTr با مقادیر R^2 و RMSE برابر با ۰/۷۷ و ۰/۹ دسی‌زیمنس بر متر بیشترین صحت



شکل ۴- توزیع مکانی متغیرهای کمکی انتخاب شده الف: ارتفاع، ب: تابش پخشیده، ج: شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا، د: شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال شده، ه: شاخص خیزی ساگا، خ: شاخص اثر باد

Figure 4- Spatial distribution of selected auxiliary variables a: Elevation, b: Diffuse Insolation, c: Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness, d: Normalized Differences Vegetation Index, e: SAGA Wetness Index, and f: Wind Effect

مکانی هدایت الکتریکی است.

مطابق با نتایج مطالعه حاضر، در مطالعه‌ای که توسط گومز و همکاران (Gomes et al., 2020) برای پیش‌بینی محتوای SOC انجام شد نتایج تایید کردند که مدل RF در هر پنج عمق مورد مطالعه نسبت به سایر الگوریتم‌های مورد بررسی شامل (کوپیست، GLMB، SVR) بالاترین مقدار ضریب تعیین و کمترین خطا را داشته است. مقایسه دو مدل RF و SVR برای پیش‌بینی EC توسط وو و همکاران (Wu et al., 2018) نشان داد که مدل RF با R^2 بالاتر و RMSE کمتر دارای صحت بیشتری برای پیش‌بینی EC خاک است. برخلاف نتایج مطالعه حاضر که نشان می‌دهد پیش‌بینی ویژگی‌های EC و SOC توسط هر چهار مدل یادگیری ماشین RF، DTr، SVR و ANN در لایه زیر سطحی دارای صحت بیشتر و خطای کمتر است، نتایج مطالعه دی آنتا و همکاران (de Anta et al., 2020) نشان داد که پیش‌بینی SOC توسط مدل RF در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری دارای صحت بیشتری نسبت به عمق ۰-۵۰ سانتی‌متری بود. با همچنین نتایج مشابهی توسط نبی‌اللهی و همکاران (Nabiollahi et al., 2017) و ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) گزارش شد.

مقایسه میانگین انحراف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده برحسب درصد (nRMSE) برای ویژگی‌های EC و SOC نشان می‌دهد که مقادیر nRMSE محاسبه شده توسط مدل RF نسبت به سایر مدل‌ها کمتر است. بنابراین پیش‌بینی EC خاک در لایه سطحی و SOC در لایه زیر سطحی با nRMSE برابر با ۰/۰۷ با درجه دقت عالی و پیش‌بینی توزیع EC در لایه زیر سطحی و SOC در لایه سطحی با درجه دقت خوب انجام شده است (Wallach et al., 2006). هنگل و همکاران (Hengle et al., 2004) بیان کردند که nRMSE بیش از ۰/۷ دقت پیش‌بینی غیرقابل قبولی دارد. بنابراین R^2 دو محدودیت اصلی دارد که نمی‌تواند سوگیری پیش‌بینی‌های ضرایب و همچنین قابلیت اعتماد مدل رگرسیون را تعیین. به‌عنوان مثال با وجود چند نقطه تاثیرگذار یا پرت، R^2 ممکن است برای مدلی با مقادیر خطای کوچک (مدل‌های مناسب) کم و یا برای مدلی با مقادیر خطای بزرگ (مدل‌های برازش ضعیف) زیاد محاسبه شود (Khaledian and Miller, 2020). ماشالا و همکاران (Mashalaba et al., 2020) گزارش کردند که صحت پیش‌بینی مدل RF در عمق زیر سطحی با nRMSE برابر با ۱۶٪ بیشتر از عمق سطحی برای پیش‌بینی توزیع

جدول ۳- نتایج اعتبار سنجی پیش‌بینی مکانی شوری و کربن آلی خاک با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین
Table3- Validation results of spatial prediction of soil salinity and organic carbon using machine learning models

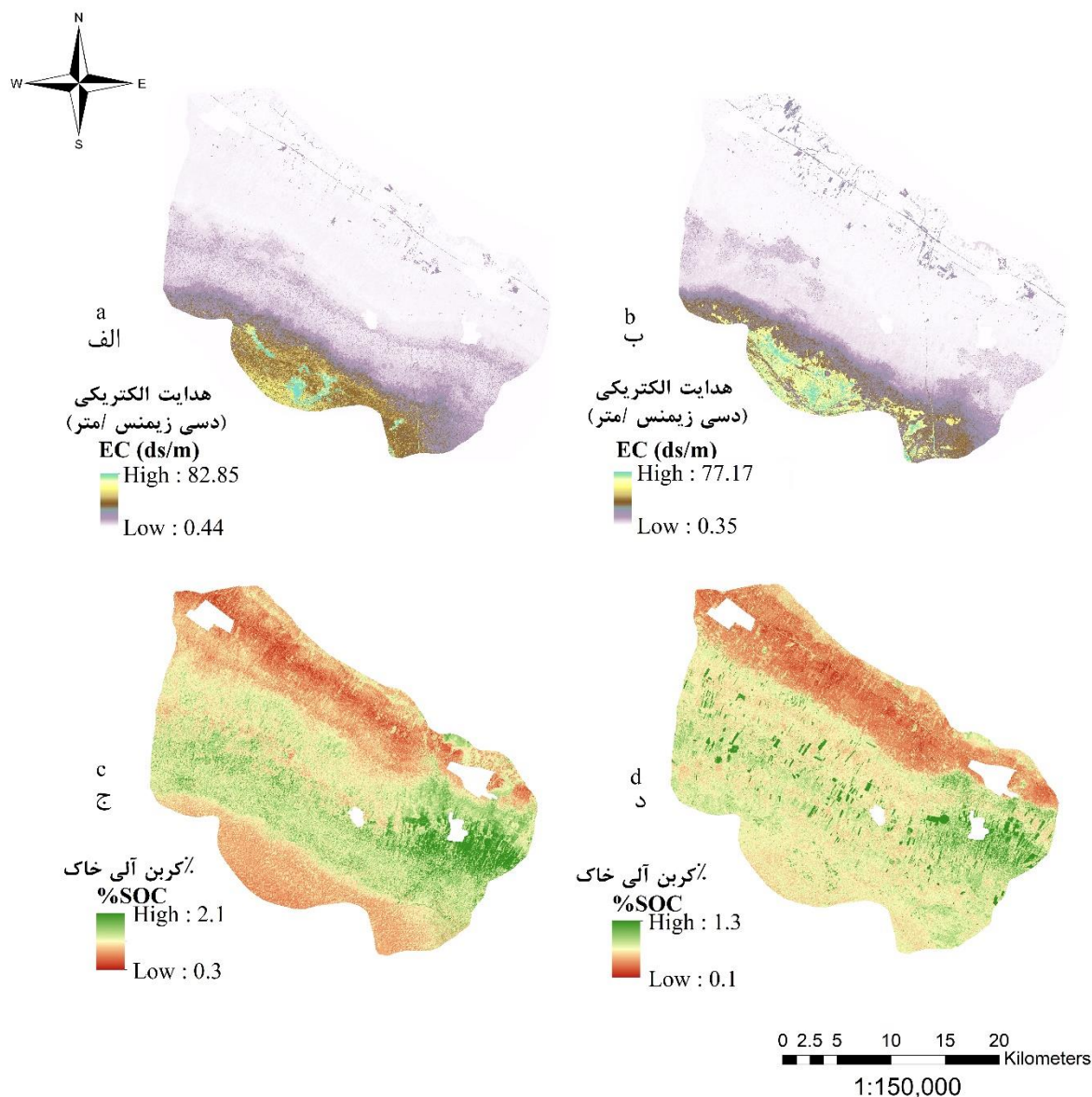
ویژگی خاک Soil Properties		هدایت الکتریکی EC		کربن آلی SOC	
مدل یادگیری ماشین ML model	عمق Depth	۳۰-۰ 0-30	۶۰-۳۰ 30-60	۳۰-۰ 0-30	۶۰-۳۰ 30-60
جنگل تصادفی RF	R ²	0.74	0.75	0.9	0.8
	RMSE	0.36	0.4	0.1	0.3
	nRMSE	0.7	0.19	0.12	0.7
درخت تصمیم DTr	R ²	0.72	0.77	0.34	0.44
	RMSE	0.82	0.9	0.21	0.35
	nRMSE	0.15	0.17	0.25	0.81
شبکه عصبی مصنوعی ANN	R ²	0.64	0.68	0.24	0.47
	RMSE	0.1	0.11	0.73	0.33
	nRMSE	0.34	0.6	0.35	0.78
ماشین بردار پشتیبان SVR	R ²	0.4	0.45	0.22	0.32
	RMSE	0.16	1.36	0.81	0.31
	nRMSE	0.35	0.21	0.42	0.95

ارتفاع بیشتر (دارای واحدهای فیزیوگرافی تپه و فلات) و در قسمت مرکز و جنوب ارتفاع کم است بنابراین در قسمت با ارتفاع کمتر میزان EC بیشتر است. به‌طوری‌که در ارتفاعات (۱۷۴۸ متر) مقدار EC تا مقدار کمتر از ۱ (dS/m) و در ارتفاعات کم شامل اراضی پست با سطح آب زیرزمینی بالا (۱۱۳۹ متر) مقدار EC به بیش از ۸۰ (dS/m) نیز می‌رسد که با مشاهدات میدانی و وضعیت واحدهای فیزیوگرافی منطقه منطبق می‌باشد. همچنین در قسمت شمال شرق، شرق و مرکز منطقه مورد مطالعه بیشترین محتوای SOC مشاهده شد که به علت وجود کاربری کشت آبی، دیم و همچنین وجود مراتع غیر شور می‌باشد در حالی‌که در قسمت جنوب و جنوب شرق، به علت وجود دشت‌های شور و عدم وجود پوشش گیاهی، SOC کاهش یافته است. به طور کلی SOC در لایه سطحی تجمع یافته و با افزایش عمق خاک از میزان آن کاسته می‌شود که موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2022) و Fu et al., 2021) و همکاران (Fu et al., 2021) نیز نتایج مشابهی را گزارش کردند. به نظر می‌رسد در منطقه مورد مطالعه وجود رژیم‌های حرارتی ترمیک و رطوبتی آکوئیک سبب برقرار شدن جریان موئینگی شده و املاح محلول از عمق به سطح به خصوص در فصول خشک سال انتقال می‌یابند (Mousavi et al., 2021).

بیشترین تغییرات R² برای پیش‌بینی EC و SOC در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی توسط مدل RF برابر با ۱٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده تنوع کم در پیش‌بینی است. نتایج این مطالعه تأیید می‌کند که مدل RF یک الگوریتم یادگیری ماشین قدرتمند برای پیش‌بینی است که با نتایج ناوار و معز (Nawar and Mouaze, 2017) مطابقت دارد.

تغییر پذیری مکانی EC و SOC

حداقل و حداکثر EC در لایه سطحی به ترتیب ۰/۴۴ و ۸۲/۸۵ (شکل ۵-الف) و در لایه زیر سطحی به ترتیب ۰/۳۵ و ۷۷/۱۷ (شکل ۵-ب) دسی زیمنس بر متر مشاهده گردید. در بخش‌های شمالی، شمال شرق و شمال غرب به سمت مرکز منطقه مورد مطالعه میزان EC کم بوده و بیشترین مقدار خطر و محدودیت شوری در مناطق جنوب و جنوب شرقی پیش‌بینی شد. بیشترین و کمترین مقدار SOC پیش‌بینی شده در لایه سطحی ۰/۳ و ۲/۱ (شکل ۵-ج) و زیر سطحی به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۱/۳ (شکل ۵-د) درصد مشاهده گردید. با توجه به شکل ۴-الف و ۵-الف و ۵-ب در منطقه مورد مطالعه بین تغییرات ارتفاعی و مقادیر EC پیش‌بینی شده روند عکسی وجود داشت. با توجه به تشریح واحدهای فیزیوگرافی در بخش مواد و روش‌ها قسمت شمال منطقه



شکل ۵- توزیع مکانی الف: EC در لایه سطحی با استفاده از مدل RF، ب: EC در لایه زیر سطحی با استفاده از مدل RF، ج: SOC در لایه سطحی با استفاده از مدل RF، د: SOC در لایه زیر سطحی با استفاده از مدل RF

Figure 5- Spatial distribution a: EC in the top soil layer using the RF model, b: EC in the sub soil layer using the RF model, c: SOC in the top soil layer using the RF model, d: SOC in the sub soil layer using the RF model

نتیجه گیری

متغیرهای پیش‌بینی کننده EC و SOC در هر دو لایه سطحی و زیرسطحی بودند. که این نتیجه بیانگر این است که در منطقه مورد مطالعه متغیرهای کمکی که نماینده تغییرات توپوگرافی در منطقه مطالعاتی هستند نسبت به شاخص‌های سنجش از دور از پیش‌ران‌های قوی‌تری برای پیش‌بینی این دو ویژگی مورد مطالعه (EC و SOC) بودند.

دو مدل یادگیری ماشین RF و DTr نسبت به مدل‌های ANN و

این تحقیق با هدف بررسی تغییرات مکانی سطحی (۰-۳۰ سانتی-متری) و زیر سطحی (۳۰-۶۰ سانتی-متری) EC و SOC توسط چهار مدل یادگیری ماشین (RF, SVR, ANN, DTr) در دشت قزوین انجام شد. از میان شش متغیر کمکی توپوگرافی و سنجش از دور مورد استفاده، پارامترهای Diffuse، elevation، و MrVBF مهمترین

اراضی این منطقه برای کشت محصولات موجود در الگوی کشت منطقه نسبت به سایر بخش‌های منطقه باشد. در پایان از دیدگاه کاربردی نقشه‌های EC و SOC تهیه شده در این مطالعه می‌تواند به عنوان اطلاعات پایه برای کاهش اثرات منفی شوری خاک و همچنین اتخاذ تصمیمات مدیریتی برای افزایش بهره‌وری توان حاصلخیزی خاک‌ها در اراضی مورد مطالعه قرار گیرد.

SVR نتایج دقیق‌تری را در تهیه نقشه پیش‌بینی مکانی EC و SOC در هر دو لایه سطحی و زیر سطحی داشتند. همچنین نتایج پراکنش مکانی EC نشان داد که بخش جنوب و جنوب شرق منطقه هم در سطح و هم در عمق دارای شوری بسیار زیاد بوده که محدودیت جدی برای کلیه کاربری‌های زراعی و باغی در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این در حالی است که مقدار SOC در شرق و مرکز منطقه مورد مطالعه تجمع بیشتری دارد و این نتیجه می‌تواند بیانگر وجود تناسب بالاتر

منابع

1. Abd El-Aziz, S.H., Gameh, M.A., & Ghallab, A. (2018). Applications of geographic information systems in studying changes in groundwater quality and soil salinity in Sohag Governorate. *Eurasian Journal of Soil Science*, 7(3), 213-223. <https://doi.org/10.18393/ejss.416675>.
2. Abd-Elmabod, S.K., Fitch, A.C., Zhang, Z., Ali, R.R., & Jones, L. (2019). Rapid urbanisation threatens fertile agricultural land and soil carbon in the Nile delta. *Journal of Environmental Management*, 252, 109668. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109668>
3. Ardakani, M.A., & Vahdati, A.R. (2018). Monitoring of organic matter and soil salinity by using IRS-LissIII satellite data in the Harat plain, of Yazd province. *Desert* 23(1): 1-8
4. Avlivakulov, M.A., Kumari, M., Rajabov, N.Q., & Durdiev, N.K. (2020). Characterization of soil salinity and its impact on wheat crop using space-borne hyperspectral data. *Geoinformation Support of Sustainable Development of Territories*, 26(Part 3), 271-285.
5. Batista, F. (2020). Geostatistical analysis of soil properties of the karstic sub-horizontal plain of the Yucatan Peninsula. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24, 09.
6. Boehner, J., Koethe, R., Conrad, O., Gross, J., Ringeler, A., & Selige, T. (2002): *Soil regionalisation by means of Terrain analysis and process parameterisation*. In: Micheli, E., Nachtergaele, F., Montanarella, L. [Ed.]: *Soil Classification 2001*. European Soil Bureau, Research Report No. 7, EUR 20398 EN, Luxembourg. pp.213-222.
7. Boser, B.E., Guyon, I.M., & Vapnik, V.N. (1992). *A training algorithm for optimal margin classifiers*. In *Proceedings of the Fifth Annual Workshop on Computational Learning Theory*, Association for Computing Machinery, pp. 144-152.
8. Breiman, L. (2001). Random forests: *Machine Learning* 45(1): 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
9. Corwin, D.L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862. <https://doi.org/10.1111/ejss.13010>
10. de Anta, R.C., Luís, E., Febrero-Bande, M., Galiñanes, J., Macías, F., Ortíz, R., & Casás, F. (2020). Soil organic carbon in peninsular Spain: influence of environmental factors and spatial distribution. *Geoderma*, 370, 114365.
11. Esfandiarpour-Boroujeni, I., Shahini-Shamsabadi, M., Shirani, H., Mosleh, Z., Bagheri-Bodaghabadi, M., & Salehi, M.H. (2020). Assessment of different digital soil mapping methods for prediction of soil classes in the Shahrekord plain, Central Iran. *Catena*, 193, 104648
12. FAO and ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture 439 Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
13. Fathizad, H., Ali Hakimzadeh Ardakani, M., Sodaiezhadeh, H., Kerry, R., & Taghizadeh Mehrjardi, R. (2020). Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forests in the central desert of Iran. *Geoderma*, 365, 114233.
14. Fu, T., Gao, H., & Liu, J. (2021). Comparison of different interpolation methods for prediction of soil salinity in arid irrigation region in northern China. *Agronomy* 11(8): 1535. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081535>
15. Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M., & Borůvka, L. (2018). Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment* 218: 89-103. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.015>
16. Gomes, L.C., Faria, R. M., de Souza, E., Veloso, G.V., Schaefer, C.E.G., & Fernandes Filho, E.I. (2019). Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, 340, 337-350. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.007>.
17. Halima, O.I., Azzouzi, M.E., Douaïk, A., Azim, K., & Zouahri, A. (2019). Organic and inorganic remediation of soils affected by salinity in the Sebkh of Sed El Mesjoune–Marrakech (Morocco). *Soil and Tillage Research*, 193, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.06.003>.
18. Hamzehpour, N., Shafizadeh-Moghadam, H., & Valavi, R. (2019). Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture. *Catena*, 182, 104141. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104141>

19. Hassani, A., Azapagic, A., & Shokri, N. (2020). Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 33017-33027. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013771117>
20. 17-Hengl, T., Heuvelink, G.B.M., & Stein, A. (2004). A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120, 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.08.018>
21. Heung, B., Ho, H.C., Zhang, J., Knudby, A., Bulmer, C.E., Schmidt, M.G. (2016). An overview and comparison of machine-learning techniques for classification purposes in digital soil mapping. *Geoderma* 265: 62-77. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.014>
22. Holmquist, J. R., Windham-Myers, L., Bliss, N., Crooks, S., Morris, J.T., Megonigal, J. P., & Woodrey, M. (2018). Accuracy and precision of tidal wetland soil carbon mapping in the conterminous United States. *Scientific Reports*, 8(1), 1-16. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26948-7>
23. Jackson, M.L. (1967). *Soil Chemical Analysis*—Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ, USA.
24. Khamoshi, S. E., Sarmadian, F., & Keshavarzi, A. (2018). Digital soil mapping using random forests model in Abyek, Qazvin province. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(3).
25. Khaledian, Y., & Miller, B.A. (2020). Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping. *Appl. Math Model* 81: 401–418. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.12.016>.
26. Khazaie, E., Bostani, A. A., & Davatgar, N. (2017). Geostatic and GIS evaluation of spatial variability of nitrogen, phosphorus, potassium, and cation exchange capacity in agro-industrial land of Sharif Abad in Qazvin. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(2), 195-213. <http://doi.org/10.22092/ijsr.2017.11310>.
27. Lamichhane, S., Kumar, L., & Wilson, B. (2019). Digital soil mapping algorithms and covariates for soil organic carbon mapping and their implications: A review. *Geoderma*, 352, 395-413. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.031>
28. Ma, G., Ding, J., Han, L., Zhang, Z., & Ran, S. (2021). Digital mapping of soil salinization based on Sentinel-1 and Sentinel-2 data combined with machine learning algorithms. *Regional Sustainability*, 2(2), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2021.06.001>
29. Mahmoudzadeh, H., Matinfar, H. R., Taghizadeh-Mehrjardi, R., & Kerry, R. (2020). Spatial prediction of soil organic carbon using machine learning techniques in western Iran. *Geoderma Regional*, 21, e00260. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00260>
30. Mashalaba, L., Galleguillos, M., Seguel, O., & Olivares, J. (2020). Predicting spatial variability of selected soil properties using digital soil mapping in a rainfed vineyard of central Chile. *Geoderma Regional*, 22, e00289 <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00289>
31. McBratney, A., Santos, M.M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117, 3–52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
32. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2021). Digital modeling of three-dimensional soil salinity variation using machine learning algorithms in arid and semi-arid lands of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(7), 1915-1929. (In Persian with English abstract)
33. Mousavi, S. R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2022). Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706. (In Persian with English abstract)
34. Nabiollahi, K., Eskandari, S., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Kerry, R., & Triantafyllis, J. (2019). Assessing soil organic carbon stocks under land-use change scenarios using random forest models. *Carbon Management*, 10(1), 63-77. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>
35. Nawar, S., & Mouazen, A.M. (2017). Comparison between random forests, artificial neural networks and gradient boosted machines methods of on-line Vis-NIR spectroscopy measurements of soil total nitrogen and total carbon. *Sensors*, 17(10), 2428. <https://doi.org/10.3390/s17102428>
36. Osmani, M., Osmani, F., & Pourhoseingholi, M.A. (2019). Comparison of decision tree and logistic regression for prediction of functional dyspepsia and gastroesophageal reflux disease in tehran province using rome iii. *Modern Care Journal*, 16(4).
37. Rahmani, A., Sarmadian, F., & Arefi, H. (2022). Digital mapping of top-soil thickness and associated uncertainty using machine learning approach in some part of arid and semi-arid lands of Qazvin Plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(3), 585-602. (In Persian with English abstract)
38. Rhoades, J.D. (1982). Cation exchangeable capacity. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph*, 9, 149–157.
39. Rossel, R.A.V. & McBratney, A.B. (2009). Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In: *Digital soil mapping with limited data*.
40. Shabani, S., Samadianfard, S., Sattari, M. T., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kmet, T., & Várkonyi-Kóczy, A.R. (2020). Modeling pan evaporation using Gaussian process regression K-nearest neighbors' random forest and support vector machines; comparative analysis. *Atmosphere*, 11(1), 66. <https://doi.org/10.3390/atmos11010066>
41. Swileam, G.S., Shahin, R.R., Nasr, H.M., & Essa, K.S. (2019). Assessment of soil variability using electrical

- resistivity technique for normal alluvial soils, Egypt. *Plant Archives*, 19(1), 905-912.
42. Taati, A., Sarmadian, F., Motaghian, H., & Mousavi, S.R. (2020). Mapping Features of Surface and Depth, Soil Profiles by Using Geostatistical Techniques in Part of Qazvin Plain. *Human & Environment*, 18(1), 67-81.
43. Taghadosi, M.M., Hasanlou, M., & Eftekhari, K. (2019). Soil salinity mapping using dual-polarized SAR Sentinel-1 imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 40(1), 237-252. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1512767>
44. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., & Scholten, T. (2021). Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. *Geoderma*, 383, 114793. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114793>
45. Tripathi, A., & Tiwari, R.K. (2021). A simplified subsurface soil salinity estimation using synergy of SENTINEL-1 SAR and SENTINEL-2 multispectral satellite data, for early stages of wheat crop growth in Rupnagar, Punjab, India. *Land Degradation & Development*, 32(14), 3905-3919. <https://doi.org/10.1002/ldr.4009>
46. Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., & Brun, F. (2006). *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications*. Elsevier.
47. Wang, J., Peng, J., Li, H., Yin, C., Liu, W., Wang, T., & Zhang, H. (2021). Soil salinity mapping using machine learning algorithms with the sentinel-2 MSI in Arid Areas, China. *Remote Sensing*, 13(2), 305. <https://doi.org/10.3390/rs13020305>
48. Wilding, L.P. (1985). *Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys*. In: Soil Spatial Variability, Las Vegas NV, pp. 166-194.
49. Wu, W., Zucca, C., Muhaimeed, A. S., Al-Shafie, W. M., Fadhil Al-Quraishi, A. M., Nangia, V., & Liu, G. (2018). Soil salinity prediction and mapping by machine learning regression in Central Mesopotamia, Iraq. *Land Degradation & Development*, 29(11), 4005-4014. <https://doi.org/10.1002/ldr.3148>
50. Zhang, H., Wu, P., Yin, A., Yang, X., Zhang, M., & Gao, C. (2017). Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of eastern China: A comparison of multiple linear regressions and the random forest model. *Science of the Total Environment*, 592, 704-713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.146>
51. Zhao, C., Zhang, H., Song, C., Zhu, J.K., & Shabala, S. (2020). Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. *The Innovation* 1(1): 100017. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2020.100017>
52. Zhou, T., Geng, Y., Chen, J., Pan, J., Haase, D., & Lausch, A. (2020). High-resolution digital mapping of soil organic carbon and soil total nitrogen using DEM derivatives, Sentinel-1 and Sentinel-2 data based on machine learning algorithms. *Science of The Total Environment*, 729, 138244. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138244>
53. Zhou, Y., Hartemink, A.E., Shi, Z., Liang, Z., & Lu, Y. (2019). Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China. *Science of the Total Environment*, 647, 1230-1238. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.016>
54. Žížala, D., Minařík, R., & Zádorová, T. (2019). Soil organic carbon mapping using multispectral remote sensing data: Prediction ability of data with different spatial and spectral resolutions. *Remote Sensing*, 11(24), 2947. <https://doi.org/10.3390/rs11242947>.



Effect of Nitrohumic Acid Application on Some Morphological and Physiological Characteristics of Savory Plant (*Satureja hortensis* L.)

M. Mirzaei Varoei^{1*}, Sh. Oustan², A. Reyhanitabar³, N. Najafi⁴

Received: 16-01-2023

Revised: 15-02-2023

Accepted: 25-02-2023

Available Online: 25-02-2023

How to cite this article:

Mirzaei Varoei, M., Oustan, Sh., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2023). Effect of nitrohumic acid application on some morphological and physiological characteristics of savory plant (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Water and Soil*, 37(2), 333-352. (In Persian with English abstract).
<http://doi.org/10.22067/jsw.2023.80642.1244>

Introduction

Savory is considered one of the most important medicinal plants, which is used in various food and medical industries. Nitrogen (N) plays a major role on the growth and yield of medicinal plants. Therefore, an adequate supply of N is required for successful production of savory. However, the application of chemical N fertilizers is associated with many obstacles such as groundwater pollution, N enrichment of surface waters, and drop in the quality of plants. Accordingly, nowadays, great attention has been paid to organic fertilizers. In this regard, humic acid-based fertilizers have shown promising results. Humic acids (HAs) could be converted into nitrohumic acids (NHAs) through the nitration process, in which nitro groups (NO₂) are located on the aromatic rings. This process increases the N content of the HA. Thus, NHAs can be used as organic N fertilizers in the cultivation of medicinal plants whose organic production is a priority. However, the effects of these types of fertilizers on plant growth and physiological characteristics have not been well understood. Accordingly, the present study for the first time investigates the effectiveness of NHA on the morphological and physiological characteristics of savory, as well as N loss through leaching.

Materials and Methods

In the current study, HA was initially extracted from leonardite (purchased from Yazd Golsang Kavir Company) as a rich source of HA. Then, NHA was prepared through the nitration process using nitric acid (50% by volume). After that, using FT-IR (Fourier transform infrared spectroscopy) and CHNS analysis the extracted HA and NHA were characterized, and their N content was determined. Afterward a greenhouse experiment in a completely randomized design (CRD) with three replications was conducted to determine the effects of 16 treatments, including control (without urea, HA and NHA), urea (U₁, U₂ and U₃), humic acid (HA₁, HA₂ and HA₃), nitrohumic acid (NHA₁, NHA₂ and NHA₃), urea-humic acid (U₁HA₁, U₂HA₂ and U₃HA₃), and urea-nitrohumic acid (U₁NHA₁, U₂NHA₂ and U₃NHA₃) on the morphological and physiological characteristics of savory plant. The treatment levels were determined as 40, 80, and 120 mg N kg⁻¹ for the first, second and third level of the treatments, respectively. In the combined treatments of urea and HA or NHA, an equal fraction of the total nitrogen (N) was applied. At the end of the experiment, standard methods were used to assess various characteristics, including root length, leaf area, plant height, root volume, wet and dry weights of shoot and root, leaf chlorophyll index, concentrations of phosphorus, potassium, nitrogen, nitrate, and nitrate reductase in both the shoot and root. Additionally, leaching was conducted on specific days during the experiment, and the leachate was collected for nitrate measurement.

Results and Discussion

The results showed that using the nitration process, some characteristics of the NHA such as total acidity, the content of carboxylic and phenolic groups as well as N content improved as compared to the initial HA. Moreover, the results indicated that most of the morphological and physiological traits of savory plants, including leaf area,

1, 2, 3 and 4- Ph.D Candidate and Professors, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mansourmirzaei63@gmail.com)

DOI: [10.22067/jsw.2023.80642.1244](http://doi.org/10.22067/jsw.2023.80642.1244)

plant height, root length, fresh and dry weights of root and shoot as well as chlorophyll index, and the concentration of nitrogen, phosphorous, potassium, nitrate and nitrate reductase enzyme were significantly higher in the NHA treatments than those of HA. In addition, the highest shoot dry weight was obtained in the combined treatments of U_3NHA_3 and U_3HA_3 as well as in the U_3 treatment alone. The average rate of nitrate concentration increase in the U treatments was 1.77 times higher than the UNHA treatments. According to the results, U_3 treatment indicated the highest nitrate loss which by using the U_3NHA_3 treatment, the mean concentration of nitrate in the leachate decreased by about 40.5% as compared to the U_3 treatment.

Conclusion

The findings of this research revealed that most of the morphological and physiological traits of savory plant showed better responses to the combined treatments of U_3NHA_3 and U_3HA_3 as well as to the U_3 treatment alone. However, with regard to the lower accumulation of nitrate in the shoot of savory as well as to the lower nitrate leaching, the combined treatments were preferred. Accordingly, NHA can be a alternative nitrogen source in increasing the yield and growth indicators of savory. However, the reasons behind the fact of the better performance of combined nitrogen treatments than the individual ones require more research in the future.

Keywords: Combined treatment, Leonardite, Nitrate leaching, Nitrate reductase enzyme, Urea

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۲، ص. ۳۳۳-۳۵۲

تأثیر کاربرد نیترو هیومیک اسید بر برخی ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزه (*Satureja hortensis* L.)

منصور میرزایی و رویی^{۱*} - شاهین اوستان^۲ - عادل ریحانی تبار^۳ - نصرت‌اله نجفی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

چکیده

مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن دار مشکلات عدیده‌ای همچون آلودگی آب‌های زیرزمینی، غنی شدن آب‌های سطحی و کاهش کیفیت گیاهان دارویی را به همراه دارد. در پژوهش حاضر، تأثیر هیومیک اسید نیتروژن دار شده با نیترو هیومیک اسید (NHA) بر رشد و ترکیب عنصری گیاه مرزه و نیز هدررفت نیتروژن بررسی شد. برای این منظور، NHA از واکنش نیتریک اسید با هیومیک اسید (HA) استخراج شده از لئوناردیت شرکت گل‌سنگ کویر یزد تهیه شد و ویژگی‌های آن با استفاده از روش طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) و درصد نیتروژن آن به روش آنالیز CHNS تعیین گردید. سپس، یک آزمایش گلخانه‌ای با کشت گیاه مرزه در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۶ تیمار شامل شاهد (بدون مصرف اوره، HA و NHA)، اوره (U_1 ، U_2 و U_3)، هیومیک اسید (HA_1 ، HA_2 و HA_3)، اوره-هیومیک اسید (U_1HA_1 ، U_2HA_2 و U_3HA_3)، نیترو هیومیک اسید (NHA_1 ، NHA_2 و NHA_3) و اوره-نیترو هیومیک اسید (U_1NHA_1 ، U_2NHA_2 و U_3NHA_3) در ۳ تکرار انجام شد. سطوح تیمارها به میزان 40 mg N kg^{-1} برای سطح اول، 80 mg N kg^{-1} برای سطح دوم و 120 mg N kg^{-1} برای سطح سوم تعیین شد و در تیمارهای مخلوط، سهم برابری از نیتروژن برای اوره و HA و یا اوره و NHA در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که NHA نسبت به HA از اسیدیته کل و نیز محتوای نیتروژن بیش‌تری برخوردار بود. به‌علاوه، اغلب صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه مرزه شامل سطح برگ، ارتفاع گیاه، طول ریشه، قطر ساقه، وزن تر و خشک بخش هوایی و ریشه و نیز شاخص کلروفیل، غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم، نیترات و آنزیم نیترات ردوکتاز در تیمارهای NHA به‌طور معناداری بیش‌تر از تیمارهای HA بودند. همچنین، بیش‌ترین وزن خشک بخش هوایی در تیمارهای تلفیقی U_3NHA_3 و U_3HA_3 و تیمار U_3 مشاهده شد. میانگین شدت افزایش غلظت نیترات بخش هوایی با افزایش سطح نیتروژن در تیمارهای اوره ۱/۷۷ برابر تیمارهای تلفیقی UNHA بود. نتایج نشان داد که آبشویی نیترات از خاک با کاربرد تیمار U_3NHA_3 حدود ۴۰/۵ درصد نسبت به تیمار U_3 کاهش یافت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که کود تلفیقی UNHA می‌تواند به‌عنوان یک کود نیتروژن‌دار در افزایش عملکرد و شاخص‌های رشد گیاه دارویی مرزه مطرح گردد.

واژه‌های کلیدی: آبشویی نیترات، آنزیم نیترات ردوکتاز، اوره، تیمار تلفیقی، لئوناردیت

مقدمه

گیاهان دارویی و معطر است که در صنایع مختلف غذایی و دارویی کاربرد دارد و به‌طور گسترده در مناطق مختلف ایران کشت می‌شود (Mehdizadeh et al., 2020). این گیاه از خانواده Lamiaceae

مرزه با نام علمی *Satureja hortensis* L. یکی از مهم‌ترین

۱، ۲، ۳ و ۴- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mansourmirzaei63@gmail.com)

(نعنایان) بوده و به صورت بوته‌ای رشد می‌کند (Skubij and Dzida, 2019). سرشاخه‌های گل‌دار از مهم‌ترین بخش‌های قابل استفاده این گیاه بوده و معمولاً بعد از برداشت در سایه خشک می‌شوند. گیاه مرزه به طور گسترده در کشور کشت می‌شود (Sabouri et al., 2018). به دلیل اهمیت زیاد گیاهان دارویی، لازم است که فعالیت‌های پژوهشی بیش‌تری در راستای افزایش کمی و کیفی این محصولات به‌ویژه مرزه انجام گیرد.

نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر پرمصرف برای گیاهان دارویی است که نقش مهمی در تولید زیاده گیاه ایفا می‌کند و به طور مستقیم و غیرمستقیم تولید متابولیت‌های ثانویه گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Skubij and Dzida, 2019). نیتروژن با تأثیر بر رشد ریشی و زایشی گیاهان دارویی، کمیت و کیفیت مواد مؤثره آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Gruandwald and Buttle, 1996). بر اساس نتایج مطالعات پیشین، نیتروژن با افزایش طول دوره رشد و نیز باشدت بخشیدن فرآیند ماده‌سازی، اسکلت کربنی مورد نیاز برای سنتز هرچه بیشتر متابولیت‌های ثانویه در گیاه مرزه را فراهم می‌آورد (Arvin, 2019).

توصیه کودی برای گیاهان دارویی بایستی با دقت انجام شود، زیرا ممکن است یک تیمار کودی سبب افزایش محصول گردد درحالی‌که میزان و یا کیفیت ماده مؤثره گیاهان دارویی را کاهش دهد و یا سبب تجمع برخی ترکیبات مضر مانند نیترات در گیاه شود (Karamian et al., 2013). علاوه بر این، از آنجایی که طبیعی بودن مواد استحصال شده از گیاهان دارویی اهمیت خاصی دارد، ضروری است در به‌کارگیری کودهای شیمیایی نیز دقت بیشتری شود (Alizadeh Sahzabi et al., 2007). کود اوره یکی از پرمصرف‌ترین کودهای نیتروژن محسوب می‌شود (Mariano et al., 2019). این کود حدود ۸۰ درصد از مصرف کودهای نیتروژن را تشکیل می‌دهد (Guha et al., 2022) که می‌تواند سبب افزایش عملکرد گیاهان دارویی مانند مرزه شود. در این راستا، علیزاده سهزابی و همکاران (Alizadeh Sahzabi et al., 2007) اثر تیمارهای کودی مختلف شامل کاربرد اوره به‌صورت خاکی در چهار سطح صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار و به‌صورت محلول‌پاشی در چهار سطح صفر، ۴/۵، ۶ و ۷/۵ درصد نیتروژن خالص در هکتار را بر ویژگی‌های کمی و کیفی گیاه مرزه را بررسی کردند. نتایج آنان نشان داد که بیشترین عملکرد بیولوژیک، بذر و سرشاخه گل‌دار گیاه مرزه به‌ترتیب به میزان ۴۴۳۴، ۸۷۵/۳ و ۱۸۵۵ کیلوگرم در هکتار با اعمال ۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار به‌صورت خاکی به همراه ۴/۵ درصد نیتروژن خالص در هکتار به‌صورت محلول‌پاشی به دست آمد. از سوی دیگر، کرمیان و همکاران (Karamian et al., 2013) بیش‌ترین وزن تر و خشک گیاه مرزه را برای تیمار کودی ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار مشاهده کردند؛ هر

چند که کمترین میزان اسانس مرزه را نیز برای همین تیمار گزارش کردند. بعلاوه، مکی‌زاده تفتی و همکاران (Makkizadeh et al., 2012) بالاترین میزان ارتفاع گیاه، تعداد شاخه فرعی و وزن خشک اندام هوایی را برای تیمار تلفیقی کود زیستی و ۵۰ درصد کود اوره (۷۵ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و بالاترین میزان اسانس را برای تیمار کود شیمیایی (۱۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) مشاهده کردند.

از طرفی، گزارش‌ها نشان می‌دهند که تقریباً ۲۰ تا ۷۰ درصد از اوره مصرف‌شده در زمین‌های زراعی از طریق آبشویی، نیترات‌زدایی و تصعید هدر می‌رود (Naz and Sulaiman, 2016) که می‌تواند منجر به مشکلات جدی زیست‌محیطی از طریق آلودگی آب‌های زیرزمینی و انتشار N_2O و آمونیاک در اتمسفر شود (Shi et al., 2020). یکی از تدابیر مدیریتی در جهت کاهش تلفات نیتروژن و مقابله با اثرات منفی کودهای شیمیایی، استفاده از کودهای کندرها است که رهاسازی تأخیری نیتروژن را تضمین کرده و شرایط خاک و رشد گیاه را نیز بهبود می‌بخشد (Trenkel, 2010). مواد هیومیک می‌توانند به‌عنوان کود کندرها، نیتروژن مورد نیاز گیاه را فراهم نمایند (Ozkan and Ozkan, 2017). نتایج پژوهش‌های پیشین حاکی از آن است که هیومیک اسید (HA) سبب افزایش معنادار صفات زراعی مرزه از جمله طول ریشه، ارتفاع بوته، تعداد شاخه‌های فرعی، وزن خشک برگ در بوته، وزن خشک و تر بخش هوایی، عملکرد ماده خشک، عملکرد اسانس، عملکرد بذر، طول ساقه و سطح برگ گیاه می‌گردد (Farahani and Madani, 2014; Zaremanesh et al., 2022). اما با توجه به اینکه HA دارای درصد نیتروژن پایینی است، بنابراین استفاده از مقادیر زیاد آن می‌تواند برای رشد گیاه محدودکننده باشد (Kalaichelvi et al., 2006). در این رابطه، هیومیک اسیدهای نیتروژن‌دار شده یا نیتروهیومیک اسیدها (NHAs) به‌عنوان کود نیتروژن (Yan et al., 2022; Wang et al., 2022) و محرک رشد گیاه (Patti et al., 1992) مورد توجه قرار گرفته‌اند. معمولاً NHAs از اکسیدشدن منابعی همچون کمپوست (Syahren and Wong, 2008) و یا زغال سنگ (Thorn and Cox, 2016) با نیتریک اسید (فرآیند نیترودار کردن) تولید می‌شوند. طی این فرآیند، گروه‌های نیترو ($-NO_2$) به HA افزوده می‌شوند (Fatima et al., 2021). در محیط خاک NHA به‌وسیله آنزیم نیتروژن‌دوکتاز احیا شده و سپس برای تولید یون‌های NH_4^+ دامینه می‌شود (Ju and Parales, 2010). در برخی پژوهش‌ها فواید مصرف توام هیومیک اسید و اوره به اثبات رسیده است (Kong et al., 2022) با این حال، خواص برتر محصول حاصل از واکنش مواد هیومیک و نیتریک اسید اخیراً مورد توجه قرار گرفته (Huang et al., 2019) و مصرف مواد هیومیک غنی شده از نیتروژن به‌عنوان کود توصیه شده است (Li et al., 2022). به‌طور کلی، تحقیقات اندکی در مورد اثر نیتروهیومیک اسید بر رشد

جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار نیتروژن NHA تولید شده حدود ۲ برابر مقدار نیتروژن HA بوده و به‌علاوه نسبت به HA، از میزان اسیدیته کل و گروه‌های کربوکسیل و فنلی بالاتری نیز برخوردار است. در واقع، واکنش نیترودار کردن، از طریق اکسایش HA با نیتریک اسید، سبب افزایش محتوای نیتروژن در ساختار NHA، به‌واسطه استخلاف گروه‌های نیترو (NO_2) (Boral et al., 2021) شده که در طیف‌های FTIR (شکل ۱) نشان داده شده است. پیک‌های موجود در دامنه‌های 1546 cm^{-1} – 1529 cm^{-1} و 1377 cm^{-1} – 1327 cm^{-1} به ارتعاش کششی پیوندهای گروه‌های نیترو (NO_2) نسبت داده می‌شوند (Nasir et al., 2011).

آزمون جوانه‌زنی بذر

برای ارزیابی احتمال سمیت HA و NHA، یک آزمایش جوانه‌زنی بذر انجام شد. برای این کار، تعداد ۳۰ عدد بذر مرزه (رقم اورامانی) در ۳ تکرار در پتری دیش‌هایی با قطر ۱۲ سانتی‌متر روی کاغذ صافی قرار داده شدند. سپس، ۱۰ میلی‌لیتر از عصاره HA استخراج شده و NHA تولید شده از لئوناردیت با غلظت ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر به هر پتری اضافه شده و در دمای ۲۲ درجه سلسیوس انکوباتور به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شدند. در نهایت، نسبت جوانه‌زنی بذر (RSG^1)، نسبت رشد ریشه‌چه (RRG^2)، جوانه‌زنی بذر (SG^3) و شاخص جوانه‌زنی (GI^4) به‌ترتیب با استفاده از معادله‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ محاسبه شدند (Luo et al., 2018).

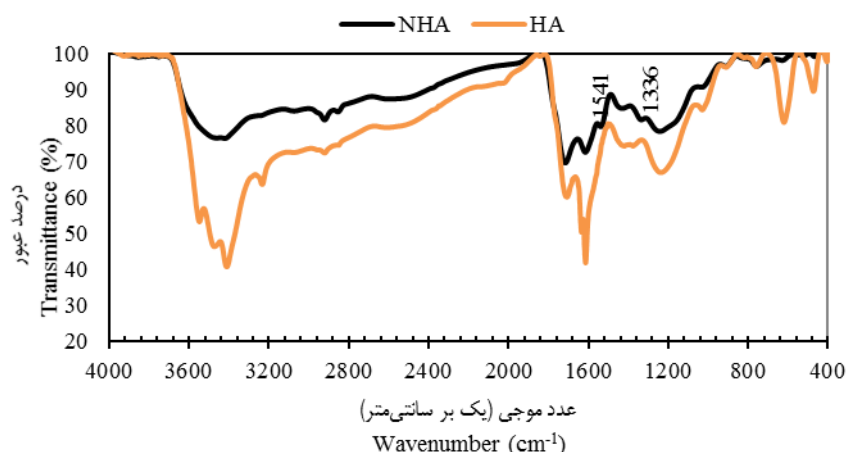
و عملکرد گیاهان مختلف انجام شده است. از این‌رو، با توجه به اهمیت و فواید مصرف کودهای آلی در کشت گیاهان دارویی، در این پژوهش یک هیومیک اسید غنی‌شده با نیتروژن تولید شد و برای اولین بار اثر آن بر ویژگی‌های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزه و هدررفت نیتروژن در مقایسه با کود اوره بررسی گردید.

مواد و روش‌ها

تولید نیترو هیومیک اسید (NHA)

برای تهیه NHA، از لئوناردیت به‌عنوان یک منبع غنی از HA (Akimbekov et al., 2020) استفاده شد. برای استخراج HA، لئوناردیت (حاوی ۳۲ درصد HA) خریداری شده از شرکت گل‌سنگ کویر یزد در محلول NaOH نیم مولار در نسبت جامد به محلول ۱ گرم به ۱۰ میلی‌لیتر در ۱۶۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت در تاریکی تکان داده شد. سپس، سوسپانسیون حاصله به مدت ۱۵ دقیقه با سرعت ۶۰۰۰ دور در دقیقه سانتریفیوژ شد و محلول‌رویی جمع‌آوری گردید. محلول جمع‌آوری شده با افزودن قطره قطره HCl ۶ مولار تا $\text{pH}=1$ اسیدی شد و HA رسوب داده شده بعد از ۲۴ ساعت جمع‌آوری گردید. HA به دست آمده با مخلوطی از HCl (۰/۱ مولار) و HF (۰/۳ مولار) به مدت ۲۴ ساعت تکان داده شد تا ناخالصی‌های معدنی حذف شوند. سپس، HA با آب مقطر شسته شد تا یون‌های کلرید آزاد حذف شوند (Swift, 1996). در نهایت، HA ابتدا هوا خشک شده و سپس در دسیکاتور حاوی سیلیکاژل خشک گردید. HA استخراج شده با نیتریک اسید ۵۰ درصد (حجمی/حجمی) با نسبت جامد به محلول ۱ به ۲/۵ به مدت ۲۴ ساعت در حمام یخ خیسانده شد. سپس، به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۹۰ درجه سلسیوس حرارت داده شد. در ادامه، با آب مقطر به نسبت ۱:۱۰۰، سه بار شسته شد و در دمای ۴۰ درجه سلسیوس خشک گردید (Almendros and Dorado, 1999). تجزیه عنصری (درصدهای کربن، هیدروژن، نیتروژن، گوگرد و اکسیژن) با دستگاه CHNS Analyzer مدل (vario EL III Element Analyzer)، شناسایی گروه‌های عاملی با استفاده از دستگاه FT-IR مدل (Vector 22 ساخت شرکت Bruker Optics کشور آلمان)، اسیدیته کل با استفاده از روش هیدروکسید باریم، فراوانی گروه‌های کربوکسیل با استفاده از روش استات کلسیم و فراوانی گروه‌های هیدروکسیل فنولی از تفاضل اسیدیته کل و گروه‌های کربوکسیلی به دست آمد (Swift, 1996). برای تعیین مقدار خاکستر، ۱ گرم از HA و NHA به مدت ۴ ساعت در کوره با دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس قرار داده شد (Standard, 2011).

ویژگی‌های HA استخراج شده و NHA تولید شده از لئوناردیت در



شکل ۱- طیف FT-IR نیتروهیومیک اسید (NHA) در مقایسه با هیومیک اسید (HA)
Figure 1- FT-IR spectrum of nitronitrohumic acid (NHA) compared to humic acid (HA)

جدول ۱- مقادیر اسیدیته کل، گروه‌های کربوکسیل و فنولی، تجزیه عنصری، نسبت‌های اتمی و درصد خاکستر هیومیک اسید (HA) و نیتروهیومیک اسید (NHA) به دست آمده از لئوناردیت

Table 1-The measured values of total acidity, carboxylic group, phenolic group, elemental composition, atomic ratios, and ash content for HA and NHA extracted from leonardite

Content for HA and NHA extracted from Rehnard										
منبع آلی Organic Source	%						C/N	(meq g ⁻¹)		
	C کربن	H هیدروژن	N نیتروژن	S گوگرد	O اکسیژن	Ash خاکستر		اسیدیته کل Total acidity	گروه‌های کربوکسیل Carboxylic groups	گروه‌های فنولی Phenolic groups
HA	61.2	3.1	1.6	0.82	25.1	8.3	45.4	14.9	3.2	11.7
NHA	57.7	2.6	3.3	0.71	31.1	4.6	20.5	16.4	3.85	12.6
C/N = [(%C / 12.011) / (%N / 14.0067)]						%O = [100 - (C % + H % + N % + S % + Ash %)]				

$$C/N = [(\%C / 12.011) / (\%N / 14.0067)] \quad \%O = [100 - (C \% + H \% + N \% + S \% + Ash \%)]$$

$$GI = RSG \times RRG \quad [4]$$

$$RSG = \frac{\text{تعداد بذر جوانه زده در نمونه}}{\text{تعداد بذر جوانه زده در شاهد}} \quad [1]$$

$$RRG = \frac{\text{طول کل ریشه‌چه‌های بذرهای جوانه زده در نمونه}}{\text{طول کل ریشه‌چه‌های بذرهای جوانه زده در شاهد}} \quad [2]$$

$$SG = \frac{\text{تعداد بذرهای جوانه زده}}{\text{تعداد کل بذر}} \times 100 \quad [3]$$

نتایج مربوط به آزمون جوانه زنی بذر مرزه در جدول ۲ آورده شده است. به طور کلی، با توجه به اینکه مقادیر GI بزرگتر از ۰/۸ بیانگر عدم سمیت است (Luo et al., 2018). لذا، NHA تولید شده از لئوناردیت برای گیاه سمی نخواهند بود.

جدول ۲- نتایج آزمون جوانه زنی بذر مرزه در تیمارهای هیومیک اسید (HA) و نیتروهیومیک اسید (NHA) به دست آمده از لئوناردیت

Table 2- Results of seed germination test of savory obtained at each treatment of HA and NHA extracted from leonardite

تیمار	تعداد بذرهای جوانه زده	طول کل ریشه‌چه‌ها	SG	RSG	RRG	GI
Treatment	Number of germinated seeds	Total radicle length of germinated seeds (cm)				
HA (شاهد)	26.3	43.3	0.88			
NHA	26	52.2	0.87	0.99	1.21	1.20

SG: جوانه زنی بذر، RSG: نسبت جوانه زنی بذر، RRG: نسبت رشد ریشه‌چه، GI: شاخص جوانه زنی بذر

SG: Seed germination, RSG: Relative seed germination, RRG: Relative radical growth, GI: Germination index

آماده‌سازی و تعیین ویژگی‌های خاک

ابتدا خاک مورد نظر از عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری اراضی دانشگاه کردستان با مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه ۸ ثانیه شمالی و ۴۸ درجه و ۱۰ ثانیه شرقی نمونه برداری شده و بعد از هوا خشک شدن و نرم شدن از الک ۲ میلی متری عبور داده شد. سپس، برخی از ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک شامل بافت (Gee and Or, 2002)، رطوبت معادل مکش ۰/۱ بار (Klute and Dirksen, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC_{1:2}) و pH_{1:2} (Gavlak et al., 2003)، کربن آلی (Nelson and Sommers, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) در pH ۸/۲ (Chapman, 1965)، کربنات کلسیم معادل (CCE) (Allison and Moodie, 1965)، نیتروژن کل (Jones, 2001)، فسفر قابل جذب با روش اولسن (Kuo, 1996) و پتاسیم قابل جذب با عصاره گیر استات آمونیوم (Pansu and Gauthierou, 2007) اندازه گیری شدند. نیترات و آمونیوم خاک به ترتیب با استفاده از K₂SO₄ ۰/۰۵ مولار (Black and Waring, 1978) و ۲ مولار KCl (Keeney and Nelson, 1982) استخراج شده و با روش‌های سالیسیلیک اسید (Vendrell and Zupancic, 1990) و ایندوفنول بلو (Riley and Sinhaseni, 1957) اندازه گیری شدند. خاک نمونه برداری شده یک خاک لوم شنی آهکی فقیر از نظر کربن آلی و نیتروژن کل بود (جدول ۳).

آزمایش گلخانه‌ای (کشت گلدانی، اعمال تیمارها و آبشویی گلدان‌ها)

یک آزمایش گلخانه‌ای در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی در ۱۶ سطح شامل: بدون هیومیک اسید و اوره (HA₀-U₀) (شاهد)، سطح اول کود اوره (U₁)، سطح دوم کود

اوره (U₂)، سطح سوم کود اوره (U₃)، سطح اول هیومیک اسید (HA₁)، سطح دوم هیومیک اسید (HA₂)، سطح سوم هیومیک اسید (HA₃)، سطح اول نیترو هیومیک اسید (NHA₁)، سطح دوم نیترو هیومیک اسید (NHA₂)، سطح سوم نیترو هیومیک اسید (NHA₃)، سطح اول کود اوره-هیومیک اسید (U₁HA₁)، سطح دوم کود اوره-هیومیک اسید (U₂HA₂)، سطح سوم کود اوره-هیومیک اسید (U₃HA₃)، سطح اول کود اوره-نیترو هیومیک اسید (U₁NHA₁)، سطح دوم کود اوره-نیترو هیومیک اسید (U₂NHA₂) و سطح سوم کود اوره-نیترو هیومیک اسید (U₃NHA₃)، بودند. سطوح تیمارها به میزان ۴۰ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک برای سطح اول، ۸۰ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک برای سطح دوم و ۱۲۰ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم خاک برای سطح سوم تعیین شد (Alizadeh Sahzabi et al., 2007). همچنین، در تیمارهای مخلوط، سهم برابری از نیتروژن برای اوره و NHA یا HA در نظر گرفته شد. برای اعمال تیمارها، HA و NHA قبل از کشت بذر به خاک گلدان‌ها افزوده شده و به مدت ۲ هفته در رطوبت ۰/۱ بار انکوبه شدند. اوره نیز به صورت تقسیط شده در سه نوبت در روزهای ۵، ۲۵ و ۵۵ بعد از کشت بذر همراه با آب آبیاری به گلدان‌ها اضافه شد.

در این آزمایش تعداد ۴۸ گلدان پلاستیکی ۲ کیلوگرمی تهیه شد و گلدان‌ها بعد از اعمال تیمارها به مدت ۲ هفته در رطوبت ۰/۱ بار انکوبه شدند. سپس، تعداد ۳۰ عدد بذر مرزه (رقم اورامانی) در عمق ۰/۵ تا ۱ سانتی متری گلدان‌ها کشت شد. پس از سبز شدن بوته‌ها و اطمینان از استقرار آن‌ها، تعداد بوته‌ها در هر گلدان به ۲۰ عدد کاهش یافت. رطوبت گلدان‌ها با استفاده از توزین در ۷۰ تا ۸۰ درصد رطوبت معادل مکش ۰/۱ بار نگهداری شد.

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مورد استفاده در مطالعه

Table 3- Some of the physicochemical properties of the soil sample used in the study

پارامتر	نتایج	پارامتر	نتایج
Parameter	Results	Parameter	Results
pH _{1:2}	8.03	پتاسیم قابل جذب	304
قابلیت هدایت الکتریکی		Available potassium (mg kg ⁻¹)	
EC _{1:2} (dS m ⁻¹)	0.2	کربنات کلسیم معادل	24
نیتروژن آمونیومی		CCE (%)	
NH ₄ -N (mg kg ⁻¹)	7.93	کربن آلی	0.46
نیتروژن نیتراتی		OC (%)	
NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)	9.15	شن	14
ظرفیت تبادل کاتیونی		Sand (%)	
CEC (cmol _c kg ⁻¹)	15.4	سیلت	75
نیتروژن کل		Silt (%)	
TN (mg kg ⁻¹)	320	رس	11
فسفر قابل جذب		Clay (%)	
Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	22.3	بافت	لوم شنی
		Texture	Sandy loam

شرایط دمایی گلخانه در محدوده ۱۸ تا ۲۲ درجه سلسیوس بود. شاخص کلروفیل برگ‌ها ۷۰ روز بعد از کشت با استفاده از کلروفیل سنج OPTI-SCIENCE مدل CCM-200 تعیین شد (Uzoma et al., 2011). به منظور بررسی اثر تیمارها بر میزان آیشویی نیترات از خاک، گلدان‌ها در فواصل زمانی معین (هر ۱۰ روز یکبار) آیشویی شدند. بر این اساس، برای جمع‌آوری آیشویه گلدان‌ها، ۲۵ درصد آب مازاد بر رطوبت مکش ۰/۱ بار برای تأمین نیاز آیشویی لحاظ شد. بعد از هر بار آیشویی، غلظت نیترات در آیشویه اندازه‌گیری شده و آیشویه جمع‌آوری شده تا زمان برگرداندن شدن به گلدان در مواقع آبیاری منجمد شد.

تعیین صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه مرزه

در پایان دوره رشد رویشی که ۷۵ روز طول کشید، ارتفاع گیاه و تعداد برگ‌ها تعیین شدند. همچنین، بعد از کف‌بردن گیاهان، وزن تر ریشه و بخش هوایی، طول ریشه، حجم ریشه و سطح برگ (با استفاده از سطح سنج برگ پرتابل مدل AM200 کمپانی ADC) و قطر ساقه (با استفاده از کولیس دیجیتال) اندازه‌گیری شدند. همچنین، وزن‌های خشک بعد از خشک‌کردن ریشه‌ها و بخش‌های هوایی در خشک‌کن فن‌دار (SELECTA، ساخت اسپانیا) در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت تعیین شدند. صفات فیزیولوژیک گیاه شامل نیتروژن کل به روش کلدال (Jones, 2001) و غلظت فسفر و پتاسیم بعد از خشک‌سوزانی (Westerman, 1990) به ترتیب به روش‌های رنگ‌سنجی (Cottenie, 1980) و نشر شعله‌ای (Wallinga et al., 1989) تعیین شدند.

تعیین غلظت نیترات در گیاه

استخراج نیترات از گیاه به روش عصاره‌گیری با سولفات آلومینیم انجام شد (Jones, 2001). بر این اساس، مقدار ۴۰۰ میلی‌گرم از برگ خشک شده به یک فالكون ۵۰ میلی‌لیتری انتقال داده شد و به آن ۴۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۲۵ مولار سولفات آلومینیم $(Al_2(SO_4)_3)$ اضافه گردید و به مدت ۱۵ دقیقه در شیکر رفت و برگشتی با ۱۲۰ دور در دقیقه تکان داده شد. سپس، با استفاده از کاغذ صافی واتمن شماره ۴۰ صاف گردید. در نهایت، غلظت نیترات به روش سالیسیلیک اسید (Cataldo et al., 1975) تعیین شد.

تعیین غلظت آنزیم نیترات ردوکتاز در گیاه

غلظت آنزیم نیترات ردوکتاز در بافت تازه بخش هوایی و ریشه در پایان دوره رشد رویشی تعیین گردید (Stewart et al., 1973). نمونه‌ها تا زمان اندازه‌گیری در دمای ۷۰- درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای تهیه عصاره آنزیمی، ۱ گرم از نمونه‌های برگ و ریشه در هاون چینی

در ۴ درجه سلسیوس با ۸ میلی‌لیتر محلول حاوی بافر فسفاتی ($pH=7.5$ ، ۰/۱ مولار)، EDTA (۱ میلی‌مولار)، دی‌تیوتریتول (۱ میلی‌مولار) و کازئین ۲/۲ درصد (وزنی/حجمی) ساییده شد. سپس، عصاره صاف شد و با سانتریفیوژ یخچال‌دار (Hettich, Universal 320R) در ۵۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه و دمای ۲ درجه سلسیوس سانتریفیوژ شد. برای سنجش سینتیکی غلظت آنزیم نیترات ردوکتاز، لوله آزمایش حاوی ۱/۷ میلی‌لیتر محلول محتوی ترکیبات ۰/۱ میلی‌لیتر بافر فسفات ($pH=7.5$ ، ۱ مولار)، ۰/۱ میلی‌لیتر NADH (۱ میلی‌گرم در لیتر)، ۰/۲ میلی‌لیتر KNO_3 (۰/۱ مولار)، ۱/۲ میلی‌لیتر آب مقطر و ۰/۱ میلی‌لیتر عصاره آنزیمی، به مدت ۲۰ دقیقه در حمام آبی در دمای ۲۷ درجه سلسیوس قرار گرفت. واکنش با افزودن ۱ میلی‌لیتر سولفانیلامید (۱ گرم در ۱۰۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک نرمال) متوقف شد. بعد از ۵ دقیقه، ۱ میلی‌لیتر N-نفتیل اتیلن دی‌آمین دی‌کلراید (۰/۱ درصد، وزنی/حجمی) اضافه شد و نمونه سانتریفیوژ (۲۰۰۰ دور در دقیقه، ۱۵ دقیقه، ۲ درجه سلسیوس) گردید. سپس، جذب در طول موج ۵۴۰ نانومتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر UV-VIS (Analytik Jena- Specord 210 Plus) قرائت شد. محلول‌های استاندارد با استفاده از نیتريت سدیم ($NaNO_2$) تهیه شدند و غلظت آنزیم بر حسب میکرومول نیتريت در گرم وزن تازه بافت در ساعت محاسبه گردید.

تجزیه آماری

در این پژوهش، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها (آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ درصد) با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های مورفولوژیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر همه ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه مرزه (به استثنای طول ریشه) در سطح احتمال ۰/۱ درصد معنادار بود (جدول ۴). مقایسه میانگین اثر تیمارها نیز در جدول ۵ ارائه شده است.

سطح برگ

بیش‌ترین میزان سطح برگ مربوط به تیمار U_3 (۴۵۰ سانتی‌متر مربع) بود که با تیمارهای U_3NHA_3 ، U_3HA_3 و NHA_3 تفاوت معناداری نداشت. در واقع، HA و به‌ویژه NHA در رشد برگ‌های گیاه مؤثر بوده و از این طریق میزان مصرف کود اوره را کاهش دادند.

UNHA مؤثرتر از تیمارهای منفرد NHA بودند و به‌طور میانگین طول ریشه در تیمارهای تلفیقی ۱/۲ سانتی‌متر بیش‌تر از تیمارهای منفرد بود.

ارتفاع گیاه

بیشترین ارتفاع گیاه در تیمار U_3NHA_3 (۲۶/۷ سانتی‌متر) مشاهده شد که با تیمارهای U_2NHA_2 و U_3HA_3 تفاوت معناداری نداشت. کمترین ارتفاع گیاه متعلق به تیمار شاهد (۱۶/۳ سانتی‌متر) بود. ارتفاع گیاه در تیمارهای NHA در مقایسه با تیمارهای HA به‌طور میانگین ۲/۱ سانتی‌متر بیش‌تر بود. با این حال، اثر مثبت HA بر ارتفاع گیاه مرزه توسط سایر پژوهشگران گزارش شده است (Farahani and Madani, 2014). در مورد ارتفاع گیاه نیز همانند دو صفت قبلی، دو تیمار تلفیقی U_3NHA_3 و U_3HA_3 اثر مثبت بیش‌تری را در مقایسه با سایر تیمارها نشان دادند. به‌علاوه، ارتفاع گیاه با افزایش سطح نیتروژن فقط در تیمارهای تلفیقی به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. علیراده سهزایی و همکاران (Alizadeh Sahzabi et al., 2007) نیز افزایش ارتفاع گیاه مرزه با افزایش سطح نیتروژن را گزارش کرده و علت آن را افزایش رشد رویشی به دلیل افزایش تقسیم سلول‌های مرستمی و تورژانس سلول‌های مرستمی بیان کردند.

وزن تر و خشک ریشه

وزن تر ریشه در تیمارهای U_2 و U_3 (۴ گرم در گلدان) بیش‌ترین بود که با تیمارهای U_2NHA_2 ، U_3NHA_3 ، U_3HA_3 و NHA_3 تفاوت معناداری نداشت.

فراهانی و مدنی (Farahani and Madani, 2014) اثرات مثبت تیمار تلفیقی U+HA را بر شاخص سطح برگ گیاه مرزه گزارش کردند. در تیمار شاهد نیز کمترین میزان سطح برگ (۲۰۹ سانتی‌متر مربع) مشاهده شد که با تیمار HA_1 تفاوت معنی‌داری نداشت. نتایج نشان داد که با افزایش سطح نیتروژن، میزان سطح برگ یک‌روند افزایشی داشت. بیش‌ترین شدت افزایش مربوط به تیمارهای NHA و کمترین آن مربوط به تیمارهای UNHA بود. عظیم و همکاران (Azeem et al., 2015) نیز افزایش سطح برگ با افزایش سطح نیتروژن را گزارش کردند. نیتروژن با افزایش تقسیم و تورژانس سلول‌های مرستمی سبب افزایش رشد رویشی گیاهان می‌شود (Zare et al., 2013). میانگین سطح برگ در ۳ سطح HA (۲۹۷/۳ سانتی‌متر مربع) بیش‌تر از شاهد ولی کم‌تر از NHA (۳۳۱ سانتی‌متر مربع) بود.

طول ریشه

بیش‌ترین طول ریشه در تیمار U_3HA_3 (۱۵ سانتی‌متر) مشاهده شد که با تیمارهای U_3NHA_3 ، U_2NHA_2 ، U_1NHA_1 ، NHA_3 و U_2 تفاوت معناداری نداشت. همچنین، کمترین طول ریشه در تیمار شاهد (۱۱/۶ سانتی‌متر) مشاهده شد که با برخی دیگر از تیمارها به‌ویژه ۳ سطح HA تفاوت معنی‌داری نداشت. فراهانی و مدنی (Farahani and Madani, 2014) نیز کمترین طول ریشه مرزه را در تیمار شاهد (۱۰/۱ سانتی‌متر) و بیش‌ترین آن را در تیمار کود دامی (۱۳/۱۲ سانتی‌متر) مشاهده کردند که با تیمار تلفیقی HA+کود دامی و U+HA تفاوت معناداری نداشت. به‌طوری‌که ملاحظه می‌شود، تیمارها، برخلاف سطح برگ، اثر ضعیف‌تری بر طول ریشه داشتند. تیمارهای تلفیقی

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه مرزه

Table 4-ANOVA analysis for the effect of treatments on the morphological characteristics of the savory plant

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	سطح برگ Leaf surface	طول ریشه Root length	ارتفاع گیاه plant height	وزن تر ریشه Root fresh weight	میانگین مربعات Mean squares				قطر ساقه Stem diameter
						وزن خشک ریشه Root dry weight	وزن تر بخش هوایی Shoot dry weight	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight	حجم ریشه Root volume	
تیمار Treatment	15	18753.1***	3.49*	18.12***	1.40***	0.02***	22.68***	0.38***	0.34***	0.08***
خطا Error	22	141.75	1.71	2.41	0.17	0.003	0.13	0.002	0.04	0.008
ضریب تغییرات C.V (%)	-	3.39	10.33	6.77	13.34	13.37	3.40	3.43	13.24	6.44

*** و *: به‌ترتیب معنادار در سطح احتمال ۰/۱ و ۵ درصد می‌باشد.

*** and *: significant at $p \leq 0.001$ and $p \leq 0.05$, respectively

وزن خشک ریشه تقریباً مشابه وزن تر ریشه بود، به‌طوری‌که در تیمارهای U_2 و U_3 (۰/۵۲ گرم در گلدان) بیش‌ترین و در تیمار شاهد

به‌علاوه، کمترین وزن تر ریشه متعلق به تیمار شاهد (۱/۹ گرم در گلدان) بود که با برخی دیگر از تیمارها تفاوت معناداری نشان نداد. نتایج

گیاه مرزه می‌شود (Azizi et al., 2020).

حجم ریشه

بیش‌ترین حجم ریشه مربوط به تیمار U_3 (۲/۱ سانتی‌متر مکعب) بود که با تعدادی از دیگر تیمارها تفاوت معناداری نداشت. کم‌ترین حجم ریشه نیز در تیمارهای HA_1 و شاهد (۱ سانتی‌متر مکعب) مشاهده شد که با تعدادی از دیگر تیمارها تفاوت معناداری نداشت. نتایج حجم ریشه با نتایج وزن ریشه هماهنگی داشت.

قطر ساقه

بیش‌ترین قطر ساقه در تیمار U_3NHA_3 (۱/۷ میلی‌متر) مشاهده شد که با تیمارهای U_3 و U_3HA_3 تفاوت معناداری نداشت. کم‌ترین قطر ساقه نیز متعلق به تیمار شاهد (۱/۱ میلی‌متر) بود که با تیمارهای HA_1 و HA_2 تفاوت معناداری نشان نداد.

به‌طورکلی، نتایج این پژوهش نشان داد که تیمارهای تلفیقی UNHA فقط در سطح سوم (U_3HA_3) ولی تیمارهای تلفیقی UNHA در هر سه سطح سبب افزایش رشد رویشی گیاه مرزه و در نتیجه کاهش مصرف کود اوره شدند. HA با بهبود وضعیت pH خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک و افزایش فراهمی عناصر غذایی برای گیاه سبب افزایش رشد گیاه می‌شود (El-Ghamry et al., 2009). همچنین، نتایج این پژوهش حاکی از اثرات بهتر تیمارهای NHA نسبت به تیمارهای HA بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه مرزه بود. مطالعات نشان داده است که فعالیت شیمیایی NHA نسبت به HA از نظر اسیدیته کل و CEC بیشتر بوده و NHA می‌تواند برای بهبود ساختمان خاک، حفظ عناصر غذایی، تحریک فعالیت ریزجانداران خاک و بهبود ظرفیت بافیری خاک مفید باشد (Patti et al., 1992). گروه‌های عاملی کربوکسیل و هیدروکسیل فنلی نقش مهمی در تعیین فعالیت مواد هیومیک دارند (Malcolm and Vaughan, 1979). نتایج جدول ۱ نشان می‌دهد که به واسطه افزایش هر دو گروه کربوکسیل و هیدروکسیل فنولی، اسیدیته کل NHA تولید شده در مقایسه با HA بیش‌تر بود.

(۰/۲۵ گرم در گلدان) کم‌ترین بود. وزن‌های تر و خشک ریشه با افزایش سطح نیتروژن از اول به سوم در تیمارهای NHA به ترتیب ۱ و ۰/۱۴ گرم در گلدان افزایش نشان دادند، درحالی‌که این افزایش در مورد تیمارهای HA معنی‌دار نبود. بالین‌حال، نتایج فراهانی و مدنی (Farahani and Madani, 2014) حاکی از اثر مثبت و معنادار HA بر وزن خشک ریشه مرزه در مقایسه با شاهد بود. زارع‌منش و همکاران (Zaremanesh et al., 2022) بیش‌ترین وزن خشک ریشه گیاه مرزه با میانگین ۱/۰۸ گرم در گلدان را در بالاترین سطح HA (۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم در خاک) به دست آوردند. عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2020) نیز بیش‌ترین وزن خشک ریشه مرزه را در تیمار تلفیقی HA و رومی‌کمپوست مشاهده کردند.

وزن تر و خشک بخش هوایی

بیش‌ترین وزن تر بخش هوایی مربوط به تیمارهای U_3 و U_3NHA_3 (۱۳/۷ گرم در گلدان) بود که با تیمار U_3HA_3 تفاوت معناداری نداشت. کم‌ترین مقدار این صفت نیز مربوط به تیمار شاهد (۵/۲ گرم در گلدان) بود که با تیمار HA_1 تفاوت معناداری نداشت. مشابه با وزن تر، بیش‌ترین وزن خشک بخش‌هوایی در تیمارهای U_3 و U_3NHA_3 (۱/۷۷ گرم در گلدان) و کم‌ترین آن در تیمار شاهد (۰/۶۸ گرم در گلدان) مشاهده شد. مشابه سطح برگ، با افزایش سطح نیتروژن در همه گروه‌های تیماری، وزن‌های تر و خشک بخش هوایی روند افزایشی نشان دادند. بیش‌ترین شدت افزایش مربوط به تیمارهای NHA و کم‌ترین آن مربوط به تیمارهای UNHA بود. به‌طوری‌که، وزن خشک بخش هوایی از سطح اول به سطح سوم در تیمارهای NHA و UNHA، به ترتیب ۴۹/۵ و ۲۰ درصد افزایش یافت. این افزایش در تیمارهای U نیز پایین بوده و فقط ۲۲ درصد بود. در پژوهش‌های پیشین نیز اثر نیتروژن در افزایش وزن تر و خشک بخش هوایی گیاه مرزه گزارش شده و علت آن نقش نیتروژن در افزایش تولید ماده خشک و افزایش طول دوره رشد گیاه بیان شده است (Makkizadeh et al., 2012). همچنین، میانگین وزن خشک بخش هوایی در تیمارهای NHA به میزان ۲۱/۳ درصد بیش‌تر از تیمارهای HA بود که نشان‌دهنده برتری NHA نسبت به HA می‌باشد. در مرحله ساقه رفتن که مرحله رشد سریع گیاه است، NHA از طریق افزایش فراهمی عناصر غذایی سبب افزایش شاخص‌های رشدی گیاه می‌شود (Patti et al., 1992). نتایج یادگاری (Yadegari, 2022) در بررسی اثر تیمارهای کودی مختلف شامل کود کامل NPK، بوتامیسول و HA بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک گیاه مرزه تحت شرایط تنش خشکی نشان داد که متوسط وزن خشک گیاه مرزه در تیمارهای حاوی HA (۲۶/۶۱ گرم در مترمربع) بیشتر از تیمارهای بدون HA (۲۲/۲۳ گرم در مترمربع) بود. HA با تحریک فتوسنتز باعث افزایش وزن خشک

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر تیمارها بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه مرزه

Table 5-Mean comparisons of the effect of treatments on the morphological characteristics of the savory plant

تیمار Treatment	سطح برگ Leaf area (cm ²)	طول ریشه Root length (cm)	ارتفاع گیاه Plant height (cm)	وزن تر ریشه Root fresh weight (g pot ⁻¹)	وزن خشک ریشه Root dry weight (g pot ⁻¹)	وزن تر بخش هوایی Shoot dry weight (g pot ⁻¹)	وزن خشک بخش هوایی Shoot dry weight (g pot ⁻¹)	حجم ریشه Root volume (cm ³)	قطر ساقه Stem diameter (mm)
شاهد	209 ^g	11.6 ^c	16.3 ^e	1.9 ^g	0.25 ^g	5.2 ⁱ	0.68 ^j	1 ^g	1.1 ⁱ
U ₁	351 ^c	11.7 ^c	22.6 ^c	3.5 ^{abc}	0.45 ^{abc}	11.2 ^{cd}	1.45 ^{cd}	1.7 ^{abcd}	1.4 ^{defg}
U ₂	395 ^b	12.7 ^{abc}	24 ^{abc}	4 ^a	0.52 ^a	12.3 ^b	1.60 ^b	2 ^{ab}	1.5 ^{bcd}
U ₃	450 ^a	13.3 ^{abc}	22.7 ^c	4 ^a	0.52 ^a	13.7 ^a	1.77 ^a	2.1 ^a	1.59 ^{ab}
HA ₁	219 ^g	12 ^{bc}	19.3 ^d	2 ^g	0.26 ^g	5.6 ⁱ	0.71 ⁱ	1 ^g	1.16 ^{hi}
HA ₂	295 ^e	11.7 ^c	22.7 ^c	2.1 ^{gf}	0.27 ^{efg}	7.3 ^h	0.95 ^h	1.1 ^{fg}	1.21 ^{ghi}
HA ₃	378 ^b	11.7 ^c	22.7 ^c	2.4 ^{egf}	0.31 ^{defg}	9.4 ^f	1.22 ^f	1.2 ^{efg}	1.3 ^{fgh}
U ₁ HA ₁	309 ^{de}	12 ^b	22.3 ^c	2.8 ^{cdef}	0.37 ^{cde}	10.1 ^e	1.32 ^e	1.6 ^{bcd}	1.38 ^{cdefg}
U ₂ HA ₂	393 ^b	11.7 ^c	23 ^c	3.2 ^{bcd}	0.42 ^{bc}	12.3 ^b	1.59 ^b	1.43 ^{def}	1.41 ^{cdef}
U ₃ HA ₃	433 ^a	15 ^a	26 ^{ab}	3.7 ^{ab}	0.48 ^{ab}	13.4 ^a	1.74 ^a	1.9 ^{abc}	1.54 ^{abc}
NHA ₁	241 ^f	12 ^{bc}	22.7 ^c	2.7 ^{defg}	0.35 ^{cdef}	8.6 ^g	1.11 ^g	1.36 ^{defg}	1.3 ^{efgh}
NHA ₂	324 ^d	12.3 ^{bc}	23.3 ^{bc}	2.8 ^{cdef}	0.37 ^{cde}	10.6 ^{de}	1.38 ^{de}	1.4 ^{efg}	1.4 ^{cdef}
NHA ₃	429 ^a	13.3 ^{abc}	25 ^{abc}	3.7 ^{ab}	0.49 ^{ab}	12.8 ^b	1.66 ^b	1.9 ^{abc}	1.51 ^{bcd}
U ₁ NHA ₁	355 ^c	13 ^{abc}	22.5 ^c	3 ^{bcd}	0.39 ^{bcd}	11.3 ^c	1.47 ^c	1.5 ^{cde}	1.4 ^{defg}
U ₂ NHA ₂	391 ^b	14.2 ^{ab}	25 ^{abc}	3.4 ^{abcd}	0.44 ^{abc}	12.4 ^b	1.61 ^b	1.7 ^{abcd}	1.47 ^{bcd}
U ₃ NHA ₃	449 ^a	14 ^{abc}	26.7 ^a	3.3 ^{abcd}	0.43 ^{abc}	13.7 ^a	1.77 ^b	1.7 ^{abcd}	1.7 ^a

اعداد دارای حرف مشترک در هر ستون بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن ($p \leq 0.05$) فاقد اختلاف معنادار می‌باشند.

Values with the same letter in each column have no significant difference based on the Duncan's mean comparison test ($p \leq 0.05$).

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه مرزه

Table 6- ANOVA analysis for the effect of treatments on the physiological characteristics of the savory plant

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	کلروفیل Chlorophyll	میانگین مربعات Mean squares									
			نیترات ردوکتاز NR		نیترات Nitrate		فسفر Phosphorus		نیتروژن Nitrogen		پتاسیم Potassium	
			بخش هوایی Shoot		بخش ریشه Root		بخش هوایی Shoot		بخش ریشه Root		بخش هوایی Shoot	
			Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root	Shoot	Root
تیمار Treatment	15	6.90**	2.09**	0.046**	81705.9**	59776.6**	0.0003**	0.001**	4.11**	0.41**	0.13**	0.17**
خطا Error	32	0.03	0.0004	0.0002	64.29	63.85	0.000001	0.0000009	0.002	0.003	0.0008	0.0001
ضریب تغییرات C.V (%)	-	1.11	0.92	0.87	2.29	2.62	0.57	0.48	1.7	3.46	0.87	0.76

** : بیانگر معناداری در سطح احتمال ۱ درصد می‌باشد.

** : significant at $p \leq 0.01$

ترکیب اوره با HA، اوره را از هیدرولیز سریع حفظ کرده و در نتیجه منجر به رهاسازی کنترل شده اوره و تأمین تدریجی و مداوم نیتروژن برای گیاه می‌شود (Dong and Yuan, 2009).

از سوی دیگر، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019) مشاهده کردند که کاربرد HA در کنار اوره، کارایی مصرف کود نیتروژن را افزایش داده و هدررفت نیتروژن را کاهش داد. لیانگ و همکاران (Liang et al., 1999) نیز نشان دادند که گروه آسیل آمینو^۱ (N-) اوره نقش مهمی در تشکیل کمپلکس بسیار پایدار U-HA دارد.

1- Acylamino

ویژگی‌های فیزیولوژیک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر تیمارها بر همه ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاه مرزه در سطح احتمال ۱ درصد معنادار بود (جدول ۶).

غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و نیترات در بخش هوایی و ریشه

اثر تیمارهای مورد مطالعه بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و نیترات در بخش هوایی مرزه در شکل ۲ مشاهده می‌شود. در همه گروه‌های تیماری، درصد نیتروژن بخش هوایی گیاه مرزه با افزایش سطح نیتروژن یک روند افزایشی را نشان داد. بیش‌ترین و کم‌ترین درصد نیتروژن به ترتیب مربوط به تیمارهای U_3 (۴/۵ درصد) و شاهد (۱/۰ درصد) بود. بعد از تیمار U_3 ، بیش‌ترین درصد نیتروژن متعلق به تیمارهای U_3NHA_3 (۴/۲ درصد) و NHA_3 (۳/۵ درصد) بود. برتری تیمار تلفیقی UNHA نسبت به NHA در سطوح دوم و اول نیتروژن نیز دیده می‌شود. بر این اساس، NHA در تلفیق با اوره توانسته کارایی مصرف نیتروژن را بهبود بخشد (Mazumdar et al., 1988). با این حال، در سطوح سوم و دوم نیتروژن، اوره بر تیمار تلفیقی UNHA برتری داشته و در سطح اول نیتروژن نیز تفاوت معنی‌دار نبود. به علاوه، درصد نیتروژن بخش هوایی در تیمارهای NHA (۲/۳۵ درصد) بیش‌تر از تیمارهای HA (۱/۳۳ درصد) بود (شکل ۲-a). با این حال، نجفی وفا و همکاران (Najafi Vafa et al., 2020) بیش‌ترین غلظت نیتروژن بخش هوایی گیاه مرزه را در بالاترین سطح HA به میزان ۰/۱۲۱ درصد وزن تر و کم‌ترین آن را در تیمار شاهد به میزان ۰/۰۲۳ درصد وزن تر مشاهده کردند. ریزک و همکاران (Rizk et al., 2013) نیز غلظت نیتروژن برگ سیب‌زمینی را در تیمار تلفیقی U+HA (۱/۶۱ درصد) بیش‌تر از تیمار اوره به‌تنهایی (۱/۳۴ درصد) گزارش کردند. همچنین، نتایج سانگ و همکاران (Song et al., 2022) حاکی از افزایش ۲۰/۱ تا ۲۸/۴ درصدی نیتروژن کل گیاه ذرت با اعمال تیمار تلفیقی UHA در مقایسه با اوره به‌تنهایی بود.

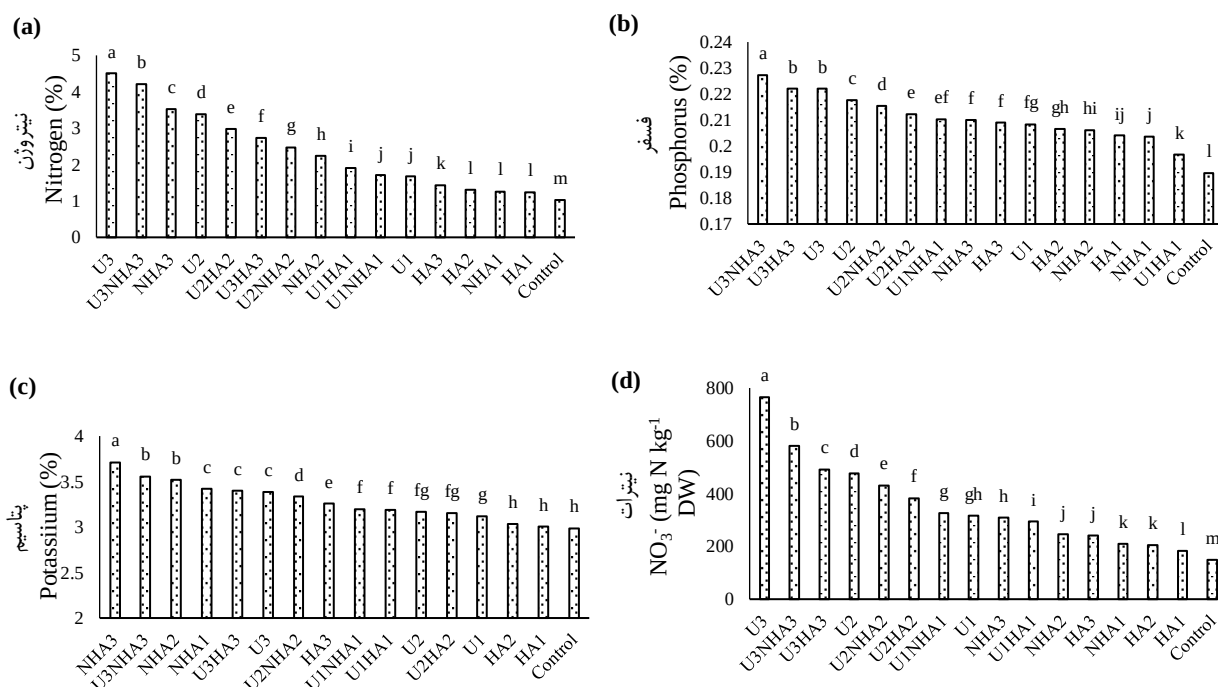
درصد فسفر بخش هوایی مرزه در تیمارهای مختلف در شکل ۲-b نشان داده شده است. بیش‌ترین درصد فسفر مربوط به تیمار U_3NHA_3 (۰/۲۳ درصد) بود. تیمارهای U_3 و U_3HA_3 بعد از این تیمار قرار داشتند. تیمار شاهد نیز کم‌ترین (۰/۱۹ درصد) درصد فسفر را نشان داد. ریزک و همکاران (Rizk et al., 2013) غلظت فسفر برگ سیب‌زمینی را در تیمار تلفیقی U+HA (۰/۳۶ درصد) بیش‌تر از تیمار اوره به‌تنهایی (۰/۲۵ درصد) گزارش کردند. افزایش جذب فسفر در سطح سوم تیمارهای UNHA و UHA در مقایسه با تیمار اوره می‌تواند ناشی از نقش HA در جلوگیری از تثبیت فسفر در خاک و یا تشکیل کمپلکس‌های هیوموفسفو^۱ باشد که به راحتی به وسیله گیاه جذب

می‌شوند (Raina and Goswami, 1988). همان‌طور که در شکل ۲-b ملاحظه می‌شود، با افزایش سطح نیتروژن، درصد فسفر گیاه مرزه نیز افزایش پیدا کرد که می‌تواند به دلیل روابط سینرژستی بین نیتروژن و فسفر باشد (Rietra et al., 2017).

بیش‌ترین غلظت پتاسیم در تیمارهای NHA_3 (۳/۷۱ درصد) و U_3NHA_3 (۳/۵۶ درصد) و کم‌ترین آن در تیمار شاهد (۲/۹۹ درصد) مشاهده شد (شکل ۲-c). غلظت پتاسیم در تیمارهای NHA (۳/۵۵ درصد) بیش‌تر از تیمارهای HA (۳/۱۰ درصد) بود. همچنین همانند فسفر، با افزایش سطح نیتروژن در تیمارها، درصد پتاسیم گیاه نیز افزایش پیدا کرد. نجفی وفا و همکاران (Najafi Vafa et al., 2020) بیش‌ترین غلظت پتاسیم در گیاه مرزه را در بالاترین سطح HA به میزان ۵۳/۷ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم وزن تر گیاه و کم‌ترین آن را در تیمار شاهد به میزان ۴۱/۹۵ میلی گرم پتاسیم در کیلوگرم وزن تر گیاه مشاهده کردند. ریزک و همکاران (Rizk et al., 2013) نیز غلظت پتاسیم برگ سیب‌زمینی را در تیمار تلفیقی UHA (۰/۵۶۵ درصد) بیش‌تر از تیمار اوره به‌تنهایی (۰/۴۵۵ درصد) گزارش کردند.

غلظت نیترات بخش هوایی مرزه در شکل ۲-d نشان داده شده است. ترتیب تیمارها در غلظت نیترات تقریباً مشابه با غلظت نیتروژن بود (شکل ۲-a). مشابه با نیتروژن، تیمارهای U_3 (۷۶۵/۹ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک) و شاهد (۱۴۸/۷ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک) به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت نیترات را نشان دادند. با افزایش سطح نیتروژن در تیمارهای مختلف غلظت نیترات نیز افزایش پیدا کرد. از سوی دیگر، سطوح دوم و سوم تیمارهای تلفیقی UNHA نسبت به این سطوح در تیمارهای اوره سبب تجمع کمتری از نیترات در بخش هوایی مرزه شدند. به طوری که میانگین شدت افزایش غلظت نیترات بخش هوایی با افزایش سطح نیتروژن در تیمارهای اوره ۱/۷۷ برابر تیمارهای تلفیقی UNHA بود. این نتایج با یافته‌های حقیقی و کافی (Haghighi and Kafi, 2010) مطابقت دارد که نشان دادند با استفاده از HA تجمع نیترات در بخش هوایی گیاه کاهش یافت. میزان جذب نیترات به وزن مولکولی و اسیدیته HA بستگی دارد (Haghighi and Kafi, 2010).

در واقع، HAهای با وزن مولکولی کم و گروه‌های کربوکسیل زیاد سبب افزایش جذب نیترات به وسیله گیاه می‌شوند (Piccolo et al., 1992; Cacco et al., 2000). کواگیوتی و همکاران (Quaggiotti et al., 2004) غلظت نیترات در برگ‌های گیاه ذرت تیمار شده با HA با وزن مولکولی کم را ۱۴۸/۸ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک گزارش کردند که حدود ۵۰ درصد بیش‌تر از تیمار شاهد بود.



شکل ۲- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت نیتروژن (a)، فسفر (b)، پتاسیم (c) و نیترات (d) در بخش هوایی مرزه

ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن ($p \leq 0.05$) فاقد اختلاف معنادار می‌باشند.

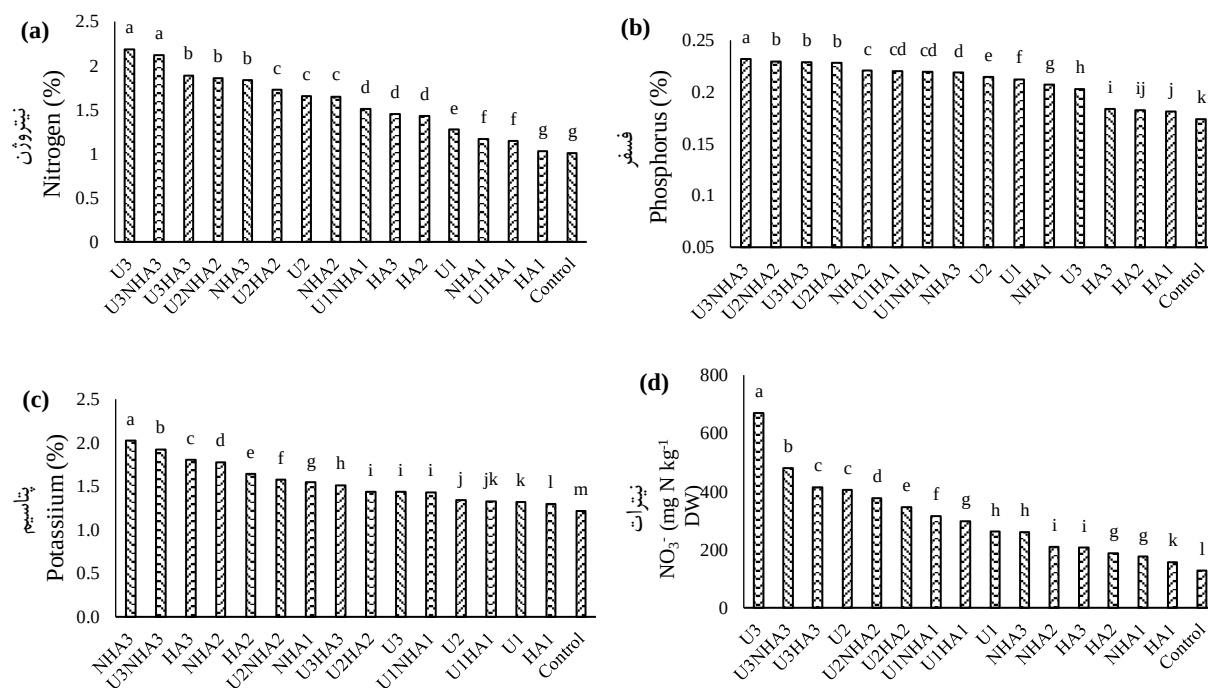
Figure 2- The effect of the experimental treatments on the concentration of nitrogen (a), phosphorus (b), potassium (c) and nitrate (d) in the Shoot of Savory plant

Columns with a same letter have no significant difference based on Duncan's mean comparison test ($p \leq 0.05$).

U₃ (۶۶۹ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک) و شاهد (۱۲۷ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک) بود. نتایج همچنین نشان دهنده افزایش غلظت نیترات در ریشه با افزایش سطح نیتروژن بود. غلظت نیترات ریشه در تیمارهای تلفیقی UHA و UNHA بیش تر از تیمارهای HA و NHA بود. مطالعات پیشین حاکی از افزایش جذب نیترات در ریشه در حضور HA بود (Quaggiotti et al., 2004)؛ (Tomasi et al., 2009). در واقع، جذب نیترات به وسیله ریشه با بهبود سیستم ریشه و افزایش نقل و انتقالات فعال در گیاه در حضور HA افزایش می‌یابد (Hernandez et al., 2015).

به طور کلی، بر اساس نتایج این مطالعه، تیمار تلفیقی UNHA جذب و انتقال عناصر غذایی را افزایش داد که می‌تواند ناشی از اثرات مفید NHA بر بهبود فعالیت میکروبی، ساختمان خاک و ظرفیت تبادل کاتیونی باشد. در واقع، NHA نگهداری عناصر غذایی را افزایش داده و از این رو سبب می‌شود تا رهاسازی آن‌ها در محلول خاک آهسته تر شود (Patti et al., 1992).

اثر تیمارهای مختلف بر غلظت نیتروژن، فسفر، پتاسیم و نیترات در ریشه گیاه مرزه در شکل ۳ نشان داده شده است. بیشترین غلظت نیتروژن متعلق به تیمار U₃ (۲/۱۸ درصد) بود که با تیمار U₃NHA₃ (۲/۱۲ درصد) تفاوت معناداری نداشت. به علاوه، کمترین درصد نیتروژن ریشه در تیمار شاهد (۱ درصد) مشاهده شد که از این نظر تفاوت معناداری با تیمار HA₁ (۱/۰۳ درصد) نداشت (شکل ۳-a). کمترین درصد فسفر ریشه در تیمار شاهد (۰/۱۹ درصد) و بیشترین آن در تیمار U₃NHA₃ (۰/۲۳ درصد) مشاهده شد. به علاوه، درصد فسفر در تیمارهای ترکیبی بیشتر از سایر تیمارها بود (شکل ۳-b). بیشترین درصد پتاسیم نیز در تیمار NHA₃ (۲/۰۲ درصد) مشاهده شد (شکل ۳-c). در تیمار شاهد نیز کمترین درصد پتاسیم (۱/۲۲ درصد) مشاهده شد. همانند بخش هوایی، افزایش سطح نیتروژن تأثیر مثبتی بر افزایش درصد پتاسیم ریشه نشان داد. همچنین، تیمارهای NHA در مقایسه با تیمارهای HA، از درصد فسفر و پتاسیم ریشه بالاتری برخوردار بودند. بیشترین و کمترین غلظت نیترات ریشه به ترتیب مربوط به تیمار



شکل ۳- اثر تیمارهای آزمایشی بر غلظت نیتروژن (a)، فسفر (b)، پتاسیم (c) و نیترات (d) در ریشه مرزه

ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن ($p \leq 0.05$) فاقد اختلاف معنادار می‌باشند.

Figure 3- The effect of the experimental treatments on the concentration of nitrogen (a), phosphorus (b), potassium (c) and nitrate (d) in the root of savory plant

Columns with same letter have no significant difference based on Duncan's mean comparison test ($p \leq 0.05$).

درصد افزایش داد. دابینگ و همکاران (Da-Bing *et al.*, 2012) گزارش کردند که HA دارای خاصیت شبه اکسینی بوده و از این رو سبب افزایش غلظت کلروفیل در گیاه خیار می‌شود. به علاوه، HA سبب افزایش فعالیت آنزیم رویسکو می‌شود که وجودش در واکنش‌های تاریکی فتوسنتز ضروری است (Amini *et al.*, 2018). فررا و برونیتی (Ferrara and Brunetti, 2010) نیز معتقدند که HA سنتز کلروفیل را افزایش داده و یا تخریب آن را به تأخیر می‌اندازد.

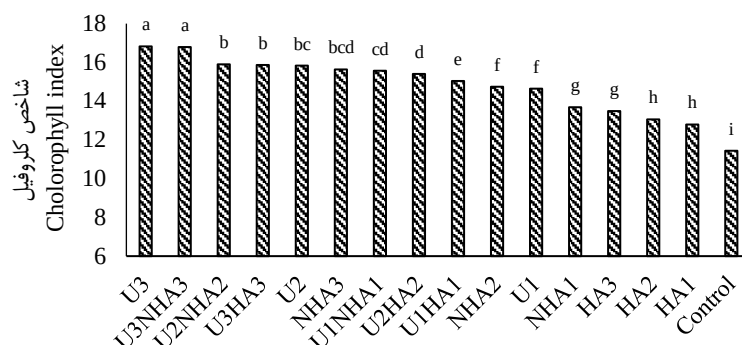
فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز

اثر تیمارهای مختلف بر فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز بخش هوایی و ریشه گیاه مرزه در شکل ۵ نشان داده شده است. بیش‌ترین و کم‌ترین فعالیت این آنزیم در بخش هوایی مرزه به ترتیب ۳/۹۵ و ۱/۰۷ میکرومول نیتريت در گرم وزن تازه بافت در ساعت و مربوط به تیمارهای U3NHA3 و U3 بود. تیمار U3 بعد از تیمار U3NHA3 بیش‌ترین فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز را دارا بود. به علاوه، فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در تیمارهای NHA بیش‌تر از تیمارهای HA بود (شکل ۵-ا).

شاخص کلروفیل

مقایسه میانگین تیمارها نشان داد که بیش‌ترین شاخص کلروفیل مربوط به تیمار U3 (۱۶/۸۳) بود که با تیمار U3NHA3 (۱۶/۸) تفاوت معناداری نداشت (شکل ۴). کم‌ترین شاخص کلروفیل (۱۱/۴۳) نیز در تیمار شاهد مشاهده شد. در همه تیمارها با افزایش سطح تیمار، شاخص کلروفیل نیز افزایش پیدا کرد. با این حال، تیمارهای HA1 و HA2 تفاوت معناداری با هم نداشتند. همچنین، شاخص کلروفیل در تیمارهای NHA (۱۴/۷) بیش‌تر از تیمارهای HA (۱۳/۱) بود که نشان‌دهنده اثرات بهتر NHA نسبت به HA بر عملکرد فتوسنتزی گیاه مرزه بود. بر مبنای شاخص کلروفیل، در سطح اول نیتروژن، هر دو تیمار UNHA و UHA برتری داشتند. در حالی که، در سطح دوم نیتروژن، فقط تیمار UNHA بر U برتری داشت. در سطح سوم نیتروژن، هیچ یک از این دو تیمار بر U برتری نداشتند.

در پژوهش‌های پیشین اثرات مثبت کاربرد HA بر میزان کلروفیل برگ مرزه گزارش شده است (Sabouri *et al.*, 2018; Zaremanesh, 2022; Song *et al.*, 2022; Yadegari, 2022). سانگ و همکاران (Song *et al.*, 2022) نشان دادند که تیمار تلفیقی U+HA در مقایسه با تیمار اوره به تنهایی شاخص کلروفیل برگ گیاه ذرت را به میزان ۵/۰ تا ۲۴/۳

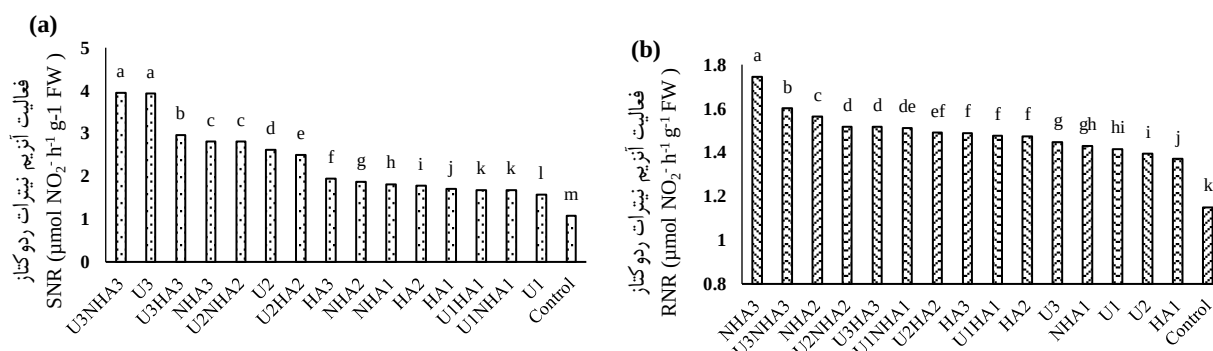


شکل ۴- اثر تیمارهای آزمایشی بر شاخص کلروفیل برگ

ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون مقایسه میانگین دانکن ($p \leq 0.05$) فاقد اختلاف معنادار می‌باشند.

Figure 4- Effect of the experimental treatments on the leaf chlorophyll index

Columns with a same letter have no significant difference based on Duncan's mean comparison test ($p \leq 0.05$).



شکل ۵- اثر تیمارهای آزمایشی بر فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در (a) بخش هوایی (SNR) و (b) ریشه (RNR) مرزه

ستون‌های دارای حرف مشترک بر اساس آزمون دانکن ($p \leq 0.05$) فاقد اختلاف معنادار می‌باشند.

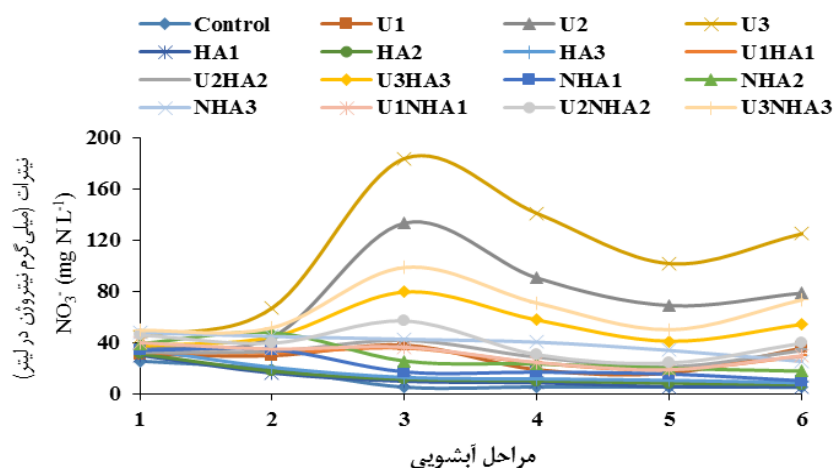
Figure 5- Effect of the experimental treatments on the nitrate reductase (NR) enzyme concentration in the shoot (a) and root (b) of savory plant

Columns with the same letter have no significant difference based on the Duncan's test ($p \leq 0.05$).

آنزیم در ریشه مرزه شدند. این امر نشان‌دهنده نقش این مواد در تسریع تبدیل نیترات به آمونیوم و ممانعت از تجمع آن در گیاه است (Haghighi and Kafi, 2010). در مجموع، میانگین فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در ریشه مرزه ۳۵/۷ درصد کمتر از بخش هوایی بود که توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Mehta and Srivastava, 1980). فعالیت این آنزیم در بخش هوایی مرزه و در تیمارهای U به میزان ۱/۲۵ برابر بیش‌تر از تیمارهای NHA بود. درحالی‌که، همین فعالیت در ریشه و در تیمارهای NHA به میزان ۱/۱ برابر بیش‌تر از تیمارهای U بود.

به‌طور کلی، بیش‌ترین فعالیت این آنزیم در تیمارهایی مشاهده شد که بیش‌ترین غلظت نیترات را دارا بودند (شکل ۲-د) که این موضوع توسط سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است (Hernandez et al., 2015; Khan et al., 2019).

بیش‌ترین و کم‌ترین فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز در ریشه مرزه به‌ترتیب ۱/۷۴ و ۱/۱۵ میکرومول نیتريت در گرم وزن تر در ساعت بود که در تیمارهای NHA₃ و شاهد مشاهده شد (شکل ۵-ب). بر اساس گزارش‌ها، فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز ریشه یک شاخص مهم برای تعیین توانایی گیاه در همگون‌سازی^۱ نیتروژن است (Taghavi and Babalar, 2007). با توجه به شکل ۵-ب می‌توان نتیجه‌گیری کرد که به‌طور کلی، ترکیبات HA و به‌ویژه NHA سبب افزایش فعالیت این



شکل ۶- غلظت نیترات در آبشویه تیمارهای آزمایشی در مراحل مختلف آبشویی

Figure 6-Nitrate concentration in the leachate of experimental treatments at different leaching steps

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، محتوای نیتروژن HA استخراج شده از لئوناردیت و نیز اسیدیته کل و گروه های کربوکسیل و هیدروکسیل فنلی آن از طریق فرآیند نیترودار کردن ارتقا داده شد و اثر NHA تولید شده بر برخی ویژگی های مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه دارویی مرزه و آبشویی نیترات در مقایسه با تیمارهای اوره به تنهایی و نیز تیمارهای تلفیقی در سطوح مختلف بررسی گردید. نتایج نشان داد که در مورد اغلب صفات مورفولوژیک و فیزیولوژیک گیاه، بالاترین سطح تیمار تلفیقی UNHA و گاهی بالاترین سطح تیمارهای U و UHA بهترین نتیجه را نشان دادند. تیمارهای NHA نیز اغلب مؤثرتر از تیمارهای HA بودند. علاوه بر این، میزان آبشویی نیترات در تیمارهای UNHA در مقایسه با تیمارهای اوره به حدود نصف کاهش یافت. یافته های این پژوهش حاکی از بالا بودن نیاز مرزه به نیتروژن (حتی بالاتر از ۱۲۰ میلی گرم نیتروژن در کیلوگرم وزن خشک) در کشت گلدانی بود. همچنین، پاسخ صفات مختلف به تیمارهای آزمایشی قدری متفاوت بوده ولی در مجموع تیمارهای تلفیقی UNHA و UHA نتیجه بهتری را در مقایسه با تیمارهای منفرد NHA و HA نشان دادند. علت این امر می تواند اثر مثبت HA یا NHA بر هیدرولیز تدریجی اوره و یا اثر منفی کاربرد NHA و HA به تنهایی باشد که نیاز به پژوهش های بیشتری دارد. به علاوه، برخی اثرات مثبت تلفیق NHA و اوره بر عملکرد مرزه ممکن است مربوط به ویژگی هایی از NHA و یا صفات گیاهی باشد که در این پژوهش مورد مطالعه قرار نگرفته اند. همچنین، پیشنهاد می شود که تأثیر NHA بر تغییرات اسانس و یا متابولیت های ثانویه گیاه مرزه مورد بررسی قرار گیرد.

آبشویی نیترات

غلظت نیترات آبشویه در مراحل مختلف آبشویی گلدان ها برای تیمارهای مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که بیش ترین آبشویی نیترات (۱۸۳/۷ میلی گرم نیتروژن در لیتر) در تیمارهای حاوی اوره اتفاق افتاد و با افزایش سطح نیتروژن بر غلظت نیترات آبشویه افزوده شد. به عبارت دیگر، با ۴ برابر شدن سطح نیتروژن، غلظت نیترات در آبشویه ۳/۹ برابر افزایش یافت. لیانگ و همکاران (Liang et al., 2011) نیز گزارش کردند که با ۴ برابر شدن سطح نیتروژن کود اوره مصرفی، آبشویی نیترات ۲/۳ برابر شد. در مقابل، تیمارهای فاقد اوره (HA و NHA) کم ترین میزان آبشویی نیترات را داشتند. میانگین آبشویی نیترات در تیمارهای اوره، ۳/۳ برابر تیمارهای یاد شده بود. از سوی دیگر، میانگین غلظت نیترات در آبشویه تیمار تلفیقی U_3NHA_3 نسبت به تیمار U_3 حدود ۴۰/۵ درصد کاهش یافت. این نتایج با یافته های ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019) مطابقت دارد که نشان دادند تیمار تلفیقی U+HA در مقایسه با کود اوره به تنهایی سبب افزایش ۱۱/۵ تا ۲۹/۵ درصدی جذب نیتروژن و کاهش ۱۲ تا ۳۰ درصدی تلفات نیتروژن شد. به علاوه، نتایج سانگ و همکاران (Song et al., 2022) نشان داد که کاربرد تیمار تلفیقی U+HA کارایی مصرف نیتروژن را حدود ۴۴/۷ و ۷۷/۷ درصد افزایش داد. شی و همکاران (Shi et al., 2020) کاهش ۴۴ درصدی آبشویی نیترات را با استفاده از کود اوره-بیوپچار در مقایسه با اوره به تنهایی گزارش کردند.

منابع

1. Akimbekov, N., Qiao, X., Digel, I., Abdieva, G., Ualieva, P., & Zhubanova, A. (2020). The effect of leonardite-derived amendments on soil microbiome structure and potato yield. *Agriculture*, 10(5), 147. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050147>
2. Alizadeh Sahzabi, A., Sharifi Ashorabadi, E., Shiranirad, A.H., & Abaszadeh, B. (2007). The effects of different methods and levels of using nitrogen on some quality and quantity characteristics of *Satureja hortensis* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 23(3), 416-431. (In Persian with English abstract)
3. Allison, L.E., & Moodie, C.D. (1965). Carbonates. P. 1379-1396. *Methods of soil analysis. Part, 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison.
4. Almendros, G., & Dorado, J. (1999). Molecular characteristics related to the biodegradability of humic acid preparations. *European Journal of Soil Science* 50(2): 227-236. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1999.00240.x>
5. Amini, B., Farahbakhsh, M., & Kianirad, M. (2018). Study on the effects of humic acid-urea fertilizers application on some agronomic characteristics of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Applied Soil Research*, 5(2), 31-40. (In Persian with English abstract)
6. Arvin, P. (2019). Study of different levels of nitrogen, phosphorus and potassium on physiological and morphological parameters and essential oils in savory plant (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Plant Research*, 32(2), 260-279. (In Persian with English abstract)
7. Azeem, K., Shah, S., Ahmad, N., Shah, S.T., Khan, F., Arafat, Y., Naz, F., Azeem, I., & Ilyas, M. (2015). Physiological indices, biomass and economic yield of maize influenced by humic acid and nitrogen levels. *Russian Agricultural Sciences*, 41(2), 115-119. <https://doi.org/10.3103/S1068367415020020>
8. Azizi, E., Jannati, N., & Armin, M. (2020). The effect of different levels of humic acid on some morpho-physiological traits and essential oils of garden savory (*Satureja hortensis* L.) under vermicompost application. *Journal of Plant Environmental Physiology*, 15(59), 99-112. (In Persian with English abstract)
9. Azizi, M., & Safaei, Z. (2017). The effect of foliar application of humic acid and nano fertilizer (Pharmks) on morphological traits, yield, essential oil content and yield of Black Cumin (*Nigella sativa* L.). *Journal of Horticultural Science*, 30(4), 671-680. (In Persian with English abstract)
10. Black, A.S., & Waring, S.A. (1978). Nitrate determination in an oxisol using K₂SO₄ extraction and the nitrate-specific ion electrode. *Plant and Soil*, 49(1), 207-211. <https://doi.org/10.1007/BF02149924>
11. Boral, P., Varma, A.K., & Maity, S. (2021). Nitration of Jharia basin coals, India: a study of structural modifications by XRD and FTIR techniques. *International Journal of Coal Science & Technology*, 8(5), 1034-1053. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00422-8>
12. Cacco, G., Attinà, E., Gelsomino, A., & Sidari, M. (2000). Effect of nitrate and humic substances of different molecular size on kinetic parameters of nitrate uptake in wheat seedlings. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(3), 313-320. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200006\)163:3%3C313::AID-JPLN313%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200006)163:3%3C313::AID-JPLN313%3E3.0.CO;2-U)
13. Cataldo, D.A., Maroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80.
14. Cazetta, J.O., & Villela, L.C.V. (2004). Nitrate reductase activity in leaves and stems of tanner grass (*Brachiaria radicans* Napper). *Scientia Agricola*, 61, 640-648. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162004000600012>
15. Chapman, H.D. (1965). *Cation exchange capacity*. P. 891-901. In: Black C.A. (eds) *Methods of Soil Analysis*. Soil Science Society of America, Madison.
16. Cottenie, A. (1980). *Soil and Plant Testing as a Basis of Fertilizer Recommendations*. F.A.O. Soils Bulletin, Belgium.
17. Da-Bing, X., Qiu-Jun, W., Yun-Cheng, W., Guang-Hui, Y., Qi-Rong, S., & Huang, Q. (2012). Humic-like substances from different compost extracts could significantly promote cucumber growth. *Pedosphere*, 22(6), 815-824. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60067-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60067-8)
18. Dong, L., & Yuan, H. (2009). Nitrogen incorporation into lignite humic acids during microbial degradation. *Geomicrobiology Journal*, 26(7), 484-490. <https://doi.org/10.1080/01490450903061085>
19. El-Ghamry, A.M., Abd El-Hai, K.M., & Ghoneem, K.M. (2009). Amino and humic acids promote growth, yield and disease resistance of faba bean cultivated in clayey soil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(2), 731-739.
20. Farahani, E., & Madani, H. (2014). Evaluate the usefulness of humic acid organic matter in comparison to chemical fertilizer and manure and their combination in summer savory (*Satureja hortensis* L.). *New Finding in Agriculture*, 8(4), 323-337. (In Persian with English abstract)
21. Fatima, N., Jamal, A., Huang, Z., Liaquat, R., Ahmad, B., Haider, R., Ali, M.I., Shoukat, T., Alothman Z.A., Ouladsmame, M., Ali, T., Ali S., Akhtar, N., & Sillanpää, M. (2021). Extraction and chemical characterization of

- humic acid from nitric acid treated lignite and bituminous coal samples. *Sustainability*, 13(16), 8969. <https://doi.org/10.3390/su13168969>
22. Ferrara, G., & Brunetti, G. (2010). Effects of the times of application of a soil humic acid on berry quality of table grape (*Vitis vinifera* L.) cv Italia. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(3), 817-822. <https://doi.org/10.5424/1283>
 23. Gavlak, R., Horneck, D., Miller, R.O., & Kotuby-Amacher, J. (2003). *Soil, plant and water reference methods for the western region*. WCC-103 Publication, Fort Collins, CO.
 24. Gee, G.W., & Or, D. (2002). *Particle size analysis*. P. 255-293. In: Dane J.H., Topp G.C. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
 25. Gruandwald, J., & Buttle K. (1996). The European phytotherapeutics market. *Druqs Made in Germany*, 36, 6-11.
 26. Guha, T., Gopal, G., Mukherjee, A., & Kundu, R. (2022). Fe₃O₄-urea nanocomposites as a novel nitrogen fertilizer for improving nutrient utilization efficiency and reducing environmental pollution. *Environmental Pollution*, 292: 118301. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118301>
 27. Haghighi, M., & Kafi, M. (2010). Effect of humic acid on the accumulation of cadmium, nitrate and changes of nitrate reductase activity in lettuce. *Journal of Horticultural Science*, 24(1), 53-58. (In Persian with English abstract)
 28. Hernandez, O.L., Calderín, A., Huelva, R., Martínez-Balmori, D., Guridi, F., Aguiar, N.O., Olivares, F.L., & Canellas, L.P. (2015). Humic substances from vermicompost enhance urban lettuce production. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), 225-232. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0221-x>
 29. Huang, B., Liu, G., Wang, P., Zhao, X., & Xu, H. (2019). Effect of nitric acid modification on characteristics and adsorption properties of lignite. *Processes*, 7(3), 167. <https://doi.org/10.3390/pr7030167>
 30. Jones, J.B. (2001). *Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis*. CRC press. New York.
 31. Ju, K.S., & Parales, R.E. (2010). Nitroaromatic compounds, from synthesis to biodegradation. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 74(2), 250-272. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00006-10>
 32. Kalaichelvi, K., Chinnusamy, C., & Swaminathan, A.A. (2006). Exploiting the natural resource-lignite humic acid in agriculture-a review. *Agricultural Reviews*, 27(4), 276-283.
 33. Karamian, Z., Nasirzadeh, A., & Mohseli, V. (2012). *Effect of nitrogen on yield, essential oil and extract of savory plant*. 12th Soil Science Congress, 3 September 2011. Iranian Soil Science Society, Tabriz, Iran. (In Persian)
 34. Keeney, D.R., & Nelson, D.W. (1982). *Nitrogen: inorganic forms*. P. 643-698. In: Page A.L., Miller R.H., Keeney D.R. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Soil Science Society of America, Madison.
 35. Khan, S.A., Khan, S.U., Qayyum, A., Gurmani, A.R., Khan, A., Khan, S.M., Ahmed, W., Mehmood, A., & Amin, B.A.Z. (2019). Integration of humic acid with nitrogen yields an auxiliary impact on physiological traits, growth and yield of maize (*Zea mays* L.) varieties. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 6783-6799. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1703_67836799
 36. Klute, A., & Dirksen, C. (1986). *Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods*. P. 687-734. In: Klute A. (eds). *Method of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c28>
 37. Kong, B., Wu, Q., Li, Y., Zhu, T., Ming, Y., Li, C., Wang, F., Jiao, Sh., Shi, L., & Dong, Z. (2022). The Application of Humic Acid Urea Improves Nitrogen Use Efficiency and Crop Yield by Reducing the Nitrogen Loss Compared with Urea. *Agriculture*, 12(12), 1996. <https://doi.org/10.3390/agriculture12121996>
 38. Kuo, S. (1996). *Phosphorus*. P. 869-919. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T., Sumner M.E. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison.
 39. Li, X., She, D., Zhao, P., Jin, H., Jia, T., Zhou, H., & Zheng, J. (2022). Facile synthesis a potential nitrogen-enriched weathered coal fertilizer: excellent slow-release performance and improving plant quality. *Waste and Biomass Valorization*, 13(12), 4685-4700. <https://doi.org/10.1007/s12649-022-01778-x>
 40. Liang, X.Q., Xu, L., Li, H., He, M. M., Qian, Y.C., Liu, J., Nie, Z.Y., Ye, Y.S., & Chen, Y. (2011). Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(9-11), 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.017>
 41. Liang, Z.C., Cheng, S.X., & Wu, L. (1999). Study on mechanism of interaction between coal humic acid and urea. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 27(2), 176-181.
 42. Luo, Y., Liang, J., Zeng, G., Chen, M., Mo, D., Li, G., & Zhang, D. (2018). Seed germination test for toxicity evaluation of compost: Its roles, problems and prospects. *Waste Management*, 71, 109-114. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.09.023>
 43. Makkizadeh, M., Chaichi, M., Nasrollahzadeh, S., & Khavazi, K., (2012). Effect of different types of nitrogen fertilizers on quantitative and qualitative characteristics of *Satureja hortensis* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 28(2), 330-341. (In Persian with English abstract).

44. Malcolm, R.E., & Vaughan, D. (1979). Effects of humic acid fractions on invertase activities in plant tissues. *Soil Biology and Biochemistry*, 11(1), 65-72. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(79\)90120-2](https://doi.org/10.1016/0038-0717(79)90120-2)
45. Mariano, E., de Sant Ana Filho, C.R., Bortoletto-Santos, R., Bendassolli, J.A., & Trivelin, P.C. (2019). Ammonia losses following surface application of enhanced-efficiency nitrogen fertilizers and urea. *Atmospheric Environment* 203: 242-25. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.003>
46. Mazumdar, B.K., Basu, S.K., & Kumar, S. (1988). Urea-coal acids combination fertiliser: some recent developments. *Urja;(India)* 23(5).
47. Mehdizadeh, L., Moghaddam, M., & Lakzian, A. (2020). Amelioration of soil properties, growth and leaf mineral elements of summer savory under salt stress and biochar application in alkaline soil. *Scientia Horticulturae* 267: 109319. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109319>
48. Mehta, P., & Srivastava, H.S. (1980). Comparative stability of ammonium-and nitrate-induced nitrate reductase activity in maize leaves. *Phytochemistry*, 19(12), 2527-2530. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)83912-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)83912-6)
49. Najafi Vafa, Z., Sohrabi, Y., & Samir, Z. (2020). Humic acid and nano Zn chelated fertilizer regulates nutrient uptake and growth and production of summer savory. *Journal of Biology and Nature*, 5-15.
50. Nasir, S., Sarfaraz, T.B., Verheyen, T.V., & Chaffee, A.L. (2011). Structural elucidation of humic acids extracted from Pakistani lignite using spectroscopic and thermal degradative techniques. *Fuel Processing Technology*, 92(5), 983-991. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.12.020>
51. Naz, M.Y., & Sulaiman, S.A. (2016). Slow release coating remedy for nitrogen loss from conventional urea: a review. *Journal of Controlled Release*, 225, 109-120. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.01.037>
52. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. P. 961-1010. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T., Sumner M.E. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
53. Ozkan, S., & Ozkan, S.G. (2017). Investigation of humate extraction from lignites. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 37(6), 285-292. <https://doi.org/10.1080/19392699.2016.1171761>
54. Pansu, M., & Gautheryou, J. (2007). *Handbook of Soil Analysis: Mineralogical, Organic and Inorganic Methods*. Springer Science & Business Media.
55. Patti, A.F., Verheyen, T.V., Douglas, L., & Wang, X. (1992). Nitrohumic acids from Victorian brown coal. *Science of the Total Environment*, 113(1-2), 49-65. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(92\)90016-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(92)90016-L)
56. Piccolo, A., Nardi, S., & Concheri, G. (1992). Structural characteristics of humic substances as related to nitrate uptake and growth regulation in plant systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(4), 373-380. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(92\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90197-6)
57. Quaggiotti, S., Ruperti, B., Pizzeghello, D., Francioso, O., Tugnoli, V., & Nardi, S. (2004). Effect of low molecular size humic substances on nitrate uptake and expression of genes involved in nitrate transport in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Experimental Botany*, 55(398), 803-813. <https://doi.org/10.1093/xb/erh085>
58. Raina, J.N., & Goswami, K.P. (1988). Effect of fulvic acid and fulvates on the growth and nutrient uptake by maize plant. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 36, 264-268.
59. Rietra, R.P., Heinen, M., Dimkpa, C.O., & Bindraban, P.S. (2017). Effects of nutrient antagonism and synergism on yield and fertilizer use efficiency. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(16), 1895-1920. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1407429>
60. Riley, J.P., & Sinhaseni, P. (1957). The determination of ammonia and total ionic inorganic nitrogen in sea water. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 36(1), 161-168. <https://doi.org/10.1017/S0025315400017161>
61. Rizk, F.A., Shaheen, A.M., Singer, S.M., & Sawan, O.A. (2013). The productivity of potato plants affected by urea fertilizer as foliar spraying and humic acid added with irrigation water. *Middle East Journal of Agriculture Research*, 2(2), 76-83.
62. Sabouri, F., Sirousmehr, A., & Gorgini Shabankareh, H. (2018). Effect of irrigation regimes and application of humic acid on some morphological and physiological characteristics of savory (*Satureja hortensis* L.). *Iranian Journal of Plant Biology*, 9(4), 13-24. (In Persian with English abstract)
63. Shi, W., Ju, Y., Bian, R., Li, L., Joseph, S., Mitchell, D.R., Munroe, P., Taherymoosavi, S., & Pan, G. (2020). Biochar bound urea boosts plant growth and reduces nitrogen leaching. *Science of the Total Environment*, 701, 134424.
64. Skubij, N., & Dzida, K. (2019). Influence of nitrogen dose and harvesting date on the yield and biological value of raw garden savory (*Satureja hortensis* L.) of Saturn cv. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 18, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134424>
65. Song, X., Guo, W., Xu, L., & Shi, L. (2022). Beneficial effect of humic acid urea on improving physiological characteristics and yield of maize (*Zea mays* L.). *Acta Physiologiae Plantarum*, 44(7), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03401-x>
66. Standard, A.S.T.M. (2011). *Annual Book of ASTM Standards*. Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal

- and Coke.
67. Stewart, G.R., Lee, J.A., & Orebamjo, T.O. (1973). Nitrogen metabolism of halophytes II. Nitrate availability and utilization. *New Phytologist*, 72(3), 539-546. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1973.tb04405.x>
68. Swift, R.S. (1996). *Organic matter characterization*. P. 1011-1069. In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T., Sumner M.E. (eds) *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>
69. Syahren, A.M., & Wong, N.C. (2008). Extraction and chemical characteristics of nitro-humic acids from coals and composts. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 36(2), 269-279.
70. Taghavi, T.S., & Babalar, M. (2007). The effect of nitrate and plant size on nitrate uptake and in vitro nitrate reductase activity in strawberry (*Fragaria × ananassa* cv. Selva). *Scientia Horticulturae*, 112(4), 393-398. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.01.002>
71. Thorn, K.A., & Cox, L.G. (2016). Nitrosation and nitration of fulvic acid, peat and coal with nitric acid. *Plos One*, 11(5), e0154981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154981>
72. Tomasi, N., Monte, R., Rizzardo, C., Venuti, S., Zamboni, A., Cesco, S., Pinton, R., & Varanini, Z. (2009). *Effects of water-extractable humic substances on molecular physiology of nitrate uptake in two maize inbred lines with different nitrogen use efficiency*. The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. Department of Plant Sciences, University of California, Davis, CA.
73. Trenkel, T. (2021). *Slow-and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture*. International Fertilizer Industry Association (IFA).
74. Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>
75. Vendrell, P.F., & Zupancic, J. (1990). Determination of soil nitrate by transnitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21(13-16), 1705-1713. <https://doi.org/10.1080/00103629009368334>
76. Wallinga, I., Van Vark, W., Houba, V.J.G., & Van der Lee, J.J. (1989). *Soil and plant analysis*, series of syllabi part 7, Plant analysis procedure. Wageningen Agriculture University, Wageningen.
77. Wang, D., Chen, X., Tang, Z., Liu, M., Jin, R., Zhang, A., & Zhao, P. (2022). Application of humic acid compound fertilizer for increasing sweet potato yield and improving the soil fertility. *Journal of Plant Nutrition*, 45(13), 1933-1941. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046064>
78. Westerman, R.L. (1990). *Soil testing and plant analysis*. 3rd editio. Soil Science Society of America, Madison. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2046064>
79. Yadegari, M. (2022). Effects of NPK, botamisol, and humic acid on morphophysiological traits and essential oil of three *Satureja* species under drought stress. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, 38(1), 61-80. (In Persian with English abstract)
80. Yan, L., Ya-fu, T., Yue-chao, Y., Yuan-mao, J., & Dong-dong, CH. (2022). Effects of large-grained activated humic acid fertilizer on soil aggregates and organic carbon in apple orchard soil. *Yingyong Shengtai Xuebao*, 33(4), <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202204.012>
81. Zare, SH., Sirousmehr, A., Ghanbari, A., & Tabatabaei, S.J. (2013). The effect of different rates of municipal compost and n fertilizer on the essential oil and some vegetative characteristics of summer savoury (*Satureja hortensis* L.). *Iranian Journal of Field Crops Reseach*, 11(1), 191-199. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/GSC.V11I1.24129>
82. Zaremanesh, H., Eisvand, H.R., Akbari, N., Ismaili, A., & Feizian, M. (2022). The effect of humic acid on germination indices and some growth traits of Khuzestani savory (*Satureja khuzistanica*, Jamzad) Andimeshk's ecotype under salinity stress. *Seed Science and Technology*, 10(4), 149-161. (In Persian with English abstract)
83. Zhang, S.Q., Liang, Y., Wei, L., Lin, Z., Li, Y.T., Hu, S.W., & Zhao, B.Q. (2019). Effects of urea enhanced with different weathered coal-derived humic acid components on maize yield and fate of fertilizer nitrogen. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 656-666. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61950-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61950-1)

Contents

Effect of Irrigation Management on Water Productivity Indicators of Alfalfa	165
H. Ojaghlo, F. Ojaghlo, M.M. Jafari, F. Misaghi, B. Nazari, E. Karami Dehkordi	
Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain)	187
M. Goodarzi, J. Ghadbeiklou, A. Ghadiri, M.A. Khodshenas	
The Effect of Magnetized Saline Water on Yield and Yield Components of Strawberry (<i>Fragaria ananassa</i> cv. Silva)	203
M. Khoshraresh, M. Pourgholam-Amiji, F. Emami Ghara	
Spatial Monitoring of Wind Erosion and Some Heavy Metals in Suspended Load of Tabas City	219
H. Emami, M. Memarzadeh	
The Effect of Combined Use of Vermicompost and Poultry Manure on the Growth and Yield of Cucumber Plants in Different Conditions of Deficit Irrigation	237
M. Behdarnejad, H. Piri, M. Delbari	
Study on Simultaneous Colonization of <i>Rhizophagus irregularis</i> and <i>Serendipita indica</i> in Barley under Different P Levels Using Monoclonal Antibody	216
V. Dinmohammadi, N. Aliasgharzad, L. Aghebati-Maleki	
Evaluation of Nutritional Status of Quince Trees (<i>Cydonia oblonga</i> Mill.) by Compositional Nutrient Diagnosis Method (CND) in Isfahan Province	281
A. Gandomkar Deligani, Z. Khanmohammadi, M. Basirat	
The Effect of Time and Wetting-Drying Cycles on Durability of Mulches in Soil to Control Wind Erosion	295
F. Nooralivand, A. Farrokhian Firouzi	
Digital Mapping of Surface and Subsurface Soil Organic Carbon and Soil Salinity Variation in a Part of Qazvin Plain (Case Study: Abyek and Nazarabad Regions)	315
G. Rezaie, F. Sarmadian, A. Mohammadi Torkashvand, J. Seyedmohammadi, M. Marashi Aliabadi	
Effect of Nitrohumic Acid Application on Some Morphological and Physiological Characteristics of Savory Plant (<i>Satureja hortensis</i> L.)	333
M. Mirzaei Varoei, Sh. Oustan, A. Reyhanitabar, N. Najafi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 2

2023

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabrzi University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).