

آب و خاک

نشریه

(علوم و صنایع کشاورزی)

شماره پیاپی ۹۲

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

عنوان مقالات

- برآورد تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی و باغی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای
مطالعه موردی: حوزه پایین دست سد فریمان..... ۸۳۱
علیرضا نوری - جواد امیدوار - فرشته مدرسی - کامران داوری - سمیرا نوری - علی اسدی
- پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوزه آبخیز فامنات، استان گیلان..... ۸۴۳
فهیمة میرچولی - عیسی غلامی - مهدی بروغنی
- کاربرد روش تاپسیس در بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه آجی‌چای)..... ۸۵۷
ندا جعفری - یعقوب دین‌پژوه
- تأثیر کمپوست برخی پسماندها و بقایای کشاورزی در دو کشت متوالی اسفناج: ۱- پاسخ شناسه‌های
حاصلخیزی خاک، جذب عناصر غذایی و عملکرد گیاه..... ۸۷۳
خدیجه سالاری نیک - محسن نائل
- تأثیر اسید هیومیک همراه با آب آبیاری بر کارایی کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی
عناصر غذایی معدنی گیاه ذرت..... ۸۹۳
محمد امارلو - محمد حشمتی رفسنجانی - محسن حمیدپور
- اثر محلول پاشی سولفات آهن و روی بر عملکرد علوفه و غلظت آهن و روی در ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.)..... ۸۹۳
کوثر اسدی - مجتبی بارانی مطلق - سید علیرضا موحدی نائینی - طالب نظری
- نقشه‌برداری رقومی اجزای بافت خاک با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و متغیرهای محیطی..... ۹۲۵
پگاه خسروانی - مجید باقرنژاد - سید علی اکبر موسوی - سید رشید فلاح شمسی
- تأثیر پلاسماي سرد بر عملکرد و غلظت آهن و روی در ذرت (*Zea mays* L.)..... ۹۴۵
بصیر عطاردی - مهدی زنگی آبادی
- تغییر شکل‌های فسفر خاک تحت تأثیر لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در دو شرایط شور و غیر شور..... ۹۵۹
حدیث حاتمی - حسین پرویزی - امیر پرنیان - غلامحسین رنجبر
- مدل‌سازی بارش - رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری خرم‌ازرد و بناب با استفاده از الگوریتم ماشین بردار
پشتیبان و جنگل تصادفی..... ۹۷۳
زینب بیگدلی - ابوالفضل مجنونی هریس - رضا دلیر حسن‌نیا - سپیده کریمی

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۷ شماره ۶ بهمن-اسفند سال ۱۴۰۲

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سرمدیر:

امیر فتوت

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین

استاد- علوم خاک (دانشگاه تبریز)

بذرافشان، جواد

دانشیار- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

تقوئیان، صالح

استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

خراسانی، رضا

دانشیار- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

خرمائی، فرهاد

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

علیزاده، امین

استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

فتوت، امیر

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

قدیری، حسین

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

لکزیان، امیر

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

لیاقت، عبدالمجید

استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

مساعدی، ابوالفضل

استاد- آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

موسوی بایگی، محمد

استاد- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jswa3@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 (شش شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۸۳۱ برآورد تغییرات سطح زیر کشت محصولات زراعی و باغی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای
مطالعه موردی: حوضه پایین دست سد فریمان
علیرضا نوری - جواد امیدوار - فرشته مدرسی - کامران داوری - سمیرا نوری - علی اسدی
- ۸۴۳ پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوزه آبخیز فامنات، استان گیلان
فهیمة میرچولی - عیسی غلامی - مهدی بروغنی
- ۸۵۷ کاربرد روش تاپسیس در بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه آجی‌جای)
ندا جعفری - یعقوب دین‌پژوه
- ۸۷۳ تأثیر کمپوست برخی پسماندها و بقایای کشاورزی در دو کشت متوالی اسفناج: ۱- پاسخ شناسه‌های حاصلخیزی خاک، جذب عناصر غذایی و عملکرد گیاه
خدیجه سالاری نیک - محسن نائل
- ۸۹۳ تأثیر اسید هیومیک همراه با آب آبیاری بر کارایی کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی عناصر غذایی معدنی گیاه ذرت
محمد امارلو - محمد حشمتی رفسنجانی - محسن حمیدپور
- ۹۰۹ اثر محلول‌پاشی سولفات آهن و روی بر عملکرد علوفه و غلظت آهن و روی در ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.)
کوثر اسدی - مجتبی بارانی مطلق - سید علیرضا موحدی نائینی - طالب نظری
- ۹۲۵ نقشه‌برداری رقومی اجزای بافت خاک با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و متغیرهای محیطی
پگاه خسروانی - مجید باقرنژاد - سید علی اکبر موسوی - سید رشید فلاح شمسی
- ۹۴۵ تأثیر پلاسمای سرد بر عملکرد و غلظت آهن و روی در ذرت (*Zea mays* L.)
بصیر عطاردی - مهدی زنگی آبادی
- ۹۵۹ تغییر شکل‌های فسفر خاک تحت تأثیر لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در دو شرایط شور و غیر شور
حدیث حاتمی - حسین پرویزی - امیر پرنیان - غلامحسن رنجبر
- ۹۷۳ مدل‌سازی بارش - رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری خرمازرد و بناب با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی
زینب بیگدلی - ابوالفضل مجنونی هریس - رضا دلیر حسن‌نیا - سپیده کریمی



Estimating the Changes in the Agricultural Lands Using Satellite Images Case Study: Fariman Dam Downstream Basin

A. Nouri¹, J. Omidvar², F. Modaresi^{3*}, K. Davari⁴, S. Nouri⁵, A. Asadi⁶

1- M.Sc, Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
2, 3, 4, 5 and 6- Ph.D Student, Assistant Professor, Professor, Ph.D in Agrometeorology and M.Sc, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.
(* - Corresponding Author Email: Fmodaresi@um.ac.ir)

Received: 27-06-2023
Revised: 02-12-2023
Accepted: 03-12-2023
Available Online: 03-12-2023

How to cite this article:

Nouri, A., Omidvar, J., Modaresi, F., Davari, K., Nouri, S., & Asadi, A. (2024). Estimating the changes in the agricultural lands using satellite images Case study: Fariman dam downstream basin. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 829-840. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83163.1301>

Introduction

Limited fresh water resources and access to these resources as well as providing food security for the growing world population have led researchers to make extensive efforts in the field of optimal management of water consumption and determining the cultivation pattern in different regions. Therefore, identifying cultivated crops in a region and determining their area can be very effective in land management and water allocation in these regions. With the growth and advancement of technology in the field of satellite and remote sensing in recent decades, the use of satellite images in order to identify types of land use and types of cultivated products has expanded greatly. Sentinel-1 (radar) and Sentinel-2 (multi-spectral) satellites have been very popular in agriculture due to their improved spatial resolution (10 meters) and appropriate time resolution (5 days for Sentinel 2 and 12 days for Sentinel 1).

Materials and Methods

The studied area is located downstream of the Fariman dam in an area of 22.51 square kilometers (5122 hectares) and the central coordinates are 35 degrees 41 minutes and 59 seconds north latitude and 59 degrees 50 minutes and 49 seconds east longitude. In order to classify satellite images and produce crop maps, ground observation data is needed to train the classification model and also evaluate the accuracy of the results. For this purpose, sample points were taken from different land uses in the region, using GPS. Since it was not possible to take enough samples for all land uses and crops in the determined border, a larger sampling area was selected. Then, all collected data were sorted and for each class, 70% of the data was randomly used to train the classification model and 30% was used to validate the obtained classification results. In the present study, Sentinel 2 satellite images for the first 6 months (crop season) of 2021 and 2022 and digital elevation image (DEM) of the study area were considered. According to the surveys conducted and the reports of the agricultural jihad of Fariman city, the main crops cultivated in the region include maize, tomato, sugar beet, wheat and barley. Therefore, according to the phenological stages of these products in the region, the appropriate time series of images was selected. The accuracy of the classified map was evaluated using the Kappa coefficient and overall accuracy.

Results and Discussion

In order to identify and separate the land use in the study area according to the major cultivated crops, first the agricultural calendar of the crops was determined. Then, satellite images were selected based on crop cultivation period. Based on the evaluation indexes of commission error, omission error, overall accuracy as well as the Kappa coefficient, it was observed that the identification of classes and land use was done well and with high accuracy, so that the overall accuracy for the classification map of 2022 is equal to 0.97 and the kappa coefficient value was 0.94.



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83163.1301>

In order to compare land use changes during the two years 2022 and 2021, classification was also done for the images of the crop year 2021. Since the training samples of agricultural crops were not available separately and in sufficient numbers in the crop year of 2021, the classification map of this year was produced only based on the type of land use, and all crops in one class entered the classification model training process. The values of overall accuracy and kappa coefficient in 2021 were obtained as 0.97 and 0.95 respectively. According to the obtained results, the area of the orchard class has increased since 2021 compared to 2022. After repeated field visits to the study area and investigation of some land uses that had been changed and turned into orchard use, it was found that in some areas in 2022 there was the growth of villa gardens and in some areas the farmers have converted cropland to orchard (construction of an orchard). Even in some cases, the old orchard in the region was destroyed by the farmers and the land was fallow for 2 to 3 years (2021, fallow). In 2022, the farmer built a new orchard. It is also necessary to mention that fallow lands are included in the soil class depending on whether they are newly plowed or have no vegetation, and if weeds have grown on these lands, they are included in the rangeland class.

Conclusion

The effective management of water resources from dams for agricultural purposes necessitates the identification of land use downstream of the dams, along with determining the types of crops and their respective areas. In this study, Sentinel 2 satellite images were employed to classify and delineate land use associated with agricultural cultivation downstream of the Fariman dam in Razavi Khorasan Province, spanning the crop years of 2021 and 2022. The results indicate that the Sentinel 2 satellite demonstrates a high capacity to differentiate between various types of land use and crops. The generated map depicting changes in land use and crop cultivation areas can be instrumental in water use planning and the allocation of water resources.

Keywords: Allocation of water resources, Classification, Land use change, Land use map, Sentinel 2

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۸۴۰-۸۲۹

برآورد تغییرات سطح زیرکشت محصولات زراعی و باغی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: حوضه پایین دست سد فریمان

علیرضا نوری^۱ - جواد امیدوار^۲ - فرشته مدرسی^{۳*} - کامران داوری^۴ - سمیرا نوری^۵ - علی اسدی^۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

چکیده

مدیریت نهاده‌ها و زمین‌های کشاورزی به‌خصوص مصرف بهینه آب و تخصیص منابع آبی، نیازمند به داشتن اطلاعات دقیق از انواع کاربری و روند تغییرات آن طی سال‌های مختلف است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سنجش از دور، به‌علت ویژگی مقرون به‌صرفه بودن از نظر هزینه و زمان و در عین حال دارا بودن دقت مناسب، می‌تواند در شناسایی کاربری اراضی و تغییرات آن مورد استفاده قرار گیرد. از این رو پژوهش حاضر با هدف شناسایی و تفکیک کاربری اراضی حوضه پایین دست سد فریمان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام شده است. در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ با دقت مکانی ۱۰ متر و دقت زمانی ۵ روز و الگوریتم طبقه‌بندی جنگل تصادفی استفاده شد. یافته‌ها نشان می‌دهد ماهواره سنتینل ۲ قادر است با معیارهای دقت کلی بیش از ۰/۹۷ و ضریب کاپای بیش از ۰/۹۴، محصولات زراعی و باغی را در منطقه مورد مطالعه شناسایی و از هم تفکیک نماید. براساس نتایج به‌دست آمده، سطح زیرکشت مناطق درختکاری شده نسبت به مناطق زراعی طی سال ۱۴۰۱ افزایش یافته است. براساس بازدیدهای میدانی انجام گرفته از مناطق تغییر کاربری یافته، مشاهده شد که احداث باغ و یلاها توسط مالکان زمین‌ها و تبدیل برخی زمین‌های زراعی و آیش به باغ توسط کشاورزان، سبب افزایش سطح درختکاری در منطقه مورد مطالعه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۲ به‌منظور شناسایی، تفکیک و بررسی تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی، کارآمد و دارای دقت بالا بوده و می‌توان از نتایج به‌دست آمده در سیاست‌گذاری بهینه مصارف آب و مدیریت اراضی بهره برد.

واژه‌های کلیدی: تخصیص منابع آب، تغییر کاربری، سنتینل ۲، کاربری اراضی، طبقه‌بندی

مقدمه

تخصیص آب در مناطق مذکور شود. بنابراین می‌توان با استفاده از نقشه محصولات کشت شده در یک منطقه نسبت به تغییر و اصلاح الگوی کشت به‌طور هدفمند اقدام نمود. در این میان، تغییرات کاربری اراضی و الگوی کشتی که توسط کشاورزان و بهره‌برداران منابع آبی به‌صورت مستقل و جدا از برنامه‌های مدیریتی منطقه‌ای انجام می‌شود، می‌تواند تخصیص منابع آب را با مشکل مواجه نماید. از این رو تعیین تغییرات کاربری اراضی در هر منطقه می‌تواند به مدیران ذیربط در جهت تغییرات

محدود بودن منابع آب شیرین و دسترسی به این منابع از یک سو و از سوی دیگر تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان سبب گردیده محققان تلاش گسترده‌ای در زمینه مدیریت بهینه مصارف آب و تعیین الگوی کشت در مناطق مختلف داشته باشند. در این مسیر، شناسایی محصولات تحت کشت در یک منطقه و تعیین سطح زیرکشت این محصولات می‌تواند گام مؤثری در جهت مدیریت اراضی و

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه آگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲، ۳، ۴ و ۶- به‌ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار، استاد، فارغ‌التحصیل دکتری هوشناسی کشاورزی و فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: Fmodaresi@um.ac.ir)

الگوی مصرف آب و کاهش برداشت بی رویه از منابع آبی کمک شایانی نماید.

با رشد و پیشرفت تکنولوژی در بحث ماهواره و سنجش از دور در دهه‌های اخیر، کاربرد تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور شناسایی انواع کاربری و انواع محصولات کشت شده گسترش زیادی داشته است. ماهواره‌های سری لندست از جمله پرکاربردترین ماهواره‌ها در این زمینه بوده است. در مسیر پیشرفت تکنولوژی ماهواره‌ها، اولین ماهواره از ماهواره‌های سری سنتینل در سال ۲۰۱۴ به فضا پرتاب شد. در این میان، ماهواره‌های سنتینل ۱ (راداری) و سنتینل ۲ (چند طیفی) به‌دلیل قدرت تفکیک مکانی بهبود یافته (۱۰ متر) و قدرت تفکیک زمانی مناسب (۵ روز برای سنتینل ۲ و ۱۲ روز برای سنتینل ۱) و رایگان بودن تصاویرشان از محبوبیت زیادی در مباحث کشاورزی برخوردار شدند؛ به‌طوری‌که مطالعات زیادی در زمینه کاربرد این سری از ماهواره‌ها در اقصی نقاط دنیا انجام شده است.

اوکی و همکاران (Ok et al., 2012) با مقایسه دو روش طبقه بندی حداکثر احتمال و جنگل تصادفی و استفاده از تصاویر ماهواره اسپات ۵، دریافتند که روش جنگل تصادفی حدود ۸ درصد بهتر از روش حداکثر احتمال قادر است مناطق کشاورزی را از هم تفکیک نماید. استفاده از سری زمانی تصاویر لندست ۷ برای تفکیک محصولات زراعی و الگوریتم جنگل تصادفی در پرو نیز نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با دقت کلی ۸۱ درصد و ضریب کاپای ۰/۷ دارای عملکرد بالایی در شناسایی طبقات مختلف محصولات است (Sonobe et al., 2018). ساعی و همکاران (Saei et al., 2018) با به کارگیری تصاویر ماهواره لندست و الگوریتم جنگل تصادفی اراضی تحت کشت گندم، جو و یونجه منطقه مرودشت فارس را از هم تفکیک نمودند. یافته‌های ایشان نشان داد علی‌رغم بهبود شناسایی نواحی جو و گندم، همچنان این دو محصول به خوبی از هم تفکیک نشده‌اند. در پژوهشی که توسط کردی و همکاران (Kordi et al., 2018) در منطقه میان‌دوآب انجام شد، امکان طبقه‌بندی محصولات کشاورزی با به کارگیری تصاویر ماهواره لندست ۸ مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد استفاده از تصاویر سری زمانی در کنار شاخص‌هایی همچون GNDVI، آلبیدو و دمای سطح زمین در کنار الگوریتم ماشین بردار پشتیبان باعث شد نقشه‌هایی با دقت کلی ۹۲ درصد و ضریب کاپای ۹۱ به‌دست آید. زارع و همکاران (Zare et al., 2020) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ و سنتینل ۲ اقدام به تعیین سطح زیرکشت محصول پسته در استان یزد نمودند. طبق نتایج به‌دست آمده توسط ایشان، ماهواره سنتینل ۲ با دقت بهتری به شناسایی نواحی تحت کشت پسته پرداخته بود. همچنین ایشان بیان کردند استفاده از فیلتر میانه پس از تهیه نقشه طبقه‌بندی، منجر به افزایش دقت طبقه‌بندی گردید. سونوبی و همکاران با به کارگیری ۸۲ شاخص، امکان شناسایی و تفکیک محصولات زراعی را در منطقه‌ای در ژاپن مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد

شاخص‌های گیاهی بیشترین سهم را در شناسایی انواع محصولات کشاورزی داشته است (Sonobe et al., 2018). در زمینه اهمیت استفاده از شاخص‌های گیاهی در فرآیند طبقه‌بندی، نتایج مشابهی توسط کوبایاشی و همکاران (Kobayashi et al., 2020) گزارش شده است. کارایی تصاویر ماهواره سنتینل ۲ در شناسایی و برآورد محصولات کشت زمستانه در اوایل رشد این محصولات توسط تیان و همکاران (Tian et al., 2021) در منطقه‌ای در چین مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که با کمک این تصاویر ماهواره‌ای می‌توان گندم را ۴ ماه و کلزا را ۲ ماه پیش از کشت شناسایی کرد.

سیستم‌های خرده مالکی از جمله عواملی هستند که تعیین نوع کشت را در یک منطقه با مشکلاتی مواجه می‌کنند. مشکلی که در اکثر مناطق آفریقا به‌دلیل غالب بودن این نوع از مالکیت بسیار مشهود است به‌طوری‌که زمین‌های تحت کشت سیب زمینی اکثراً زیر یک هکتار است. ایبراهیم و همکاران (Ibrahim et al., 2021) با استفاده از تلفیق تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۲ و اسکای ست اقدام به شناسایی نقشه محصولات در این مناطق نمودند و عملکرد این دو ماهواره را در تفکیک اراضی با سطح زیرکشت کم محصولات متنوع خوب و کارآمد گزارش کردند. در مطالعه انجام شده توسط جیم و همکاران (Gim et al., 2020) تغییر در شروع فصل رشد در کمربند کشت ذرت در غرب ایالات متحد با استفاده از شاخص NDVI ماهواره AVHRR مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که ضریب همبستگی در مرحله کاشت از ۰/۴۳ تا ۰/۶۸ و در گلدهی از ۰/۵۱ تا ۰/۸۳ متغیر بوده است. مقادیر سالانه RMSE نیز از ۳/۶ تا ۷/۴ روز در طول سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۵ تغییر داشته است. کارایی ماهواره سنتینل ۲ و الگوریتم جنگل تصادفی در تعیین تغییرات کاربری اراضی در هندوستان توسط پاندی (Pande, 2022) گزارش شده است. ایشان استفاده از تصاویر ماهواره‌ای را روشی مؤثر در مدیریت اراضی و تعیین مساحت تغییرات مذکور بیان نمودند. همچنین به منظور افزایش دقت نتایج طبقه‌بندی می‌توان از شاخص گیاهی NDVI و باند SWIR جهت شناسایی طبقات مختلف کاربری اراضی و تفکیک گیاهان استفاده نمود (Kumar et al., 2022). بنابر آنچه پیشتر توضیح داده شد و با توجه به ضرورت مدیریت مصارف آب در بخش پایین دست سد فریمان، این پژوهش در راستای تعیین انواع محصولات عمده تحت کشت در این منطقه و همچنین بررسی تغییرات کاربری زراعی و باغی در این مناطق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های طبقه‌بندی انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در اراضی پایین دست سد فریمان در محدوده ای به مساحت ۵۱/۲۲ کیلومتر مربع (۵۱۲۲ هکتار) و مختصات مرکزی

ستینیل ۲ در این مطالعه استفاده شد. این ماهواره در سال ۲۰۱۵ در مدار قرار گرفت و دارای قدرت تفکیک زمانی ۵ روز و قدرت تفکیک مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در باندهای مختلف خود می‌باشد. سنجنده MSI این ماهواره دارای ۱۳ باند طیفی است. در پژوهش حاضر تصاویر ماهواره ستینیل ۲ به همراه تصویر رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، محدوده مورد مطالعه برای ۶ ماه نخست (فصل زراعی) سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ در نظر گرفته شد. طبق بررسی‌های انجام گرفته و گزارش‌های جهاد کشاورزی شهرستان فریمان، محصولات زراعی عمده تحت کشت در منطقه شامل ذرت، گوجه فرنگی، چغندر، گندم و جو می‌باشند. از این رو با توجه به مراحل فنولوژیکی این محصولات در منطقه اقدام به انتخاب سری زمانی تصاویر مناسب شد. به منظور انتخاب تاریخ‌های مناسب طبقه‌بندی، ابتدا کلیه تصاویر اخذ گردید و سپس تصاویر فاقد ابرناکی (ابرناکی ۰ درصد) انتخاب شد زیرا وجود ابر در تصاویر می‌تواند منجر به ایجاد خطای طبقه‌بندی شود. پس از بررسی کیفیت تصاویر موجود و همچنین تطابق با دوره زمانی رشد محصولات عمده منطقه، در نهایت به ازای ماه‌های اسفند، فروردین، تیر و مرداد، تصاویر مورد نیاز اخذ گردید. تصاویر ماهواره ستینیل ۲ به صورت رایگان از سایت Copernicus Open Access Hub, (2021) قابل دانلود می‌باشند. در فرآیند انتخاب تصاویر سعی شده تا هر محصول حداقل یک تصویر در دوره اوج سبزیگی دارا باشد. **جدول ۱** تصاویر مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد.

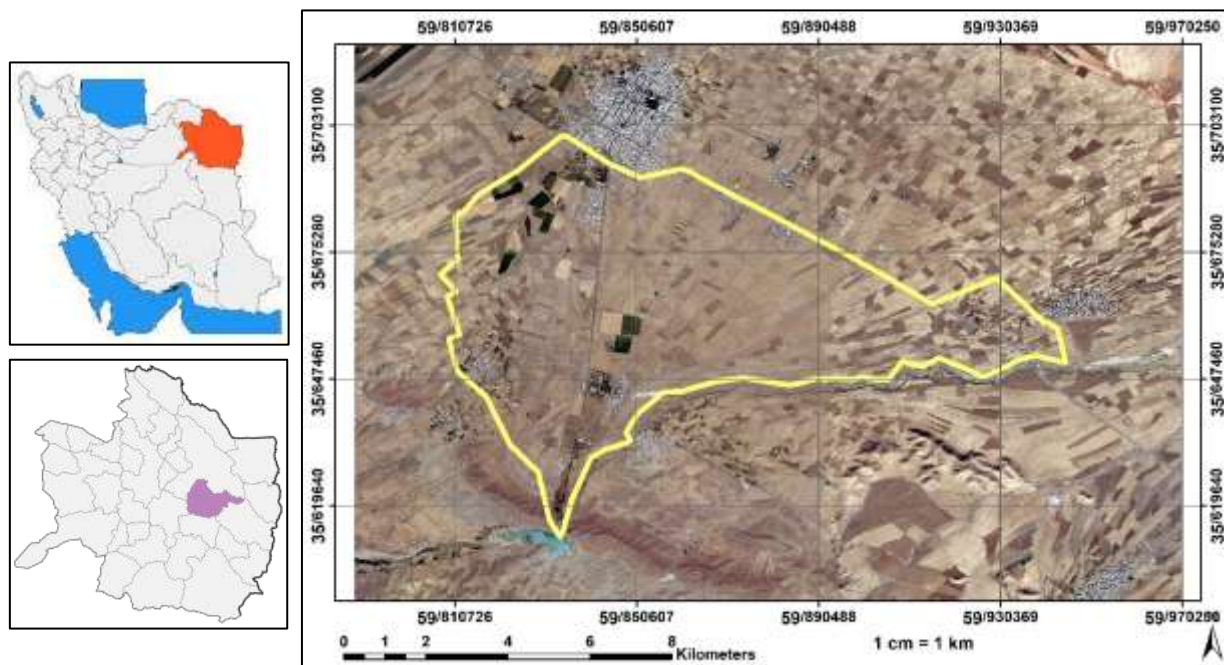
با عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۴۱ دقیقه و ۵۹ ثانیه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۵۰ دقیقه و ۴۹ ثانیه شرقی قرار گرفته است. منطقه مذکور از دهانه سد فریمان تا محدوده شهر فریمان را در بر گرفته است (**شکل ۱**).

داده‌های زمینی مورد استفاده

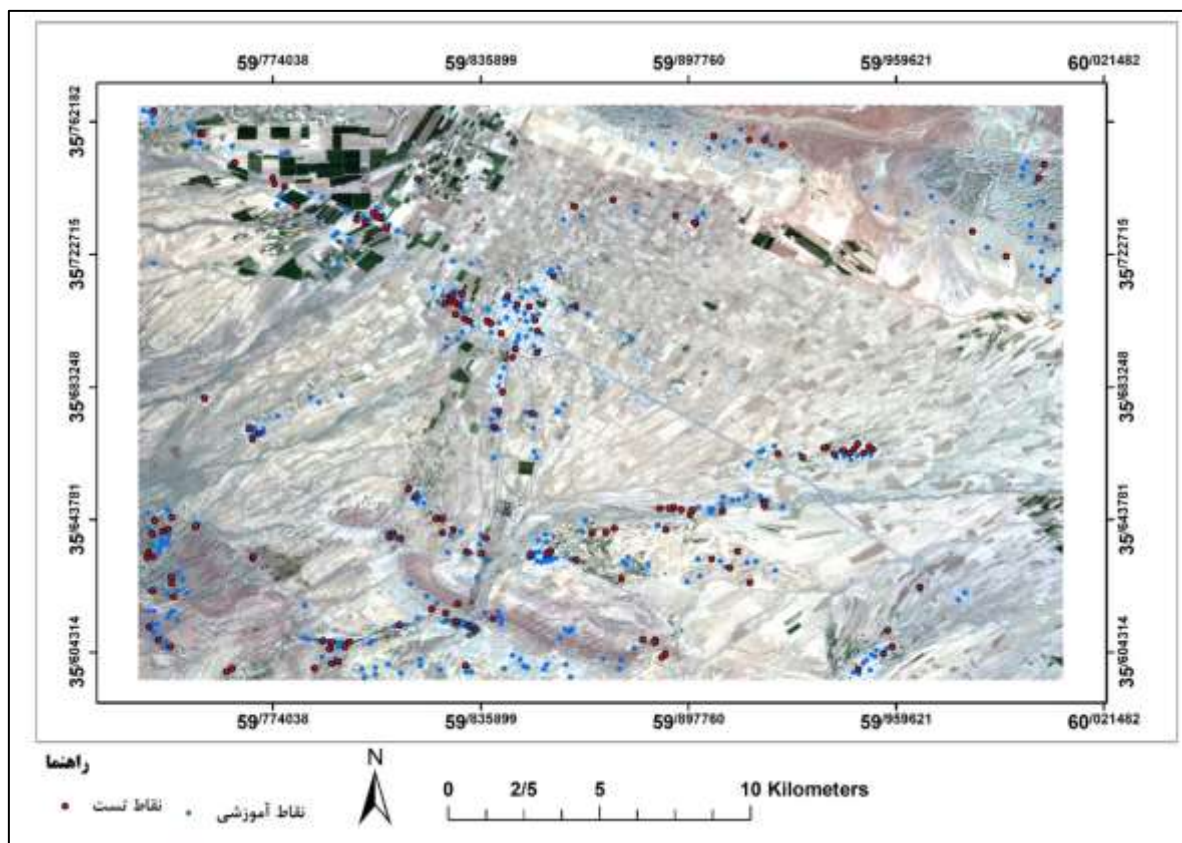
به منظور انجام طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و تولید نقشه محصولات، نیاز به داده‌های مشاهداتی زمینی برای آموزش مدل طبقه‌بندی و همچنین ارزیابی صحت نتایج حاصل از آن است. بدین منظور با استفاده از GPS، موقعیت نقاط نمونه از کاربری‌های مختلف در منطقه برداشت شد. از آنجاکه در مرز تعیین شده امکان برداشت نمونه کافی برای همه اراضی تحت کشت و کاربری‌ها فراهم نبود، منطقه نمونه‌برداری بزرگتر انتخاب گردید. سپس کل داده‌های برداشت شده مرتب شد و به ازای هر طبقه ۷۰ درصد داده به صورت تصادفی برای آموزش مدل طبقه‌بندی و ۳۰ درصد برای ارزیابی و صحت‌سنجی نتایج طبقه‌بندی به دست آمده استفاده گردید. نقشه پراکندگی نقاط نمونه آموزشی و تست در **شکل ۲** ارائه شده است.

تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

با توجه به بررسی منابع انجام شده و هدف مقاله، از تصاویر ماهواره



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location of the study area



شکل ۲- نقشه پراکنش نقاط آموزشی و تست برداشت شده در محدوده مورد مطالعه
Figure 2- Distribution map of training and testing points in the study area

جدول ۱- تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در پژوهش حاضر (سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱)
Table 1- Satellite images used in the current research (crop years 2021 and 2022)

ماهواره	تاریخ شمسی	تاریخ میلادی
Satellite	Solar Date	Georgian Date
ستینل ۲ Sentinel 2	1399/12/08	2021/02/27
	1400/01/16	2021/04/05
	1400/04/18	2021/07/04
	1400/05/20	2021/08/11
	1400/12/01	2022/02/19
	1401/01/14	2022/04/03
	1401/04/18	2022/07/09
	1401/05/15	2022/08/06
تصویر SRTM, DEM	-	-

منظور تفکیک طبقات در نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی توسط مطالعات زیادی پیشنهاد شده است (Fei et al., 2022; Orynbaikyzy et al., 2022; Choudhary et al., 2022). به منظور انجام عملیات محاسباتی نرم‌افزارهای ArcGIS، ENVI، SNAP و برای پردازش‌های پس از طبقه‌بندی، نرم‌افزار QGIS مورد استفاده قرار گرفت.

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و ارزیابی صحت نتایج

پس از انجام پیش پردازش‌های لازم شامل انطباق تصاویر با منطقه مورد مطالعه، موزائیک و برش تصاویر، باندهای محدوده مرئی به همراه باندهای مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز موج کوتاه و همینطور شاخص NDVI به همراه لایه شیب به دست آمده از تصویر DEM منطقه با استفاده از مدل طبقه‌بندی جنگل تصادفی^۱ (RF) وارد فرآیند طبقه‌بندی شدند (Nouri et al., 2018). استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی به

1- Random Forest

جدول ۲- نتایج ارزیابی تفکیک طبقات انواع کاربری و محصولات زراعی در سال ۱۴۰۱
Table 2- Results of evaluating the classification for land use and crops in 2022

نوع کاربری Land use Type	دقت کاربر Commission Error	دقت تولیدکننده Omission Error
گندم و جو Wheat and Barley	0.95	0.97
ذرت Maize	0.97	0.83
چغندر Sugar Beet	0.94	0.94
گوجه فرنگی Tomato	0.98	0.96
باغات Orchard	0.96	0.83
سایر محصولات Other Crops	0.95	0.98
جنگل Forest	1	0.82
مرتع Rangeland	0.94	0.98
خاک Soil	0.93	0.95
شهر Urban	0.97	0.89
آب Water	1	0.78

در زمین کشت نشده‌اند یکی از تصاویر در این زمان انتخاب شد. با توجه به زمان اوج سبزیگی این دو محصول در منطقه، تصویر دیگر نیز در فروردین ماه در نظر گرفته شد. اوج سبزیگی سایر محصولات عمده منطقه که شامل چغندر، گوجه فرنگی و ذرت می‌باشند نیز به ترتیب تیر، مرداد و مرداد است. سایر تصاویر در این بازه زمانی در نظر گرفته شد. صحت‌سنجی نتایج به‌دست آمده از طبقه‌بندی محصولات در سال زراعی ۱۴۰۱ در **جدول ۲** ارائه شده است. از آنجا که دو محصول گندم و جو به‌خوبی قابل تفکیک از هم نبودند، هر دو در یک طبقه در نظر گرفته شدند.

براساس نتایج ارائه شده در **جدول ۲** مشاهده می‌شود که تفکیک و شناسایی طبقات و کاربری‌ها به خوبی و با دقت بالایی انجام شده است. به‌منظور مقایسه تغییرات کاربری اراضی طی دو سال ۱۴۰۱ و ۱۴۰۰، فرآیند طبقه‌بندی برای تصاویر سال زراعی ۱۴۰۰ نیز انجام شد. از آنجا که نمونه‌های آموزشی محصولات زراعی به تفکیک و به تعداد کافی در سال زراعی ۱۴۰۰ موجود نبود، نقشه طبقه‌بندی این سال تنها براساس نوع کاربری زمین تولید شد و تمام محصولات زراعی در یک طبقه وارد فرآیند آموزش مدل طبقه‌بندی گردید. نتایج حاصل از ارزیابی صحت خروجی‌های نقشه‌های طبقه‌بندی هر دو سال در **جدول ۳**

صحت و دقت نقشه طبقه‌بندی شده به دست آمده، با استفاده از معیار ضریب کاپا^۱ و دقت کلی^۲ مورد ارزیابی قرار گرفت. معیار دقت کلی میانگینی از دقت طبقه‌بندی ارائه می‌دهد. ضریب کاپا نیز دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. برای برآورد دقت هر کلاس به‌صورت مجزا نیز از معیارهای دقت کاربر^۳ و دقت تولیدکننده^۴ استفاده می‌شود. دقت کاربر نشان‌دهنده تعداد نمونه‌هایی از یک کلاس است که واقعاً به آن کلاس تعلق ندارند و دقت تولیدکننده نشان‌دهنده تعداد نمونه‌هایی از یک کلاس است که به اشتباه در کلاس‌های دیگر طبقه‌بندی شده است (Riahi et al., 2019).

نتایج و بحث

به‌منظور شناسایی و تفکیک اراضی در منطقه مورد مطالعه با توجه به محصولات عمده تحت کشت، ابتدا تقویم زراعی محصولات مشخص شد و سپس براساس دوره کشت محصولات، تصاویر ماهواره‌ای انتخاب شدند. از آنجا که محصولات گندم و جو در زمستان در اوایل دوره رشد رویشی خود هستند و اکثر محصولات در این زمان

3- Commission Error
4- Omission Error

1- Kappa Coefficient
2- Overall Accuracy

اراضی طی دو سال مذکور متناسب با مرز منطقه پایین دست سد محدود شد (شکل ۴ و شکل ۵) و مساحت هر یک از طبقات نیز تعیین گردید (جدول ۴).

با بررسی شکل ۴ و شکل ۵ و همچنین نتایج ارائه شده در جدول ۴، مشاهده می‌شود مساحت طبقه باغ در سال ۱۴۰۱ نسبت به سال ۱۴۰۰، ۱۰۳ درصد افزایش داشته است. این در حالی است که مساحت زمین‌های مرتع و آیش ۴۱۴ درصد افزایش، مناطق خاک و سنگلاخ ۵ درصد کاهش و زمین‌های زراعی ۴۴ درصد کاهش نشان داده است.

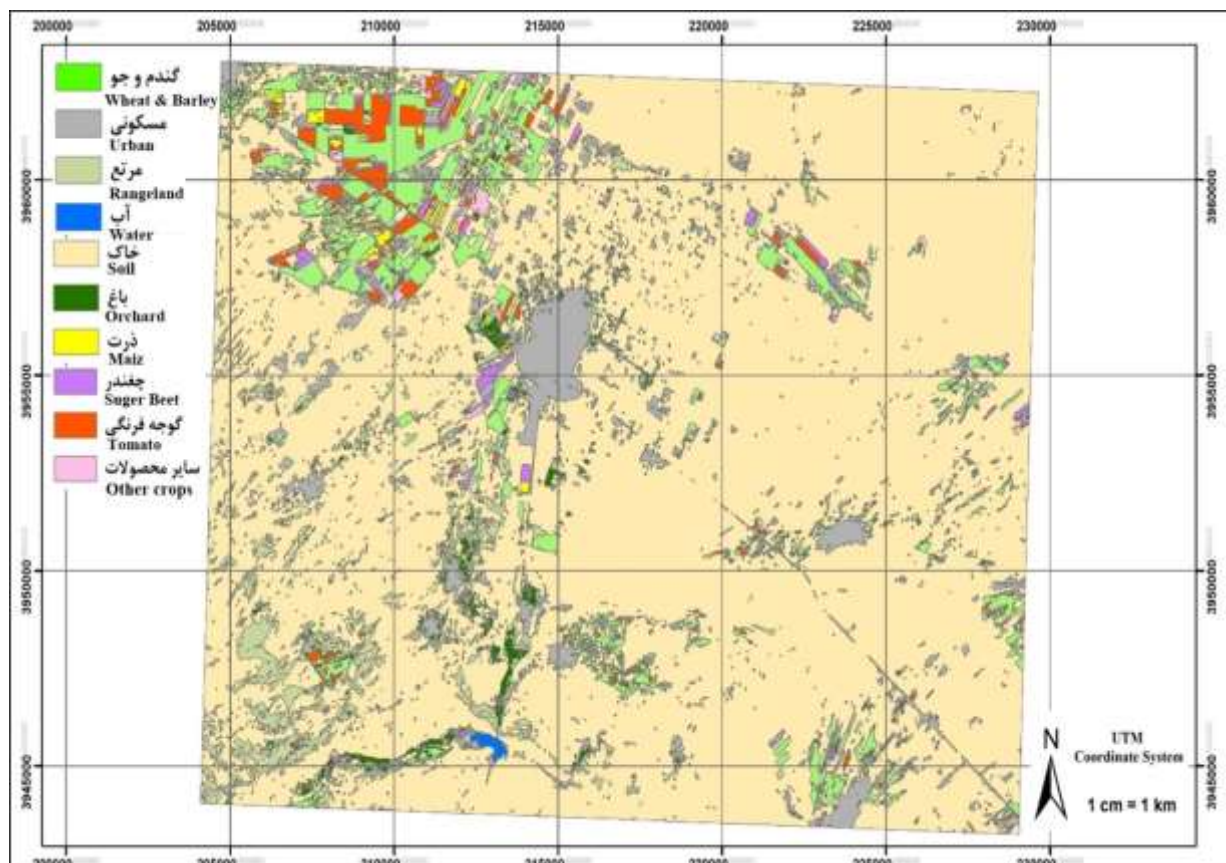
نمایش داده شده است. نتایج این جدول نیز قابلیت مدل طبقه‌بندی جنگل تصادفی و تصاویر ماهواره سنتینل ۲ را در شناسایی و تفکیک اراضی و کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد. نقشه طبقه‌بندی شده محصولات و کاربری اراضی طی سال زراعی ۱۴۰۱ و همچنین نقشه کاربری اراضی طی سال زراعی ۱۴۰۰ در شکل ۲ و شکل ۳ ارائه شده است.

از آنجا که هدف مقاله تعیین و بررسی تغییرات کاربری اراضی در منطقه پایین دست سد فریمان بوده است، نقشه طبقه‌بندی کاربری

جدول ۳- نتایج ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی و تعیین سطح زیرکشت طی دو سال زراعی ۱۴۰۱ و ۱۴۰۰

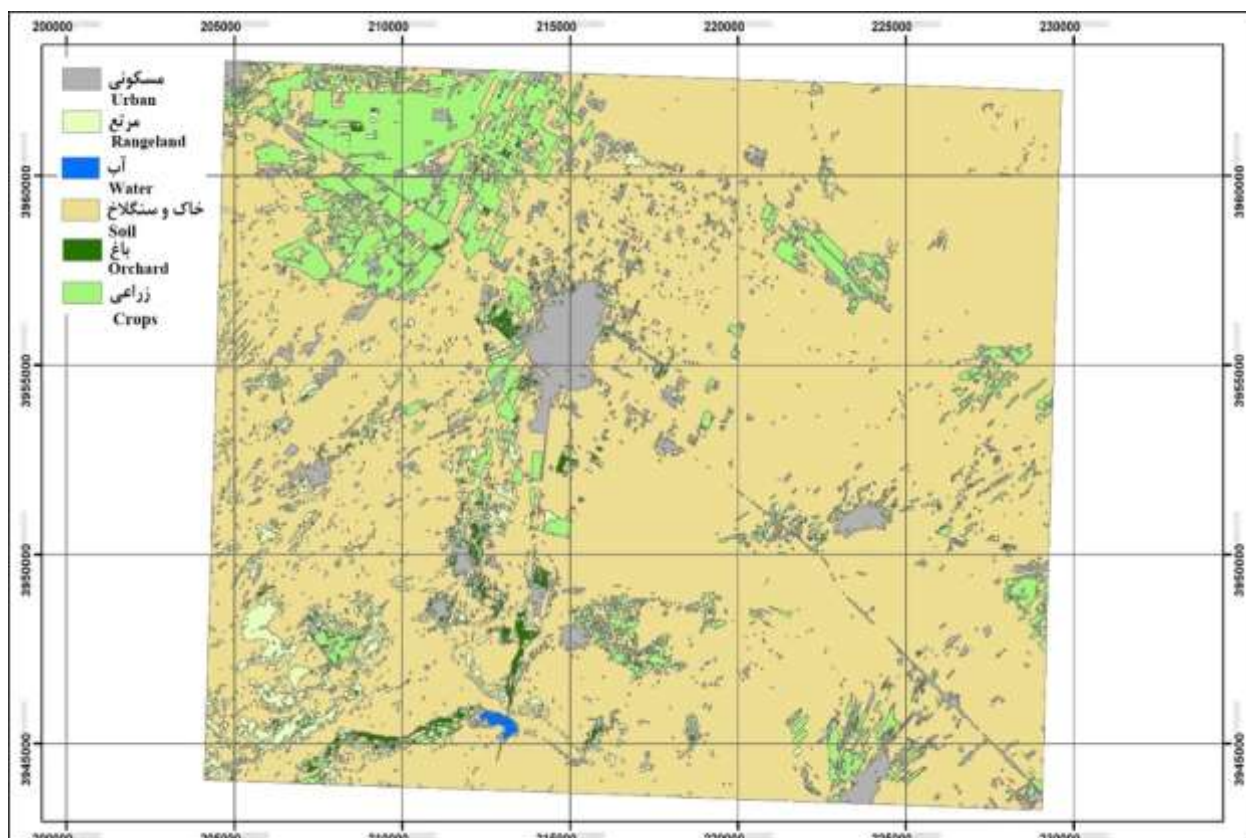
Table 3- Results of assessing the accuracy of the classification maps and the determination of the cultivation area in the two crop years 2021 and 2022

عنوان Title	دقت کلی Overall Accuracy	ضریب کاپا Kappa Factor
نقشه طبقه‌بندی به تفکیک محصولات، سال زراعی ۱۴۰۱ Classification map by crops, crop year 2022	0.97	0.94
نقشه طبقه‌بندی محصولات به طور کلی، سال زراعی ۱۴۰۰ Classification map of crops in general, crop year 2021	0.97	0.95



شکل ۳- نقشه طبقه‌بندی اراضی محدوده مورد مطالعه، فصل زراعی سال ۱۴۰۱

Figure 3- Land use/cover classification map of the study area, cropping season of 2022



شکل ۴- نقشه طبقه‌بندی اراضی محدوده مورد مطالعه، فصل زراعی سال ۱۴۰۰
Figure 4- Land use classification map of the study area, crop season of 2021

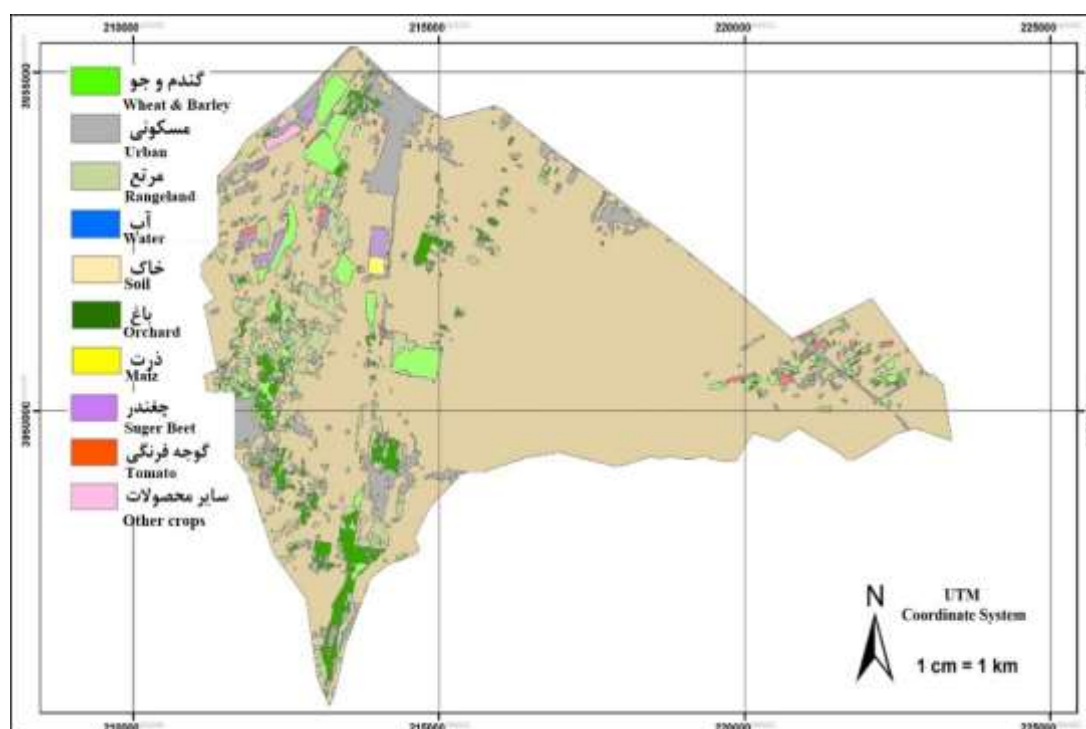
رفتار مالکین زمین‌ها، روند تغییرات طی چند سال مداوم بررسی و تحلیل شود.

نتیجه‌گیری

مدیریت بهینه و لزوم تخصیص کارآمد منابع آبی سدها به محصولات کشاورزی و باغی سبب ایجاد اهمیت برای تعیین کاربری اراضی پایین دست سدها و همچنین تعیین نوع و سطح کشت‌های انجام شده در این مناطق شده است. این موضوع در مناطق دارای آب و هوای خشک و منابع آبی محدود از اهمیت بالاتری برخوردار است. با توجه به کمبود داده‌های موجود، بکارگیری سنجش از دور و به‌خصوص ماهواره‌ها به دلیل مقرون به‌صرفه بودن از نظر زمان و هزینه، نقشی اساسی در این زمینه ایفا می‌نمایند. از این رو، در پژوهش حاضر از تصاویر ماهواره سنتینل ۲ برای طبقه‌بندی و تعیین نوع کاربری اراضی تحت کشت محصولات کشاورزی پایین دست سد فریمان واقع در استان خراسان رضوی طی دو سال زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ استفاده شد.

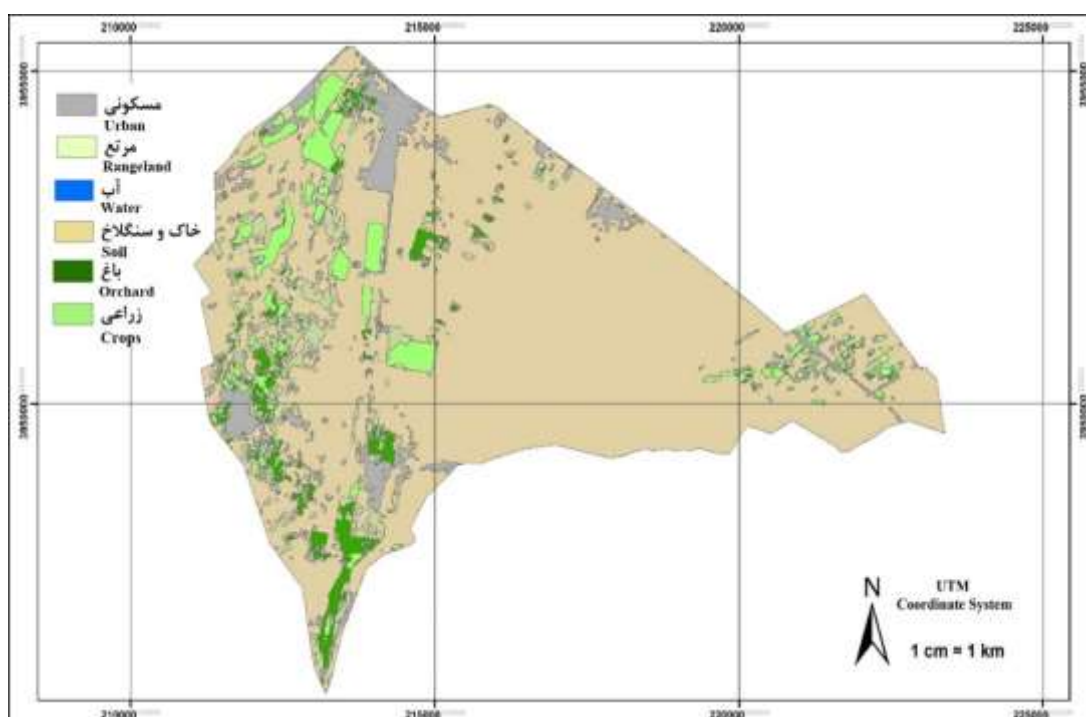
پس از بررسی‌های مجدد از محدوده مورد مطالعه و بررسی برخی زمین‌هایی که تغییر کاربری داده و به کاربری باغ تبدیل شده بودند، مشخص شد که در برخی مناطق در سال ۱۴۰۱ رشد باغ ویلاها وجود داشته است و در برخی مناطق نیز کشاورزان اقدام به تبدیل زمین زراعی به باغ (احداث باغ) نموده‌اند. حتی در مواردی، باغ قدیمی در منطقه توسط کشاورزان تخریب شده و زمین به مدت ۲ تا ۳ سال آیش بوده است (سال ۱۴۰۰، آیش) و در سال ۱۴۰۱، کشاورز اقدام به احداث باغ جدید نموده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که زمین‌های آیش بسته به اینکه تازه شخم خورده باشند و یا به هر دلیلی فاقد پوشش گیاهی باشند جزء طبقه خاک قرار گرفته‌اند و در صورتی که در این زمین‌ها علف هرز رشد کرده باشد در طبقه مراتع قرار می‌گیرند. بررسی تغییرات کاربری‌های فوق نشان می‌دهد علی‌رغم لزوم کاهش و مصرف بهینه آب، تغییر کاربری روی داده خلاف رویکرد مورد نظر بوده و افزایش باغ ویلاها منجر به افزایش مصرف آب و کاهش تولیدات بخش زراعی در این منطقه می‌شود.

لازم به ذکر است مقایسه تغییرات سالانه کاربری‌ها اگرچه لازم و ضروری است اما پایش طولانی‌مدت‌تر تغییرات در یک منطقه، دید جامع‌تری از روند مصرف آب و رفتار زارعین و باغداران ارائه می‌دهد. از این رو پیشنهاد می‌شود برای بررسی جامع‌تر الگوی مصرف آب و تغییر



شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی اراضی منطقه پایین دست سد فریمان، فصل زراعی سال ۱۴۰۱

Figure 5- Land use/cover classification map of the area downstream of Fariman dam, crop season of 2022



شکل ۶- نقشه طبقه‌بندی اراضی منطقه پایین دست سد فریمان، فصل زراعی سال ۱۴۰۰

Figure 6- Land use classification map of the area downstream of Fariman dam, crop season of 2021

جدول ۴- سطح زیرکشت محصولات کشاورزی منطقه پایین دست سد فریمان طی سال‌های زراعی ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱
Table 4- The agricultural area in downstream of the Fariman dam during the crop years 2021 and 2022

پوشش و کاربری Land use/cover	سال زراعی ۱۴۰۰	سال زراعی ۱۴۰۱
	Crop year 2021	Crop year 2022
	مساحت Area (ha)	مساحت Area (ha)
مرتع و آیش Rangeland & Fallow	52.9	272
باغ و جنگل (مناطق دارای درخت) Orchard & Jungle	80.9	164.8
خاک و سنگلاخ Soil	4257.6	4031
محصولات زراعی Crops	498.9	277.6

طبقه‌بندی به‌دست آمده نیز نشان داد که کاربری باغ نسبت به زراعی در این منطقه در سال ۱۴۰۱ رو به افزایش بوده است. بررسی‌ها نشان داد که علت این امر، رشد باغ ویلاها و همچنین تغییر کاربری زراعی به کاربری باغ بوده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده از تحقیق حاضر و تغییرات مهم صورت گرفته در کاربری اراضی و اثرات آن بر میزان تقاضای آب، پیشنهاد می‌شود که با در نظرگیری کمبود منابع آبی موجود، تغییرات کاربری اراضی به‌عنوان یک عامل مهم و اثرگذار در برنامه‌ریزی‌های تخصیص منابع آب مورد توجه قرار گرفته و بر این اساس، مصرف آب در مناطق مختلف کنترل و بهینه شود.

نتایج به‌دست آمده از پژوهش حاضر نشان داد که ماهواره سنتینل ۲ به خوبی قادر است انواع کاربری و همچنین انواع محصولات زراعی کشت شده را تشخیص داده و تفکیک نماید که این نتیجه با نتایج به دست آمده توسط زارع و همکاران (Zare et al., 2020) و تیان و همکاران (Tian et al., 2021) همخوانی دارد. همچنین استفاده از شاخص گیاهی NDVI منجر به افزایش دقت نقشه‌های طبقه‌بندی خروجی در محدوده مطالعاتی گردید که تأیید کننده نتایج حاصل از کوبایاشی و همکاران (Kobayashi et al., 2020) و سونوب و همکاران (Sonobe et al., 2018) است. بررسی تغییرات نقشه‌های

References

- Choudhary, K., Shi, W., Dong, Y., & Paringer, R. (2022). Random forest for rice yield mapping and prediction using Sentinel-2 data with Google Earth Engine. *Advances in Space Research*, 70(8), 2443-2457. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.06.073>
- Copernicus Open Access Hub. (2021). Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu/>
- Fei, H., Fan, Z., Wang, C., Zhang, N., Wang, T., Chen, R., & Bai, T. (2022). Cotton classification method at the county scale based on multi-features and random forest feature selection algorithm and classifier. *Remote Sensing*, 14(4), 829. <https://doi.org/10.3390/rs14040829>
- Gim, H.J., Ho, C.H., Jeong, S., Kim, J., Feng, S., & Hayes, M.J. (2020). Improved mapping and change detection of the start of the crop growing season in the US Corn Belt from long-term AVHRR NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 294, 108143.
- Ibrahim, E.S., Rufin, P., Nill, L., Kamali, B., Nendel, C., & Hostert, P. (2021). Mapping crop types and cropping systems in niger with sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 13(17), 3523. <https://doi.org/10.3390/rs13173523>
- Kobayashi, N., Tani, H., Wang, X., & Sonobe, R. (2020). Crop classification using spectral indices derived from Sentinel-2A imagery. *Journal of Information and Telecommunication*, 4(1), 67-90. <https://doi.org/10.3390/rs13173523>
- Kordi, F., Hamzeh, S., Atarchi, S., & Alavipanah, S.K. (2018). Agricultural product classification for optimal water resource management using the data time series of landsat8. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(4), 1267-1283. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ije.2018.264578.943>
- Kumar, S., Arya, S., & Jain, K. (2022). A SWIR-based vegetation index for change detection in land cover using multi-temporal Landsat satellite dataset. *International Journal of Information Technology*, 14, 2035-2048. <https://doi.org/10.1007/s41870-021-00797-6>
- Nouri, S., Sanaei Nejad, S.H., & Davari, K. (2018). Investigate of using of vegetation indices based on Satellite imagery in assessing agricultural drought (Case study: North Khorasan Province in Iran). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(6), 1076-1086. (In Persian with English abstract)
- Ok, A.O., Akar, O. and Gungor, O. (2012). Evaluation of random forest method for agricultural crop classification. *European. Journal of Remote Sensing*, 45(1), 421-432. <https://doi.org/10.5721/EuJRS20124535>

11. Orynbaikyzy, A., Gessner, U., & Conrad, C. (2022) Spatial transferability of random forest models for crop type classification using Sentinel-1 and Sentinel-2. *Remote Sensing*, 14(6), 1493. <https://doi.org/10.3390/rs14061493>
12. Pande, C.B. (2022) Land use/land cover and change detection mapping in Rahuri watershed area (MS), India using the google earth engine and machine learning approach, *Geocarto International*, 37(26), 13860-13880, <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2086622>
13. Riahi, V., Zeaiean Firouzabadi, P., Azizpour, F., & Darouei, P. (2019). Identification and investigation of the area under cultivation in Lenjanat using Landsat 8 satellite images. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 19(52), 147-169. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/jgs.19.52.147>
14. Saei Jamalabad, M., Mojardi, B., & Abkar, A.A. (2018). Winter wheat classification by multi-temporal optimized image analysis based on random forest algorithm. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 8(2), 133-150. (In Persian)
15. Sonobe, R., Yamaya, Y., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N., & Mochizuki, K.I. (2018). Crop classification from Sentinel-2-derived vegetation indices using ensemble learning. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(2), 026019-026019. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.12.026019>.
16. Tian, H., Wang, Y., Chen, T., Zhang, L., & Qin, Y. (2021). Early-season mapping of winter crops using sentinel-2 optical imagery. *Remote Sensing*, 13(19): 3822. <https://doi.org/10.3390/rs13193822>
17. Zare khormizi, H., Ghafarian Malamiri, H.R., & Mortaz, M. (2020). Evaluation of supervised classification capability of Landsat-8 and Sentinel-2A Satellite images in determining type and area of pistachio cultivars. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 11(1), 84-103. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30495/girs.2020.672378>



Research Article

Vol. 37, No. 6, Feb.-Mar., 2024, p. 841-853

Flood Susceptibility Mapping of the Famnat Watershed, Gilan Province

F. Mirchooli¹, I. Gholami², M. Boroughani^{3*}

1- Ph.D. in Watershed Management, Expert in Watershed Management Department, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran

2- Master Graduate in Watershed Management, Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Assistant Professor, Research Center for Geosciences and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.boroughani@hsu.ac.ir)

Received: 29-08-2023

Revised: 13-11-2023

Accepted: 03-12-2023

Available Online: 03-12-2023

How to cite this article:

Mirchooli, F., Gholami, I., & Boroughani, M. (2024). Flood susceptibility mapping of the Famnat watershed, Gilan province. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 841-853. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84146.1328>

Introduction

Flood is one of the most destructive natural disasters that has a negative impact on social, economic and environmental dimensions. Floods usually occur following a prolonged period of rain or snowmelt in combination with unfavorable conditions. In this regard, all over the world, the occurrence of floods has intensified by 40% in the last two decades. In Asia, almost 90% of all human casualties caused by natural disasters are due to floods. The increase in flooding is usually due to increased environmental degradation such as urbanization, increased population growth, and deforestation. Periodic and regular occurrences of floods over a certain timeframe significantly amplify the detrimental impacts on living organisms. Urban areas in close proximity to rivers bear the brunt of these damages, owing to high population density, economic infrastructure, and transportation networks. However, these consequences can be alleviated through meticulous vulnerability analysis. One of the primary objectives pursued by researchers and policymakers is the precise modeling and zoning of floods to mitigate associated risks. Consequently, a myriad of methods and approaches have been devised for flood risk modeling and zoning to address this pressing issue. Among them, hydrological methods such as rainfall-runoff modeling and data-based techniques, which are unable to comprehensively analyze rivers and flood zones due to their one-dimensional nature. This is despite the fact that the morphology of the river is not stable and due to its high erosion potential, it also has a dynamic characteristic. In addition, these methods require fieldwork and large budgets for data collection. Hence, comprehensive flood management is necessary to reduce these effects. Therefore, this study was conducted with the aim of identifying areas sensitive to the risk of flooding in Famnat watershed located in Gilan province. Fomanat watershed is located in Gilan province and is considered a part of the first grade watershed of the Central Plateau. This area is located in the range of 36.89 to 37.57 degrees north latitude and 48.77 to 49.69 degrees east longitude. This region has an area of 3595 square kilometers, the highest point of which is 3088 meters and the lowest point is -69 meters.

Materials and Methods

To carry out the current research, firstly, by reviewing the sources and history of the research, as well as knowing the region, a map and layers of information related to the factors affecting flood susceptibility zoning were prepared. These layers include land use map, slope degree, geology, distance from waterway, digital map of height, direction,



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84146.1328>

shape of land curvature, land curvature profile, rainfall and topographic humidity index, which are created using the collected data and also various additions in the environment. Geographic information system (Arcgis 10.4) was prepared. In this regard, machine learning models such as generalized linear model (GLM), multivariate adaptive regression model (MARS) and classification and regression tree model (CART) were used to zone the sensitivity of the watershed to floods. Also, among 100 flood events, 70% (70) were considered for training and 30% (30) for validation. In the following, using field survey and review of previous studies, 10 factors influencing the occurrence of floods in the watershed area were identified and used. Finally, the area under the ROC curve and the TSS index were used to evaluate the models.

Results and Discussion

The results of the evaluation of the most important factors affecting the sensitivity of the watershed to floods indicated that the distance from the river, the height and the curvature profile had the greatest impact on the sensitivity of the region, and on the other hand, the factors of slope, geology and topographic humidity index had the least impact. Based on the obtained results, the areas covered by very low, low, medium, high and very high classes in the CART model were 26.6, 17.6, 21.2, 0.1 and 34.0%, respectively. These results for the GLM model were 13.6, 12.7, 16.2, 25.1 and 32.4 percent, respectively. Based on the obtained results, the CART model performed better than other models, so that AUC for MARS model was equal to 0.76, CART model was equal to 0.9 and GLM model was equal to 0.84. Also, the better performance of CART model compared to other models was confirmed by other indicators. So, based on TSS, MARS model equal to 0.52, CART model equal to 0.77 and GLM model equal to 0.66 were obtained.

Conclusion

Implementing the findings of this study can facilitate the adoption of effective management strategies to mitigate losses and casualties. Moreover, in developing nations grappling with restricted access to hydrogeological and soil data, the utilization of geographic information systems (GIS) and data mining techniques assumes a pivotal role in conducting comprehensive studies. These technologies offer valuable insights and support decision-making processes, enabling proactive measures to address flood risks and enhance disaster resilience in vulnerable regions.

Keywords: Flood management, Flood mapping, Machine learning models, ROC curve

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۸۵۳-۸۴۱

پهنه‌بندی حساسیت به سیل در حوزه آبخیز فامانات، استان گیلان

فهیمة میرچولی^۱ - عیسی غلامی^۲ - مهدی بروغنی^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

چکیده

سیل یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که تأثیر منفی بر ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی دارد. افزایش سیل معمولاً به دلیل افزایش تخریب محیط‌زیست مانند توسعه شهرنشینی، افزایش رشد جمعیت و جنگل‌زدایی است. از این‌رو، مدیریت همه‌جانبه سیل برای کاهش این اثرات ضروری است. بنابراین، این مطالعه با هدف شناسایی مناطق حساس به خطر وقوع سیل در حوزه آبخیز فامانات واقع در استان گیلان انجام شد. در این راستا، از مدل‌های یادگیری ماشین از جمله مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، مدل رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS) و مدل درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیون (CART) برای پهنه‌بندی حساسیت حوزه آبخیز به سیلاب استفاده شد. هم‌چنین، از میان ۱۰۰ رخداد سیلاب، ۷۰ درصد آن (۷۰) برای آموزش و ۳۰ درصد (۳۰) برای اعتبارسنجی در نظر گرفته شد. در ادامه، با استفاده از پیمایش صحرایی و نیز مرور مطالعات پیشین، ۱۰ عامل تأثیرگذار بر وقوع سیل در حوزه آبخیز شناسایی و مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت برای ارزیابی مدل‌ها، از سطح زیر منحنی ROC و نیز شاخص TSS استفاده شد. نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که از میان متغیرهای تأثیرگذار، عامل ارتفاع و فاصله از رودخانه مؤثرترین عوامل در حوزه آبخیز مطالعاتی می‌باشند. به‌علاوه، سطح زیر منحنی در مدل MARS معادل ۰/۷۶، مدل GLM معادل ۰/۸۳ و در مدل CART معادل ۰/۹ بوده است که نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل CART در مقایسه با سایر مدل‌ها است. با به‌کارگیری نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان اقدامات مدیریتی مناسبی جهت کاهش خسارات و تلفات اتخاذ کرد. به‌علاوه، در کشورهای در حال توسعه که با محدودیت دسترسی به اطلاعات هیدروژئولوژیکی و ادافیکی مواجه هستند، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نیز تکنیک‌های داده‌کاوی نقش مهمی در انجام مطالعات ایفا می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: پهنه‌بندی سیل، مدل‌های یادگیری ماشین، مدیریت سیل، منحنی ROC

مقدمه

در سراسر جهان، وقوع سیل طی دو دهه گذشته ۴۰ درصد تشدید شده است؛ به‌طوری‌که در آسیا، تقریباً ۹۰ درصد از کل تلفات انسانی ناشی از بلایای طبیعی، به دلیل سیل است (Pourghasemi et al., 2020). افزایش سیل معمولاً به دلیل افزایش تخریب محیط‌زیست مانند توسعه شهرنشینی، افزایش رشد جمعیت و جنگل‌زدایی است. اگر سیل در یک بازه زمانی به‌طور متناوب و منظم رخ دهد، خسارات وارده نیز با شدت بیشتری بر زندگی موجودات زنده تأثیر می‌گذارد. این خسارات به خصوص در مناطق شهری نزدیک به رودخانه به دلیل تراکم جمعیت،

بلایای طبیعی عامل اصلی خسارات جبران‌ناپذیر در سراسر جهان هستند (Tehrany et al., 2014). سیل یکی از مخاطرات طبیعی خطرناکی است که بیش از هر رویداد طبیعی دیگری، مردم جهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Rahmati et al., 2016). سیل معمولاً به دنبال یک دوره طولانی بارندگی یا ذوب برف در ترکیب با شرایط نامطلوب اتفاق می‌افتد (Nachappa et al., 2020). در همین راستا،

۱- دکتری آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳- استادیار مرکز پژوهشی علوم جغرافیا و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.boroughani@hsu.ac.ir)

زیرساخت‌های اقتصادی و حمل و نقل شدیدتر می باشد (Tehrany et al., 2015). این پیامدها را می‌توان از طریق تجزیه و تحلیل دقیق آسیب‌پذیری کاهش داد. از این‌رو، مدل‌سازی و پهنه‌بندی دقیق سیل یکی از اهداف اصلی محققان و سیاست‌گذاران برای کاهش خطر آن است.

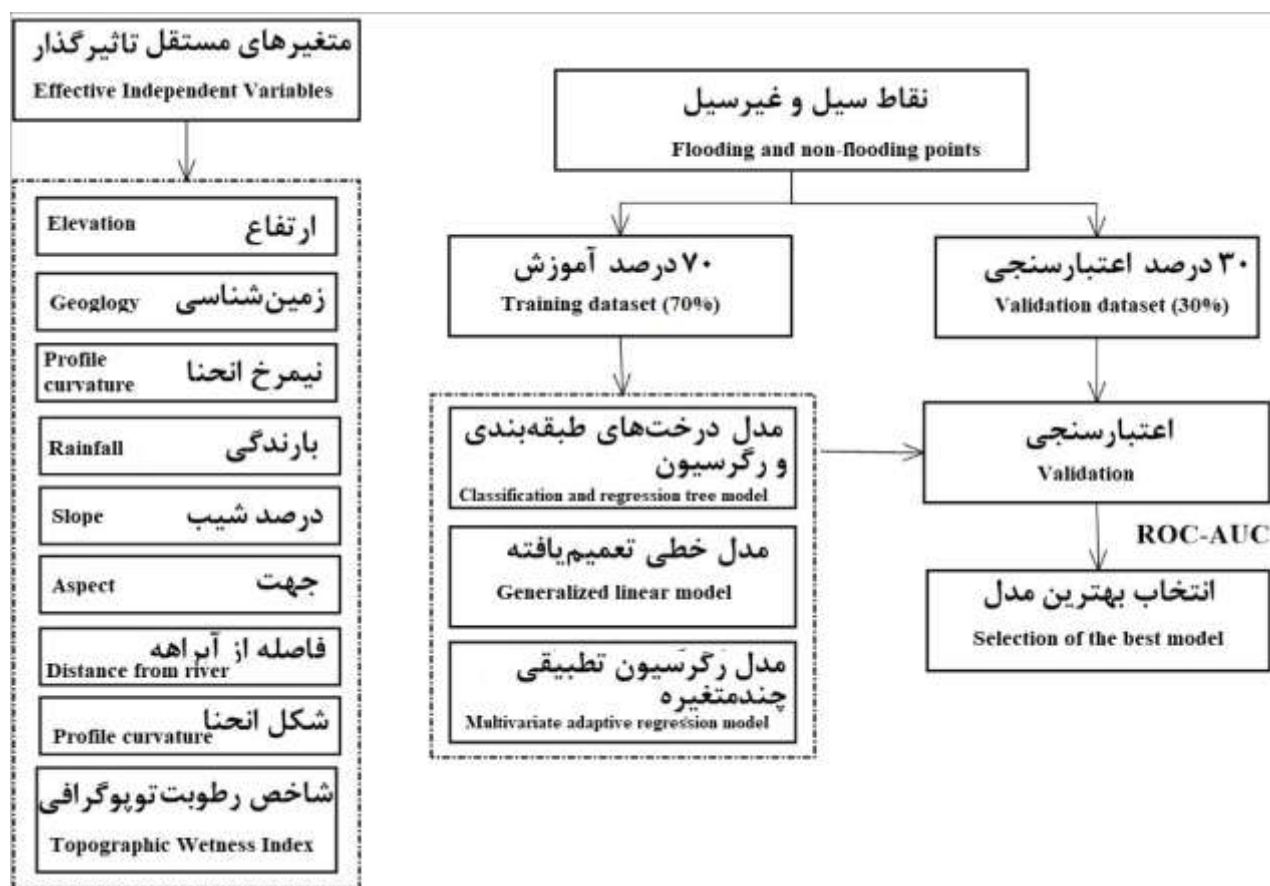
در همین راستا، روش‌ها و رویکردهای مختلفی برای مدل‌سازی و پهنه‌بندی خطر سیل توسعه داده شده است. از جمله، روش‌های هیدرولوژیکی مانند مدل‌سازی بارش-رواناب و تکنیک‌های مبتنی بر داده‌ها که به دلیل تک‌بعدی بودن قادر به تجزیه و تحلیل جامع رودخانه‌ها و مناطق طغیان آب نیستند. این در حالی است که مورفولوژی رودخانه پایدار نیست و به دلیل پتانسیل فرسایشی بالا دارای ویژگی دینامیکی نیز می‌باشد. به‌علاوه، این روش‌ها به کار میدانی و بودجه قابل توجهی برای جمع‌آوری داده‌ها نیاز دارند (Tehrany et al., 2014). تکنیک‌های سنجش از دور (RS) همراه با ابزار GIS می‌تواند برای تعیین مناطق خطر سیل، بستر مناسبی برای ترکیب، تجزیه و تحلیل اطلاعات فراهم کند. روش‌های مختلفی برای پهنه‌بندی خطر سیل با استفاده از GIS توسعه یافته است. از این میان، به‌کارگیری روش‌های مبتنی بر GIS و نیز یادگیری ماشین^۱ که از تجزیه و تحلیل انواع مختلف داده‌ها پشتیبانی می‌کنند، برای توسعه مدل‌های مخاطرات طبیعی و ایجاد مبنایی برای پهنه‌بندی آسیب‌پذیری و ریسک مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (Skilodimou et al., 2019). از جمله مدل‌های یادگیری ماشین می‌توان به جنگل تصادفی (RF)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، مدل‌های خطی تعمیم یافته (GLM)، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS) اشاره کرد که علاوه بر مطالعات پهنه‌بندی سیل، در زمین‌لغزش، فرسایش، آب زیرزمینی نیز مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله مطالعات مربوط به کاربرد این الگوریتم‌ها در خطر سیل می‌توان به موسوی و همکاران (Mosavi et al., 2022) اشاره کرد. ایشان به‌منظور اولویت‌بندی زیرحوضه‌های موجود در حوزه آبخیز تالار واقع در استان مازندران از نظر سیل و فرسایش، از مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (GLM)، تحلیل‌های متمایز انعطاف‌پذیر (FDA)، رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS) و جنگل تصادفی (RF) استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که مدل‌های GLM، FDA، MARS و RF به‌ترتیب دارای بیشترین دقت مدل‌سازی بوده و زیرحوضه‌های سه و پنج دارای بیشترین حساسیت به خطر سیل و فرسایش می‌باشند. محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2020) با استفاده از GIS و برخی عوامل مؤثر مانند تجمع جریان، شیب، کاربری اراضی، شدت بارش، ارتفاع و زمین‌شناسی به پهنه‌بندی خطر سیل و هدررفت محصولات کشاورزی ناشی از آن پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که ارتفاع مؤثرترین عامل از میان

فاکتورهای مورد بررسی بوده و تأثیر سیل بر هدررفت گندم و برنج از شمال حوضه به جنوب، به تدریج کاهش می‌یابد. ناچاپا و همکاران (Nachappa et al., 2020)، نیز با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین یعنی جنگل تصادفی و ماشین بردار پشتیبان به پهنه‌بندی خطرات سیل و زمین‌لغزش پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که مدل جنگل تصادفی برای هر دو نوع خطر، بهترین دقت را داشته است. آوند و همکاران (Avand et al., 2021) در مطالعه خود به تهیه نقشه احتمال سیل‌خیزی در حوزه آبخیز تجن پرداختند. ایشان در مطالعه خود، از الگوریتم‌های تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر و نیز شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. نتیجه حاصل از مطالعه ایشان نشان داد که مدل تحلیل ممیزی انعطاف‌پذیر دقت بالاتری در تهیه این نقشه داشته است. آوند و همکاران (Avand et al., 2022)، به ارزیابی اثر دقت مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) بر پهنه‌بندی خطر سیل پرداختند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که دقت مکانی DEM به تنهایی نمی‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت پهنه‌بندی خطر سیل داشته باشد. سیدی و همکاران (Seydi et al., 2022)، به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری سیل با استفاده از مدل جنگل آشناری و نیز مقایسه دقت آن با سایر مدل‌ها از جمله مدل‌های جنگل تصادفی، الگوریتم تقویت گرادیان سبک، درخت تصمیم‌گیری، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی مصنوعی، درخت‌های تصمیم تقویت‌شده با گرادیان پرداختند. نتایج نشان داد که مدل جنگل آشناری دارای بیشترین دقت می‌باشد. حسن‌الزمان و همکاران (Hasanuzzaman et al., 2022) به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری در حوزه آبخیز Silabati واقع در کشور هند پرداختند. ایشان در مطالعه خود از مدل‌های جنگل تصادفی، بیز ساده و درخت‌های تصمیم تقویت‌شده با گرادیان استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل جنگل تصادفی دارای بیش‌ترین دقت در پهنه‌بندی سیل داشته است.

پژوهش حاضر، با هدف پهنه‌بندی خطر سیل در حوزه آبخیز فومنا واقع در استان گیلان، چارچوب‌بندی شده است. اهداف این پژوهش شامل (۱) تعیین مهم‌ترین عوامل محیط‌زیستی مؤثر بر خطر سیل (۲) به‌کارگیری الگوریتم‌های مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)، مدل رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS) در پهنه‌بندی خطر سیل و تعیین دقیق‌ترین مدل (۳) محاسبه مساحت تحت پوشش کلاس‌های مختلف خطر سیلاب در حوزه آبخیز مطالعاتی، می‌باشد.

مواد و روش‌ها

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد، این مطالعه با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد. مراحل کلی این مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- فلوچارت مراحل انجام مطالعه حاضر
Figure 1- Flowchart of the steps of the current study

منطقه مطالعاتی

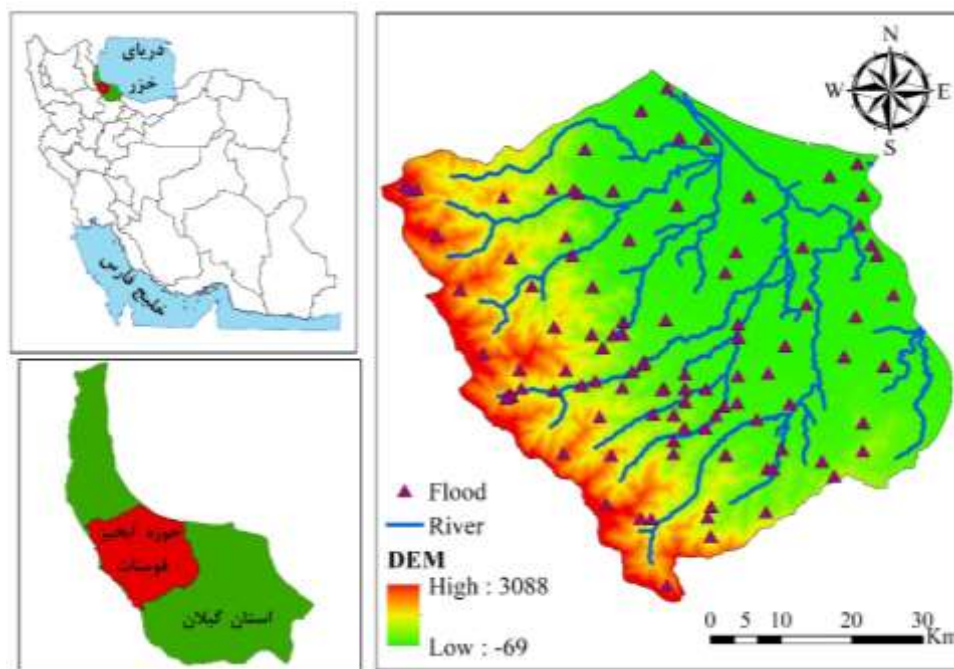
2016). این لایه‌ها شامل نقشه کاربری اراضی، درجه شیب، زمین‌شناسی، فاصله از آبراهه، نقشه رقومی ارتفاع، جهت، شکل انحنای زمین، نیمرخ انحنای زمین، بارندگی و شاخص رطوبت توپوگرافی^۱ (TWI) می‌باشند. لایه مربوط به آبراهه، جهت، درصد شیب، شکل انحنای زمین و نیمرخ انحنای زمین در محیط Arcgis و با استفاده از نقشه رقومی ارتفاع (DEM) به دست آمد. نقشه کاربری اراضی از اداره منابع طبیعی تهیه شد.

با در نظر گرفتن تأثیر ارتفاع بر میزان رواناب، این متغیر به‌عنوان فاکتور مستقل و تأثیرگذار استفاده شد. ارتفاع تأثیر زیادی بر وقوع سیل دارد به‌طوری‌که طبقات ارتفاعی کمتر پتانسیل بیشتری برای وقوع سیل دارند. به‌علاوه، با توجه به تأثیر مستقیم شیب بر رواناب سطحی و فرصت نفوذ، این فاکتور یکی از عوامل مؤثر بر وقوع سیل حوزه آبخیز در نظر گرفته می‌شود. فاصله از رودخانه یکی از مهم‌ترین عوامل در وقوع سیل به‌خصوص در اراضی مجاور می‌باشد.

حوزه آبخیز فومنت در استان گیلان واقع شده و بخشی از حوزه آبخیز درجه یک فلات مرکزی محسوب می‌شود. این منطقه در محدوده ۳۶/۸۹ تا ۳۷/۵۷ درجه عرض شمالی و ۴۸/۷۷ تا ۴۹/۶۹ درجه طول شرقی واقع شده است. این منطقه دارای مساحتی معادل ۳۵۹۵ کیلومتر مربع است که مرتفع‌ترین نقطه آن، ۳۰۸۸ متر و کم‌ارتفاع‌ترین آن، ۶۹- متر می‌باشد. میانگین بارش سالانه در این حوزه، ۷۸۰ میلی‌متر است. **شکل ۲** موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز مطالعاتی را در استان گیلان و کشور نشان می‌دهد.

روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر، ابتدا با استفاده از مرور منابع و سابقه پژوهش و نیز شناخت منطقه، نقشه و لایه‌های اطلاعاتی مرتبط با عوامل مؤثر بر پهنه‌بندی حساسیت به سیل تهیه شدند (Khosravi et al., 2016; Kourgialas & Karatzas, 2011; Rahmati et al.,



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز فومنات در استان گیلان و کشور ایران
Figure 2- Geographical location of Fomanat watershed in Gilan province and Iran

باران‌سنجی موجود در داخل و خارج از حوزه آبخیز استفاده شد. در ادامه، هم‌خطی بین فاکتورهای مورد مطالعه با استفاده از فاکتور تورم واریانس^۱ (VIF)، بررسی شد. هم‌خطی در واقع وضعیتی است که در آن یک فاکتور توصیفی با یک یا چند فاکتور دیگر رابطه خطی داشته به‌طوری‌که می‌توان آن را به صورت ترکیب خطی از دیگر فاکتورهای مورد بررسی، در نظر گرفت. زمانی که هم‌خطی بین فاکتورها در یک مدل وجود داشته باشد، ضرایب مدل معتبر نخواهد بود.

به‌علاوه، رخدادهای تاریخی سیل به‌عنوان مبنایی برای پیش‌بینی وقوع سیل مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که مناطق نزدیک به وقایع سیلاب گذشته، پتانسیل بیشتری در برابر سیل‌خیزی دارند. لذا در این مطالعه، نقاط سیل از سازمان آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شد. در همین راستا، نقاط غیرسیل با استفاده از نقشه توپوگرافی، بازدید میدانی و نرم‌افزار Google Earth انتخاب شد. در ادامه، این نقاط به عنوان متغیر وابسته به‌طور تصادفی به ۷۰٪ (برای آموزش مدل) و ۳۰٪ (برای اعتبارسنجی) تقسیم شد. ابتدا، مدل‌سازی با استفاده از ۷۰٪ داده انجام و سپس برای اعتبارسنجی از ۳۰٪ باقیمانده استفاده می‌شود.

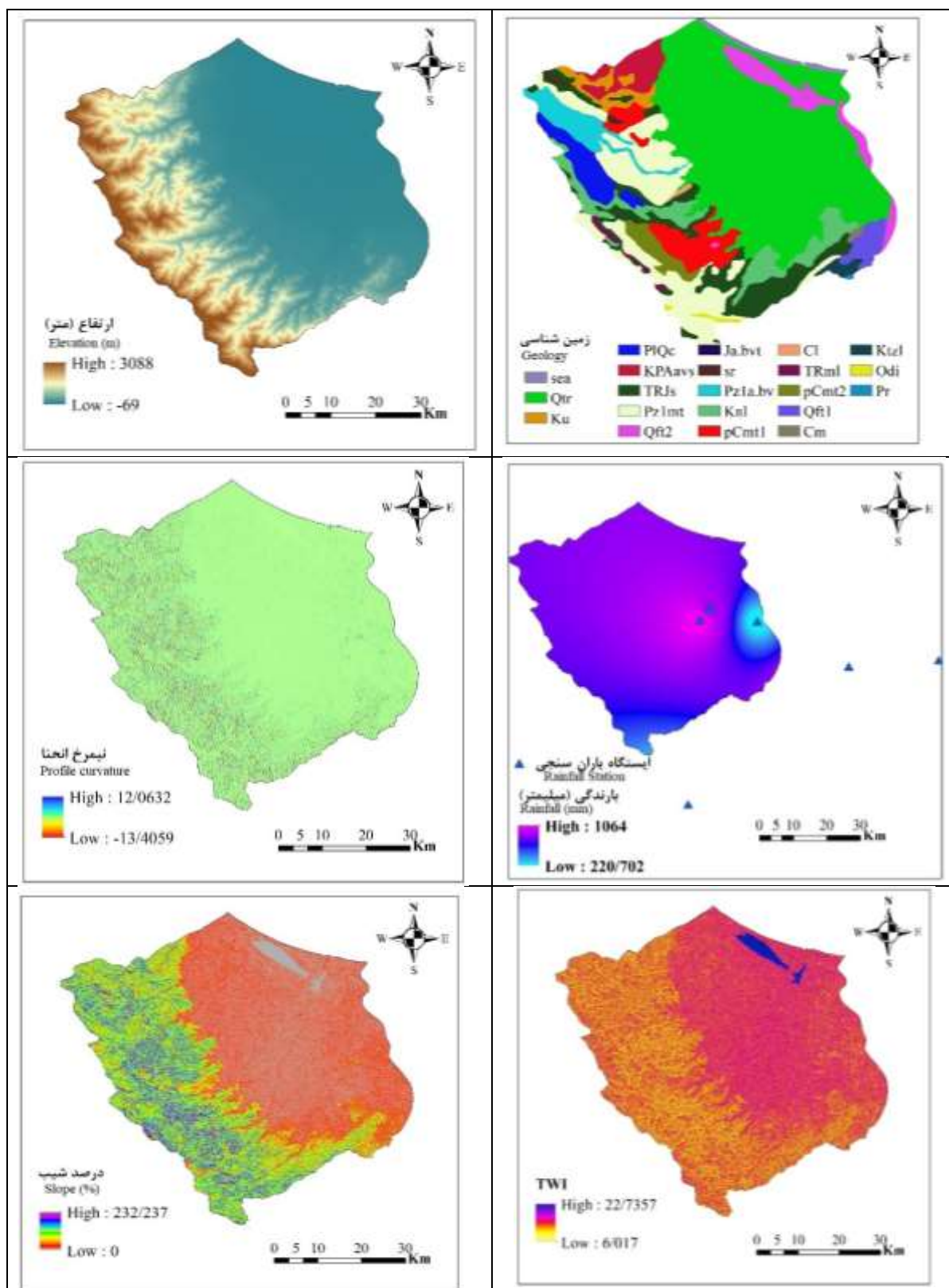
بعد از تعیین فاکتورها و نقشه‌های مذکور (شکل ۳) و تهیه بانک اطلاعاتی بر اساس مرور منابع، اقدام به تهیه نقشه پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب با استفاده از مدل خطی تعمیم‌یافته، مدل رگرسیون تطبیقی چندمتغیره و مدل درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیون شد.

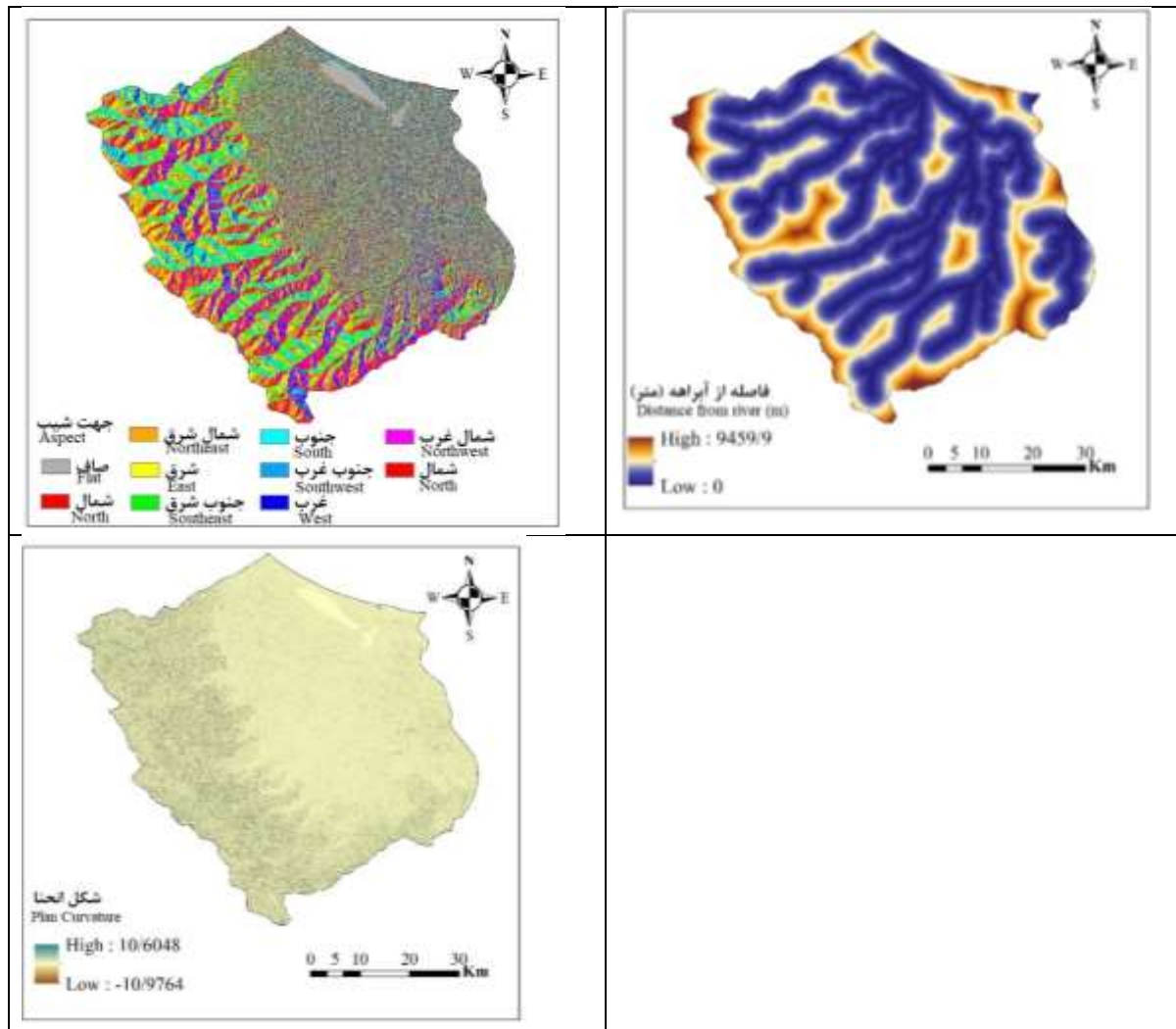
نقشه فاصله از رودخانه با استفاده از لایه رقومی شبکه جریان رودخانه حوزه آبخیز فومنات در محیط نرم‌افزار Arcgis تهیه شد. کاربری اراضی نیز نتیجه اثر متقابل فاکتورهای اجتماعی و اقتصادی و نیز توان بالقوه زمین است. تغییر کاربری اراضی می‌تواند تأثیر چشمگیری در سیل‌گیری منطقه داشته باشد (Tehrany et al., 2015). زمین‌شناسی به‌دلیل تأثیر بر میزان نفوذپذیری و در نتیجه رواناب سطحی، به‌عنوان یکی از فاکتورهای تأثیرگذار در نظر گرفته شد. شکل انحنای زمین که نشان‌دهنده همگرایی جریان و نیز انحراف آن است به‌عنوان فاکتور تأثیرگذار بر خطر سیل استفاده شد (Avand et al., 2021). نیمرخ انحنای زمین که تغییر شیب را در راستای خط جریان نشان می‌دهد (Avand et al., 2021)، به‌عنوان دیگر فاکتور مؤثر در نظر گرفته شد. این نقشه‌ها، با استفاده از مدل رقومی ارتفاع و در محیط نرم‌افزار Arcgis برای حوزه آبخیز مطالعاتی تهیه شد. شاخص رطوبت توپوگرافی نیز یکی دیگر از فاکتورهای دیگر مؤثر بر سیل بوده که در محیط SAGA GIS و با استفاده از معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$TWI = \frac{A_s}{\tan \beta} \quad (1)$$

که در آن A_s سطح ویژه حوزه آبخیز و β شیب زمین (به درصد) می‌باشد.

به‌علاوه، بارش فاکتور مؤثر دیگری بر سیلاب می‌باشد. در این پژوهش، به‌منظور تهیه لایه بارش از داده‌های ۲۰ ساله ایستگاه‌های





شکل ۳- نقشه متغیرهای مستقل و تاثیرگذار بر پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوزه آبخیز فومنات، استان گیلان
Figure 3- Map of independent and influencing variables on flood risk zoning in the Fomanat watershed, Gilan province

استفاده از آن توسط پژوهشگران به‌طور فزاینده‌ای در حال انجام است (Atkinson *et al.*, 1998). به‌علاوه، محققان از این مدل، برای داده‌ها با ساختارهای واریانس خطی و داده‌های غیرخطی و به‌خصوص داده‌های مکانی استفاده می‌کنند (Marmion *et al.*, 2009; Mirchooli *et al.*, 2019). در مدل GLM، ارتباط بین متغیرهای پیش‌بینی کننده و تابع توزیع با استفاده از معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$l = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2)$$

که در آن، l پیش‌بینی کننده خطی است که با u در معادله زیر مرتبط است:

$$f(u) = l \quad (3)$$

الگوریتم‌های یادگیری ماشین

برای پهنه‌بندی خطر سیل در منطقه مطالعاتی، مدل‌سازی لازم با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد. در این مطالعه، الگوریتم‌های زیر مورد استفاده قرار گرفت:

مدل خطی تعمیم‌یافته (GLM)

مدل خطی تعمیم‌یافته، روشی برای برقراری ارتباط بین متغیرهای وابسته و مستقل به حساب می‌آید. این مدل یکی از الگوریتم‌های یادگیری ماشین است که به‌دلیل طبیعت رگرسیونی آن، برای متغیرهای عددی مناسب می‌باشد (Kalantar *et al.*, 2020). با توجه به امکان به‌کارگیری این مدل، برای توزیع‌های مختلف و نیز برای انواع متفاوت داده‌ها، از جمله انواع داده‌های پیوسته و طبقه‌ای یا ترکیبی از آن‌ها،

باشد. در این روش، ارزیابی مدل با استفاده از داده‌های وقوع و عدم وقوع انجام می‌شود. در واقع، این منحنی حساسیت مدل نسبت به سلول‌هایی که به درستی توسط مدل پیش‌بینی شده‌اند، در مقابل درصد سلول‌های پیش‌بینی شده نسبت به کل را نشان می‌دهد. این مقادیر، نشان‌دهنده توانایی مدل برای تمایز صحیح بین مشاهدات مثبت و منفی اعتبارسنجی می‌باشد. به‌طوری‌که حساسیت زیاد بیان‌کننده تعداد زیاد مثبت‌های واقعی یا پیش‌بینی‌های درست بوده و ویژگی بالا (اختلاف 1- Specificity) بیانگر عدد کم مثبت کاذب می‌باشد. در نمودار مربوطه، مقدار مثبت کاذب (1- Specificity) در محور افقی و مقدار مثبت حقیقی (Sensitivity) در محور عمودی نشان داده می‌شود.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل VIF بین فاکتورهای مؤثر در نظر گرفته شده، در **جدول ۱** نشان داده شده است. مقدار آستانه VIF معمولاً ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، اگر مقدار VIF محاسبه شده بیشتر از این حد آستانه باشد، نشان‌دهنده وجود هم‌خطی بین فاکتورهای مورد بررسی است. با توجه به **جدول ۱**، VIF تمامی فاکتورها کمتر از ده است. لذا همه فاکتورهای برای ادامه تجزیه و تحلیل، وارد فرآیند مدل‌سازی خواهند شد.

در ادامه مدل‌سازی، حساسیت حوزه آبخیز به سیل با استفاده از مدل‌های CART، GLM و RF در نرم‌افزار R و پکیج SDM انجام شد. در این مطالعه، ورودی مدل شامل ده متغیر مستقل و نیز نقاط سیل و عدم وجود سیل بوده که به مدل‌های مورد استفاده معرفی شدند. در ادامه، خروجی این مدل‌ها، نقشه پهنه‌بندی حساسیت به سیلاب می‌باشد.

به علاوه، اهمیت فاکتورهای مؤثر بر حساسیت حوزه آبخیز به سیل با استفاده از کد getVarIm در پکیج مذکور به دست آمد. نتایج حاصل از ارزیابی این فاکتورها در **جدول ۲** نشان داده شده است. براساس نتایج حاصل، متغیرهای فاصله از رودخانه، ارتفاع و نیمرخ انحنای بیش‌ترین تأثیر را بر حساسیت منطقه به سیل داشته و در مقابل، فاکتورهای شیب، زمین‌شناسی و شاخص رطوبت توپوگرافی کم‌ترین تأثیر را داشته‌اند. این نتایج با مطالعه آوند و همکاران (Avand et al., 2021) در حوزه آبخیز تجن و نیز یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2022) در حوزه آبخیز کشکان مبنی بر اهمیت زیاد فاصله از رودخانه، هم‌راستا می‌باشد. به علاوه، این نتایج با نتایج مطالعه پورقاسمی و همکاران، (Pourghasemi et al., 2015) و نیز خسروی و همکاران، (Khosravi et al., 2016) مطابقت دارد.

مدل درخت‌های طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)

همانطور از نام این روش مشخص است، CART ساخت درختان رگرسیونی دودویی را نیز تأمین می‌نماید. درختان رگرسیونی از درختان طبقه‌بندی ساده‌ترند زیرا معیار رشد و هرس نمودن آن‌ها مشابه است. ساختار درخت رگرسیونی مشابه درخت طبقه‌بندی است فقط هر برگ یک مقدار حقیقی را پیش‌بینی می‌کند. الگوریتم CART یک پروسه افزار بازگشتی دودویی است که گره‌های والدین را دقیقاً به دو گره فرزند منشعب می‌کند و به‌طور بازگشتی منشعب کردن را تا زمانی که به یک معیار همگن برسد یا معیار توقف دیگری وجود داشته باشد (مثل تمام روش‌های رشد درخت) ادامه می‌دهد. توسعه‌ها با پرسیدن یک سوال با جواب بلی یا خیر تعیین می‌شوند. CART داده‌ها را به دو زیر مجموعه افراز می‌کند بطوریکه رکوردهای درون هر زیر مجموعه نسبت به زیر مجموعه قبلی همگن‌ترند. یک فیلد پیش‌بینی کننده چندین مرتبه در چندین سطح در درخت تکرار می‌شود. این الگوریتم از جداکننده جانشین بهره می‌گیرد تا بهترین استفاده از داده با مقادیر گمشده را داشته باشد (Rutkowski et al., 2014).

مدل رگرسیون تطبیقی چندمتغیره (MARS)

این مدل، یکی از بهترین مدل‌های مبتنی بر رگرسیون می‌باشد که می‌تواند پیش‌بینی را براساس روابط خطی و غیرخطی بین متغیرهای وابسته و مستقل انجام دهد. این مدل دارای انعطاف مناسبی برای پیش‌بینی و پهنه‌بندی مخاطرات و رویدادها براساس متغیر وابسته به متغیرهای مستقل ورودی است (Adnan et al., 2019). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این مدل آن است که روابط بین متغیرهای مستقل و وابسته را با استفاده از مجموعه‌ای از ضرایب تعریف می‌کند به‌طوری‌که اثر هر یک از آن‌ها را به‌طور جداگانه محاسبه می‌کند. بر این اساس، این مدل رگرسیونی به‌عنوان روشی مطرح می‌باشد که توابع اصلی را با فواصل مختلف از متغیرهای مستقل تعریف می‌کند (Lazarus & Constantine, 2013).

ارزیابی مدل‌های تهیه نقشه آسیب‌پذیری

به‌منظور ارزیابی مدل‌های تهیه شده، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی (ROC) استفاده شد. منحنی یک نمایش گرافیکی از موازنه بین نرخ خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از برش‌ها است. سطح زیر منحنی (AUC)، بیانگر مقدار پیش‌بینی سیستم از طریق توصیف توانایی آن در تخمین درست وقایع رخ داده و عدم وقوع رخداد آن است. ایده‌آل‌ترین مدل، بیش‌ترین سطح زیر منحنی را دارد و از ۰/۵ تا ۱ متغیر می‌باشد (Mirchooli et al., 2019). به عبارت دیگر، هرچه AUC بیشتر باشد، نقشه پهنه‌بندی تهیه شده دارای دقت بیشتری می‌باشد.

جدول ۱- نتایج آنالیز هم خطی چندگانه بین متغیرهای مستقل

Table 1- Results of multiple collinearity analysis between independent variables

فاکتورها Factors	VIF	فاکتورها Factors	VIF
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness Index	1.28	ارتفاع Elevation	2.43
زمین شناسی Geology	1.33	جهت شیب Aspect	1.01
کاربری اراضی Land use	1.16	شیب Slope	2.23
بارش Rainfall	1.15	شکل انحنا Plan curvature	1.37
فاصله از رودخانه Distance to river	1.19	نیمرخ انحنا Profile curvature	1.27

جدول ۲- اهمیت فاکتورهای مستقل مورد استفاده در حساسیت حوزه آبخیز به سیل

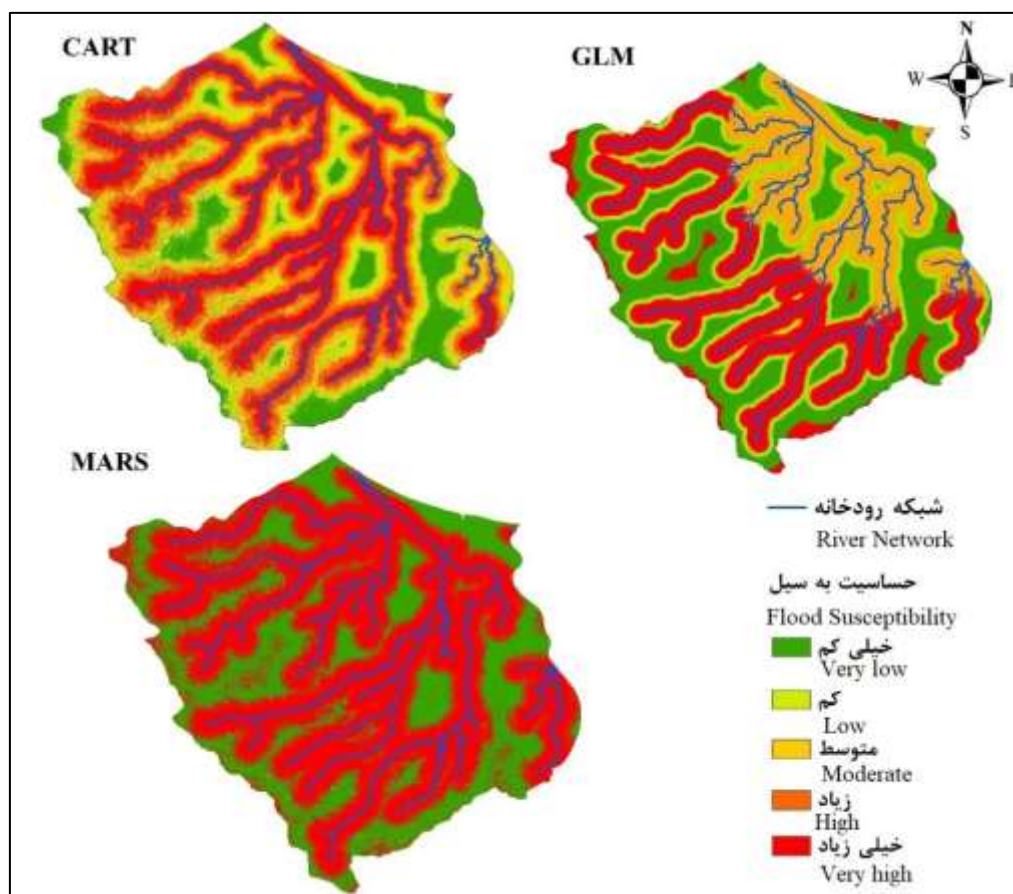
Table 2- The importance of independent factors used in the sensitivity of the watershed to floods

فاکتورها Factors	MARS	GLM	CART
ارتفاع Elevation	1.9	13.0	25.9
جهت شیب Aspect	0.0	1.6	0.0
شیب Slope	2.5	3.9	0.0
شکل انحنا Plan curvature	0.4	5.6	0.0
نیمرخ انحنا Profile curvature	0.0	19.6	0.0
شاخص رطوبت توپوگرافی Topographic Wetness Index (TWI)	0.0	0.0	0.0
زمین شناسی Geology	2.2	4.9	0.0
کاربری اراضی Land use	0.6	6.3	0.0
بارش Rainfall	0.0	5.6	0.0
فاصله از رودخانه Distance to river	30.8	56.6	63.1

جدول ۳- مساحت (درصد) مناطق موجود در کلاس های مختلف خطر سیلاب در حوزه آبخیز فومنات، ایران

Table 3- The area (percentage) of the areas in different flood risk classes in the Fomanat watershed, Iran

	خیلی زیاد Very high	زیاد High	متوسط Moderate	کم Low	خیلی کم Very low
CART	34.0	0.1	21.2	17.6	26.6
GLM	32.4	25.1	16.2	12.7	13.6
MARS	67.2	0.5	0.1	0.1	32.1



شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی حساسیت به سیل با استفاده از مدل‌های GLM، CART، MARS
Figure 4- Zoning map of flood susceptibility using GLM, CART, and MARS models

۰/۷۶، مدل CART معادل ۰/۹ و مدل GLM معادل ۰/۸۴ می‌باشد. همچنین عملکرد بهتر مدل CART در مقایسه با مدل‌های دیگر توسط شاخص‌های دیگر تأیید شد. به‌طوری‌که براساس TSS، مدل MARS معادل ۰/۵۲، مدل CART برابر ۰/۷۷ و مدل GLM معادل ۰/۶۶ به‌دست آمد. در این راستا، لازم به ذکر است که در بسیاری از مطالعات پیشین آزادی و همکاران (Azadi et al., 2020) و نیز یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2021) تنها از AUC برای ارزیابی دقت مدل‌ها، استفاده کردند؛ اما در مطالعه حاضر از هر دو شاخص AUC و TSS استفاده شده است.

نتیجه‌گیری

سیل یکی از وقایع مخاطره آمیز در نقاط مختلف ایران به‌خصوص مناطق شمالی کشور به‌حساب می‌آید. بنابراین، لازم است به‌منظور کاهش خسارات جانی و مالی ناشی از وقوع آن مطالعات لازم جهت پهنه‌بندی و تعیین اراضی تحت تأثیر با بیش‌ترین میزان خطر صورت گیرد. در این راستا، یکی از ابزارهای مناسب برای این‌گونه مطالعات،

نتایج این مطالعه مبنی بر اهمیت عامل ارتفاع بر حساسیت به وقوع سیل در حوزه مطالعاتی نیز با سایر پژوهش‌های انجام شده از جمله چاپی و همکاران، (Chapi et al., 2017)، یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2021) همخوانی دارد. تأثیر عامل ارتفاع بر وقوع سیل به این صورت است که با افزایش ارتفاع، حساسیت حوزه آبخیز به وقوع سیل کاهش می‌یابد. این موضوع به این دلیل است که در طبقات ارتفاعی پایین‌تر، به‌دلیل تجمع آب باران، احتمال وقوع سیل افزایش می‌یابد.

در نهایت، نقشه حساسیت به سیل تهیه شده، در نرم‌افزار R به پنج کلاس حساسیت خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد طبقه‌بندی شدند. براساس نتایج به‌دست آمده (جدول ۳ و شکل ۴)، مساحت‌های تحت پوشش کلاس‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد در مدل CART به‌ترتیب ۲۶/۶، ۱۷/۶، ۲۱/۲، ۱/۱ و ۳۴/۰ درصد می‌باشد. این نتایج برای مدل GLM به‌ترتیب ۱۳/۶، ۱۲/۷، ۱۶/۲، ۲۵/۱ و ۳۲/۴ درصد می‌باشد.

براساس نتایج به‌دست آمده، مدل CART عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد. به‌طوری‌که AUC در مورد مدل MARS معادل

همچنین نتایج حاصل از مدل سازی نشان داد که مدل CART کارایی بالاتری نسبت به سایر مدل های مورد استفاده، داشته است. با به کارگیری نتایج حاصل از این مطالعه می توان اقدامات مدیریتی مناسبی جهت کاهش خسارات و تلفات اتخاذ کرد. به علاوه، در کشورهای در حال توسعه که با محدودیت دسترسی به اطلاعات هیدروژئولوژیکی و ادا فیک می مواجه هستند، استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و نیز تکنیک های داده کاوی نقش مهمی در انجام مطالعات ایفا می کنند.

الگوریتم های یادگیری ماشین همراه با شناسایی فاکتورهای مؤثر بر وقوع سیل از طریق بررسی مطالعات پیشین و نیز باز دیدهای میدانی است. لذا، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت الگوریتم های یادگیری ماشین شامل مدل خطی تعمیم یافته، مدل رگرسیون تطبیقی چند متغیره و مدل درخت های طبقه بندی و رگرسیون در تعیین مناطق حساس به سیل، انجام شد. بدین منظور، ۱۰ فاکتور مؤثر محیط زیستی و نیز ۱۰۰ نقطه سیل استفاده شد. نتایج حاصل از این بررسی نشان داد که متغیر فاصله از آبراهه نقش تعیین کننده ای در وقوع سیل ها داشته و بعد از متغیرهایی مانند ارتفاع و نیم رخ طولی نقش زیادی ایفا می کنند.

References

- Adnan, R.M., Liang, Z., & Heddarn, S. (2019). Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro-meteorological data as inputs. *Journal of Hydrology*, (586), 124371. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124371>
- Atkinson, P., Jiskoot, H., Massari, R., & Murray, T. (1998). Generalized linear modelling in geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms. The Journal of the British Geomorphological Group*, 23(13), 1185-1195.
- Avand, M., & Moradi, H. (2021). Using machine learning models, remote sensing, and GIS to investigate the effects of changing climates and land uses on flood probability. *Journal of Hydrology*, 595, 125663. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125663>
- Avand, M. T., Moradi, M., Ramazanzadeh Lasboyee, Mehdi. (2021). Spatial prediction of future flood risk: an approach to the effects of climate change. *Geosciences*, 11(1), 1-20. <https://doi.org/10.3390/geosciences11010025>
- Avand, M.T., Moradi, H.R., & Ramzanzadeh Lesboi, M. (2020). Preparation of flood sensitivity map using Bayesian random forest and linear generalized machine learning models. *Environment and Water Engineering*, 6(1), 83-95.
- Avand, M., Kuriqi, A., Khazaei, M., & Ghorbanzadeh, O. (2022). DEM resolution effects on machine learning performance for flood probability mapping. *Journal of Hydro-Environment Research*, 40, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.10.002>
- Azadi, F., Sadouq, S.H., Ghahrodi, M., & Shahabi, H. (2020). Flood risk sensitivity zoning in Kashkan watershed using WOE and EBF models. *Scientific Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 45-60.
- Chapi, K., Singh, V.P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D.T., Pham, B.T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 95, 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>
- Hasanuzzaman, M., Islam, A., Bera, B., & Shit, P.K. (2022). A comparison of performance measures of three machine learning algorithms for flood susceptibility mapping of river Silabati (tropical river, India). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 127, 103198. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103198>
- Kalantar, B., Ueda, N., Saeidi, V., Ahmadi, K., Halin, A. A., & Shabani, F. (2020). Landslide susceptibility mapping: Machine and ensemble learning based on remote sensing big data. *Remote Sensing*, 12(11), 1737. <https://doi.org/10.3390/rs12111737>
- Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E., Pourghasemi, H.R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, 83, 947-987. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2357-2>
- Kourgialas, N.N., Karatzas, G.P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56, 212-225. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>
- Lazarus, E.D., Constantine, J.A. (2013). Generic theory for channel sinuosity. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 110, 8447-8452. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214074110>
- Marmion, M., Luoto, M., Heikkinen, R.K., & Thuiller, W. (2009). The performance of state-of-the-art modelling techniques depends on geographical distribution of species. *Ecological Modelling*, 220(24), 3512-3520. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.10.019>
- Mosavi, A., Golshan, M., Janzadeh, S., Choubin, B., Melesse, A.M., & Dineva, A.A. (2020). Ensemble models of GLM, FDA, MARS, and RF for flood and erosion susceptibility mapping: a priority assessment of sub-basins. *Geocarto International*, 37(9): 1-20. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1829101>
- Mirchooli, F., Motevalli, A., Pourghasemi, H.R., Mohammadi, M., Bhattacharya, P., Maghsood, F.F., & Tiefenbacher, J.P. (2019). How do data-mining models consider arsenic contamination in sediments and variables importance? *Environmental Monitoring and Assessment*, 191. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7979-x>

17. Mohammadi, M., Darabi, H., Mirchooli, F., Bakhshae, A., & Torabi Haghighi, A. (2021). Flood risk mapping and crop-water loss modeling using water footprint analysis in agricultural watershed, northern Iran. *Natural Hazards*, 105, 2007-2025. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04387-w>
18. Nachappa, T.G., Ghorbanzadeh, O., & Gholamnia, K. (2020). Multi-Hazard Exposure Mapping Using Machine Learning for the State of Salzburg, Austria. *Remote Sensing*, 12(17), 2757. <https://doi.org/10.3390/rs12172757>
19. Mosavi, A., Golshan, M., Janizadeh, S., Choubin, B., Melesse, A.M., & Dineva, A.A. (2022). Ensemble models of GLM, FDA, MARS, and RF for flood and erosion susceptibility mapping: a priority assessment of sub-basins. *Geocarto International*, 37(9), 2541-2560. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1829101>
20. Pourghasemi, H.R., & Beheshtirad, M. (2015). Assessment of a data-driven evidential belief function model and GIS for groundwater potential mapping in the Koohrang Watershed, Iran. *Geocarto International*, 30, 662-685. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.966161>
21. Pourghasemi, H.R., Kariminejad, N., Amiri, M., Edalat, M., Zarafshar, M., Blaschke, T., & Cerda, A. (2020). Assessing and mapping multi- hazard risk susceptibility using a machine learning technique. *Scientific Reports*, 10, 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60191-3>
22. Rahmati, O., Pourghasemi, H.R., & Zeinivand, H. (2016). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golestan Province, Iran. *Geocarto International*, 31, 42-70. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1041559>
23. Rutkowski, L., Jaworski, M., Pietruczuk, L., & Duda, P., (2014). The CART decision tree for mining data streams. *Information Sciences*, 266, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.12.060>
24. Seydi, S. T., Kanani-Sadat, Y., Hasanlou, M., Sahraei, R., Chanussot, J., & Amani, M. (2022). Comparison of machine learning algorithms for flood susceptibility mapping. *Remote Sensing*, 15(1), 192
25. Skilodimou, H.D., Bathrellos, G.D., Chousianitis, K., Youssef, A.M., Pradhan, B. (2019). Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78, 42. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8003-4>
26. Tehrany, M.S., Pradhan, B., & Jebur, M.N. (2015). Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29, 1149-1165. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1021-9>
27. Tehrany, M.S., Pradhan, B., & Jebur, M.N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>
28. Tehrany Shafapour, M., Pradhan, B., Mansor, S.H., & Noordin, A. (2015). Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. *Catena*, 125, 91-101.
29. Yousefi, H., Yonsei, H. A., Davoudi-Moghadam, D., Arshiya, A., & Shamsi, Z. (2022). Determination of flood potential using CART, GLM and GAM machine learning models (case study: Kashkan Basin). *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*, 12(48), 84-105.
30. Yousefi, H., Yonsei, H.A., Arshiya, A., Yarahamdi, Y., & Guderzi, A. (2021). Determining flood-prone areas with models to reduce flood risks (case study: Kashkan watershed). *Ecohydrology*, 8(1), 307-319.



Application of TOPSIS Method in the Investigation of River Water Quality (Case Study: Aji Chai River)

N. Jafari ^{1*}, Y. Dinpashoh²

1 and 2- Ph.D. Student and Professor, Department of Water, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: NedaJafari@tabrizu.ac.ir)

Received: 23-10-2023
Revised: 10-12-2023
Accepted: 12-12-2023
Available Online: 12-12-2023

How to cite this article:

Jafari, N., & Dinpashoh, Y. (2024). Application of TOPSIS method in the investigation of river water quality (Case study: Aji Chai River). *Journal of Water and Soil*, 37(6), 855-869. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84882.1344>

Introduction

The study of surface water quality control in water resources and environment management programs is very important. Surface water is one of the most important water sources that have crucial impact on agricultural, industrial, drinking and electricity production activities. Due to insufficient water sources with good quality and the increase in population growth rate and as a result of the increase in demand, the study of water quality parameters is very important. The Water Quality Index (WQI) serves as a prominent indicator in classifying surface water quality. Moreover, in recent years, the TOPSIS method has gained traction for evaluating water quality. This approach, known for its simplicity, is increasingly utilized in prioritizing river water and assessing its quality. Through this index, various components of water quality are condensed into a single numerical value, effectively expressing overall water quality. To ascertain the weight index, Shannon's entropy method was employed. Furthermore, to assess water suitability for drinking, agriculture, and industrial purposes, Schuler, Wilcox, and Piper diagrams were utilized. These diagrams provide valuable insights into the quality of water, aiding in decision-making processes regarding its utilization across different sectors. Therefore, the results of this study also confirmed the effectiveness of the TOPSIS method in identifying contaminated stations.

Materials and Methods

This research focuses on evaluating the water quality of three stations within the Aji Chai river watershed on an annual basis. These stations are identified as Arzanag, Akhola, and Markid. The assessment spans the years 2003 to 2021 and aims to classify water quality for both drinking and agricultural purposes. Utilizing the standards set forth by the World Health Organization, the surface water quality index of the Aji Chai basin is investigated to ascertain its suitability for drinking purposes. Shannon's entropy theory was used to prevent expert judgments in determining the weight of each parameter. TOPSIS method was used to classify eleven qualities including TDS, EC, pH, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and TH. In all the three stations water quality were ranked, based on TOPSIS numerical values. Also, in order to check the quality of drinking, agricultural and industrial water, Schuler, Wilcox and Piper diagrams were used.

Results and Discussion

The initial findings from the %RE error analysis revealed that throughout the entire statistical period (2003-2021), the %RE values were consistently close to zero, with the majority being positive. This suggests that the total number of cations surpasses the total number of anions. In terms of the Shannon water quality index, the results indicate that Markid



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84882.1344>

station exhibited the highest index value at 945.92, while Arzanag station displayed the lowest value at 127.365 among the surveyed stations. The results of the water quality index showed that Arzanag and Akhola stations are in an average condition ($100 < EWQI < 150$) and Markid station is in a very poor condition ($EWQI > 200$). According to Schuler's diagram, it was found that the water of Arzanag station is in the average level in terms of water quality, which is in a good position in terms of quality compared to the other two stations, while the water of Akhola station is in a good position. In the range of poor quality, Markid water was undrinkable, which ranked worst among the three stations. According to the Wilcox diagram, it was found that the water quality of Markid is very poor, which is even outside the boundary of the Wilcox diagram, while the water of Arzanag station was ranked 1st in terms of quality. Arzanag water is in C_4S_2 class in terms of quality. Finally, the water class of Akhola station was placed in the C_4S_4 class (in the Wilcox chart), which shows very low water quality. According to the TOPSIS method, the first priority in terms of water quality pollution belonged to Markid station. Two other stations, including Akhola and Arzanag, were ranked second and third in this respect. Therefore, the most important station in this basin is Markid station.

Conclusion

The results of Shannon water quality index showed that among the stations, the highest index value is related to Markid station with a value of 945.92 and the lowest one is related to Arzanag station with a value of 127.365. According to Schoeller diagram, it was found that the water quality of Arzanag station is average, compared to the other two stations, it was in the right place and the water of Akhola station was in the range of poor quality. The quality of Markid water was found to be undrinkable, which was the worst one among all the three stations. The range of TOPSIS values in different stations is between 0.054 and 0.894, which belonged to the Arzanag and Markid stations, respectively. According to the results of the Arzanag station, the best water quality condition and the Markid station were assigned the worst water quality condition among all the three stations.

Keywords: Entropy, Piper, Water quality index, Water quality rating, Wilcox

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۸۵۵-۸۶۹

کاربرد روش تاپسیس در بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه آجی‌چای)

ندا جعفری^{۱*} - یعقوب دین‌پژوه^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱

چکیده

مطالعه کیفیت آب‌های سطحی در برنامه‌های مدیریت منابع آب و محیط‌زیست از اهمیت بسزائی برخوردار است. در این تحقیق کیفیت آب حوضه آبریز آجی‌چای در مقیاس سالانه ارزیابی شد، برای این منظور، ۳ ایستگاه شامل ارزق، آخولا و مرکید، انتخاب و داده‌های کیفیت آب طی سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۸۲ جهت طبقه‌بندی کیفیت آب برای مصارف شرب و کشاورزی مورد استفاده واقع شد. جهت بررسی شاخص کیفیت آب سطحی حوضه آجی‌چای از نظر شرب کیفیت آب با استانداردهای سازمان بهداشت جهانی مقایسه شد. به‌منظور جلوگیری از قضاوت‌های کارشناسی در تعیین وزن هر یک از پارامترها، از تئوری آنتروپی شانون استفاده شد. از روش تاپسیس به‌منظور طبقه‌بندی یازده پارامتر کیفی استفاده شد. این روش ساده و پرکاربرد بوده و در اولویت‌بندی آب رودخانه‌ها و ارزیابی کیفی آن‌ها استفاده می‌شود. نتایج شاخص کیفیت آب شانون نشان داد که در بین ایستگاه‌ها، بیشترین مقدار شاخص مربوط به ایستگاه مرکید با مقدار ۹۴۵/۹۲ و کمترین آن مربوط به ایستگاه ارزق با مقدار ۱۲۷/۳۶ می‌باشد. براساس دیاگرام شولر معلوم شد که آب ایستگاه ارزق از نظر کیفیت آب در حد متوسط بوده که در مقایسه با دو ایستگاه دیگر از نظر کیفی در جایگاه مناسب و آب ایستگاه آخولا در محدوده کیفیت نامناسب قرار دارد. کیفیت آب مرکید غیرقابل شرب تشخیص داده شد که در بین سه ایستگاه بدترین جایگاه را به خود اختصاص داد. دامنه مقادیر تاپسیس در ایستگاه‌های مختلف بین ۰/۵۴ و ۰/۸۹۴ بوده که به‌ترتیب متعلق به ایستگاه‌های ارزق و مرکید می‌باشد. براساس نتایج ایستگاه ارزق بهترین وضعیت کیفی آب و ایستگاه مرکید نامناسب‌ترین وضعیت کیفی آب را در بین سه ایستگاه به خود، اختصاص دادند.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی، پایپر، رتبه‌بندی کیفیت آب، شاخص کیفیت آب، ویلکاکس

مقدمه

(Rouhani et al., 2015). شاخص کیفیت آب یکی از شاخص‌های پرکاربرد در طبقه‌بندی کیفیت آب‌های سطحی است (Sohrabizadeh et al., 2018). استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM^۳) از پرطرفدارترین رویکردهای حل مسائل کیفی آب است. همچنین روش تاپسیس^۴ به عنوان یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در سال‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای جهت ارزیابی کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفته است. روش تاپسیس قادر است گزینه مناسب را از بین تعداد کثیری گزینه‌های کاندیدا با استفاده از فاصله انتخاب کند طوری که گزینه‌ای که بیشترین فاصله از ایده‌آل منفی و کمترین

آب‌های سطحی جاری در رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب شیرین هستند که نسبت به تغییر فرایندهای طبیعی مانند بارندگی، دما، پوشش جنگلی و تغییرات آب و هوایی بسیار حساس هستند (Khan et al., 2023). همچنین آب‌های سطحی تأثیر مهمی در فعالیت‌های کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند. با توجه به کمبود منابع آب با کیفیت مناسب و افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش تقاضا، مطالعه کیفیت پارامترهای کیفی آب از اهمیت زیادی برخوردار است

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و استاد، گروه آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: NedaJafari@tabrizu.ac.ir)

در رتبه‌های اول تا سوم و سد تاریک در رتبه آخر قرار دارد. فاطیما و همکاران (Fatima et al., 2022) کیفیت آب شرب دره باشو^۲ در منطقه اسکاردو^۳ در بریتانیا را بررسی کردند. آن‌ها برای این منظور از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) و شاخص کیفیت آب (WQI) استفاده کردند. همچنین به منظور پهنه‌بندی منطقه از روش وزن فاصله معکوس (IDW) استفاده کردند. نتایج حاصل براساس WQI، PCA و IDW نشان داد که منابع اصلی آلودگی به احتمال زیاد، فعالیت‌های انسانی از جمله تخلیه آلاینده‌ها از بخش‌های بالادست می‌باشد. سیپی و پارمار (Sippi & Parmar, 2022) از روش تاپسیس برای رتبه‌بندی ۴۶۸ ایستگاه هیدرومتری در ۱۹ ایالت هند از هشت پارامتر کیفیت آب شامل اکسیژن محلول (DO)، دما، هدایت، pH، نیاز بیوشیمیایی اکسیژن (BOD)، نیترات (NO_3^-)، کلیفرم مدفوعی (FC) و کلیفرم کل (TC) استفاده کردند. نتایج نشان داد که بهترین گزینه‌هایی با DO بالا، BOD پایین و FC و TC پایین بودند، ضمناً معلوم شد که بدترین گزینه‌ها، گزینه‌هایی با سطوح بسیار بالای BOD، FC و TC بودند.

بوشان و همکاران (Bhushan et al., 2023) کیفیت آب در بخش کشاورزی برای زیرحوضه بادوا-چاندان^۴ در هند را ارزیابی کردند. نتایج تحلیل نمونه‌های مورد مطالعه، بر اساس نمودار پایپر نشان داد که تمام نمونه‌ها متعلق به آب از نوع $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^-$ هستند. همچنین نتایج نمودار ویلکاکس نشان داد که ۲۳ درصد نمونه‌ها در رده عالی تا خوب و ۸۴/۵۳ درصد از نمونه‌ها در رده خوب تا مجاز قرار گرفتند که ۷۶ درصد از نمونه‌ها برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود. باین حال، در نمودار آزمایشگاهی شوری ایالات متحده، ۷۷ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی در دسته $\text{C}_3 \text{S}_1$ قرار گرفتند که نشان دهنده شوری بالا و خطر سدیم کم برای اهداف آبیاری می‌باشد. مانو و همکاران (Manu et al., 2023) کیفیت آب سطحی و زیرزمینی را برای حوضه پرا^۵ (غنا) در ۹۰ نمونه به منظور اهداف شرب و کشاورزی بررسی کردند. ارزیابی کیفیت آب با استفاده از شاخص کیفیت آب (WQI) نشان داد که ۷۴ درصد از آب‌های سطحی و ۲۰ درصد از نمونه‌های آب زیرزمینی کیفیت شرب پایینی دارند و بنابراین، نمی‌توان از آن‌ها برای مصارف شرب استفاده کرد. برای آبیاری، آب‌های سطحی و زیرزمینی براساس نسبت جذب سدیم (SAR)، نمودار Wilcox و شاخص‌های شوری ایالات متحده (USSL) کیفیت خوبی دارند. هرچند روش تاپسیس در مطالعات مختلف بکار گرفته شده است ولی به نظر می‌رسد تاکنون در رتبه‌بندی ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه آبریز آچی‌چای از نظر کیفیت آب کار نشده است. بنابراین اهداف اصلی این

فاصله از ایده‌آل مثبت را دارد به عنوان گزینه بهینه قلمداد می‌کند. روش تاپسیس، نسبت به دیگر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مانند (MCDM) دارای مزایایی مانند داشتن پایه و اساس ریاضی مناسب، داشتن مفهوم منطقی و قابلیت درک آسان آن است (Galik et al., 2022). این رویکرد به تصمیم گیرنده اجازه مقایسه گزینه‌های مختلف را به طور مؤثر در اختیار قرار می‌دهد تا بتواند مناسب‌ترین و امیدوارکننده ترین راه حل (ها) را از بین تعداد زیادی راه‌حل‌ها شناسایی کند (Behzadian et al., 2012; Srdjevic et al., 2004). لی و همکاران (Li et al., 2012) به منظور بهبود سیستم ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی در شهر شیزویشان^۱ واقع در شمال غرب چین از یک مدل ارزیابی جفت شده جدید مبتنی بر کاهش ویژگی مجموعه ناهنجار و روش شباهت به راه‌حل ایده‌آل (تاپسیس) استفاده کردند. بنا به گزارش آنان، با ارزیابی جامع معلوم شد که همه نمونه‌های آب برای مصارف شرب مناسب بودند. امیری و همکاران (Amiri et al., 2014) کیفیت آب زیرزمینی و مناسب بودن آن برای شرب در سفره آب دشت لنجانان ایران مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای این منظور از شاخص کیفیت آب وزن دار آنتروپی (EWQI) برای نمونه‌های آب زیرزمینی استفاده کردند. فلاح و همکاران (Fallah et al., 2018)، به منظور ارزیابی وضعیت کیفیت آب، پارامترهای اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، اکسیژن محلول، دمای آب، اسیدیته، کدورت، کل مواد جامد محلول، فسفات، نیترات و کلیفرم مدفوعی در تالاب بین‌المللی انزلی به صورت فصلی در ۱۰ ایستگاه را در سال ۱۳۹۳ بررسی کردند و وضعیت کیفیت آب را به وسیله روش تاپسیس ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش تاپسیس در بررسی تغییرات کیفی منابع آب موفق بوده است. براین اساس مشخص شد که تالاب بین‌المللی انزلی دارای کیفیت آب متوسط است. اسدی و بیات (Asadi & Bayat, 2019) به منظور ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت زنجان از روش‌های EWQI و تاپسیس استفاده کردند. نتایج نشان داد که کلر، مؤثرترین پارامتری است که کیفیت آب زیرزمینی دشت زنجان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ایشان گزارش دادند که ایستگاه ینگجه به عنوان ایستگاه با کیفیت آب عالی و ایستگاه کوشکن به عنوان ایستگاه با کیفیت آب نامطلوب می‌باشد. میربلوکی و همکاران (Mirbolooki et al., 2021) به منظور بررسی کیفیت آب سدهای انحرافی از روش‌های آنتروپی شانون و تاپسیس بهره گرفتند. نتایج آنتروپی شانون نشان داد که بیشترین وزن مربوط به مواد معلق در آب (TSS) با مقدار ۰/۱۹۷ و کمترین آن مربوط به pH با مقدار صفر می‌باشد. نتایج آزمون تاپسیس نشان داد که براساس وزن‌های برگرفته از آنتروپی و شاخص‌های کیفیت آب، سدهای پسیخان، پلرود و شاخزر

4- Badua-Chandan

5- Pra

1- Shizuchina

2- Basho

3- Skardu

داده های مورد استفاده

در این مطالعه پس از جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز مرتبط با کیفیت آب حوزه آبریز آجی‌چای، از جمله داده‌های مربوط به پارامترهای K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , pH, EC, TDS و TH همچنین داده‌های مربوط به دبی و دما (برای رسم دیگرام شولر منحصر به عنوان ورودی برنامه Chemisty استفاده شد)، برای تحلیل کیفیت آب منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. داده‌ها از شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی اخذ شد، دوره آماری مورد مطالعه در این پژوهش ۱۴۰۰-۱۳۸۲ می‌باشد. ایستگاه‌های ارزق، آخولا و مرکید در این مطالعه انتخاب شدند جهت بازسازی داده مفقود از میانگین سال‌های ماقبل و مابعد استفاده شد. آمار مربوط به سال ۱۳۹۷ برای هر سه ایستگاه در دسترس نبود. این واقعیت موجب شد که ۵/۲۶ درصد داده گمشده داشته باشیم. هرچند بازسازی داده‌ها می‌تواند روی نتایج تاحدودی اثرگذار باشد ولیکن میزان تأثیر آن با توجه به درصد پایین داده‌های گم شده ناچیز به نظر می‌رسد.

روش‌های مورد استفاده

قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، کنترل کیفی داده‌ها با محاسبه درصد خطای تعادل یونی یا خطای بیلان بار (RE) به شرح زیر به انجام رسید (Derdour et al., 2020; Aouiti et al., 2021):

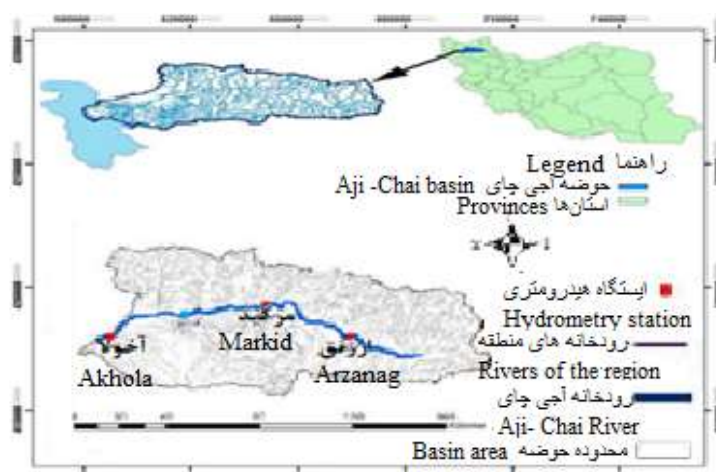
$$\%RE = \frac{\sum Cations - \sum Anions}{\sum Cations + \sum Anions} \times 100 \quad (1)$$

مطالعه عبارتند از ۱- محاسبه شاخص کیفیت آب برای ایستگاه‌های منتخب حوزه آبریز آجی‌چای ۲- طبقه‌بندی آب ایستگاه‌ها از نظر مصارف شرب و کشاورزی و ۳- رتبه‌بندی ایستگاه‌های منتخب از نظر کیفیت آب با استفاده از روش تاپسیس.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبریز آجی‌چای واقع در شمال غرب ایران است که به عنوان یکی از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه واقع در شرق آن است. این حوزه به لحاظ موقعیت جغرافیایی بین عرض‌های $37^{\circ} 42' 30''$ تا $38^{\circ} 30' 30''$ شمالی و طول‌های $45^{\circ} 40' 30''$ تا $47^{\circ} 53' 30''$ شرقی واقع شده است. این حوزه از ارتفاعات کوه سبلان تا غرب آذرشهر گسترش یافته و همه آب‌های جاری از انشعابات مختلف آن در رودخانه آجی‌چای جمع‌آوری و در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد (Sanikhani et al., 2014). شهرهای سراب، تبریز، بستان آباد در این حوزه واقع هستند. حوزه آبریز آجی‌چای یکی از مهم‌ترین زیرحوضه‌های هفت‌گانه حوزه آبریز دریاچه ارومیه بعد از زیرحوضه‌ی سیمینه رود و زرینه رود با وسعتی معادل ۱۱۲۷۸/۸ کیلومتر مربع است. از انشعابات این رودخانه می‌توان به رودخانه‌های لبقوان، سیخ‌چای، تاجیار، نهند و اوجان‌چای اشاره کرد. دمای متوسط سالانه این حوزه حدود ۱۱/۳ درجه سلسیوس و متوسط بارش سالانه برابر با ۳۲۰ میلی‌متر می‌باشد (Isazadeh et al., 2023). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز آجی‌چای را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبریز آجی‌چای
Figure 1-Geographical location of Aji-Chai basin

(۵) محاسبه شد:

$$P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (5)$$

آنتروپی اطلاعات با e_j نشان داده می‌شود که از رابطه زیر برآورد شد:

$$e_j = - \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \frac{1}{\ln(m)} \quad (6)$$

هر چه مقدار e_j کوچکتر باشد، تأثیر شاخص j بیشتر است (Shannon, 1988). سپس وزن پارامتر j ام آنتروپی که با w_j نشان داده می‌شود از رابطه زیر تخمین زده شد (Ukiah et al., 2020):

$$w_j = \frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (7)$$

که در آن، w_j به‌عنوان وزن پارامتر کیفی j ام و n تعداد کل پارامترهای کیفی مورد مطالعه می‌باشد. در نهایت، شاخص کیفیت آب آنتروپی به‌صورت زیر محاسبه گردید. مقیاس درجه‌بندی کیفیت (q_j) برای پارامتر کیفی j ام به‌صورت زیر تعریف شد:

$$q_j = \frac{c_j}{s_j} \times 100 \quad (8)$$

در این رابطه c_j ، غلظت پارامتر کیفی j ام در هر نمونه آب (برحسب میلی گرم بر لیتر) و s_j غلظت استاندارد جهانی همان پارامتر برای کیفیت آب آشامیدنی (برحسب میلی گرم بر لیتر) می‌باشد (WHO, 2011). در نهایت، شاخص EWQI از فرمول زیر محاسبه شد:

$$EWQI = \sum_{j=1}^n w_j q_j \quad (9)$$

جدول ۱ طبقه‌بندی کیفی آب را با استفاده از شاخص کیفی EWQI نشان می‌دهد.

روش تصمیم‌گیری چندمعیاره تاپسیس

هدف از این روش رتبه‌بندی ایستگاه‌های آب‌سنجی از نظر کیفیت آب است. این تکنیک توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ ارائه شد (Hwang & Yoon, 1981). در روش رتبه‌بندی به روش تاپسیس ابتدا یک مقدار ماکزیمم یا مینیمم برای شاخص‌های استاندارد شده وزن دار در نظر گرفته می‌شود. سپس فاصله هر گزینه از نقطه ایده‌آل و نقطه ایده‌آل منفی بدست می‌آید. بهترین گزینه، گزینه‌ای است که کمترین فاصله از نقطه ایده‌آل و بیشترین فاصله را از نقطه ایده‌آل منفی داشته باشد (Jafari, 2019; Ortega et al., 2018). برای انجام روش تاپسیس مراحل زیر در نظر گرفته شد:

۱- تشکیل ماتریس داده‌های کیفی

اگر مقدار RE (بر حسب درصد) بین ۱- و ۱+ باشد، دقت تحلیل عالی ارزیابی می‌شود ولی اگر مقدار RE بر حسب درصد بین ۵- و ۵+ باشد دقت قابل قبول و اگر بین ۱۵- و ۱۵+ باشد دقت تحلیل ضعیف ارزیابی می‌شود (Derdour et al., 2020). پس از کنترل کیفیت داده‌ها شاخص کیفیت آب به شرح زیر بررسی گردید:

شاخص کیفیت آب آنتروپی

در طی فرآیند محاسبه شاخص کیفیت آب، وزن هر پارامتر معمولاً توسط کارشناسان با توجه به تجربه عملی آنها ارائه می‌شود که ذهنی است، بنابراین، اطلاعات مفید و ارزشمندی در مورد کیفیت آب از بین می‌رود. به‌منظور اجتناب از قضاوت شخصی در مورد وزن پارامترها، از روش آنتروپی شانون برای تخصیص وزن به هر پارامتر استفاده می‌شود (Amiri et al., 2014).

وزن‌دهی به شاخص‌ها با روش آنتروپی شانون

روش آنتروپی در سال ۱۹۷۲ به وسیله شانون و ویور^۱ معرفی شد. در این روش هرچه میزان پراکندگی در مقدار یک شاخص مشخص بیشتر باشد آن شاخص دارای اهمیت بیشتری است (Shannon, 1988). مراحل اصلی استفاده از روش ضریب آنتروپی برای تعیین وزن ها به صورت زیر است: برای محاسبه وزن آنتروپی اگر m نمونه آب ($i=1, 2, \dots, m$) با n پارامتر کیفی ($j=1, 2, \dots, n$) برای ارزیابی کیفیت آب در نظر گرفته شود ابتدا ماتریس X به صورت زیر در نظر گرفته شد (Jafari, 2019; Awasthi et al., 2023):

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

برای از بین بردن تأثیر واحدهای مختلف شاخص‌های مشخصه و درجه‌های کمیت متفاوت کیفیت، داده‌ها بشرح رابطه (۳) نرمال‌سازی شدند. برای این کار، ماتریس X با رابطه (۳) به ماتریس Y که درایه های آن با y_{ij} نشان داده می‌شوند، تبدیل شد:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} \quad (3)$$

ماتریس Y پس از نرمال‌سازی به صورت زیر تعریف شد:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \dots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

که در آن m تعداد نمونه‌های آب (معادل تعداد سال‌های نمونه برداری) و n تعداد پارامترهای کیفی آب است. سپس نسبت مقدار شاخص پارامتر j ام در نمونه i ام که با P_{ij} نشان داده می‌شود از رابطه

جدول ۱- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس شاخص کیفی (Zhang et al., 2020)

Table 1- Qualification of water quality based on quality index (Zhang et al., 2020)

مقدار شاخص Index value	50>	50-100	100-150	150-200	200<
رتبه Rank	1	2	3	4	5
کیفیت آب Water quality	عالی Excellent	خوب Good	متوسط Medium	ضعیف Poor	شدت ضعیف Extremely poor

۶- محاسبه اندازه فاصله گزینه λ_m بر اساس نرم اقلیدوسی از ایده‌آل‌ها مثبت و منفی (Meshram et al., 2020):

$$di^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vij - vj^+)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$di^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (vij - vj^-)^2} \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

۷- تعیین ضریب نزدیکی نسبی گزینه λ_m (C_i) به راه حل ایده آل.

$$ci^+ = \frac{di^-}{di^- + di^+} \quad (19)$$

که در آن:

di^+ بیشترین فاصله با نقطه ایده‌آل مثبت، di^- کمترین فاصله با نقطه ایده‌آل منفی، vj^+ مقدار بیشینه برای شاخص‌های استاندارد وزن دار، vj^- مقدار کمینه برای شاخص‌های استاندارد وزن دار می‌باشد.

بررسی کیفیت آب جهت مصارف شرب و کشاورزی

نمودار شولر

نمودار شولر یک نمودار نیمه لگاریتمی از غلظت اجزای اصلی یونی در آب (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^-) است. این نمودار نیمه لگاریتمی که تجزیه و تحلیل یون‌های اصلی را بر حسب واحد meq/l نشان می‌دهد، انواع مختلف کیفیت شیمیایی آب را در یک نمودار نشان می‌دهد (Sarikhani et al., 2015). از این نمودار برای مطالعه کیفیت آب ایستگاه‌های منتخب استفاده شد.

نمودار ویلکاکس

نمودار ویلکاکس با استفاده از پارامترهایی از جمله شوری و نسبت جذب سدیم برای ارزیابی آب برای مصارف کشاورزی استفاده می‌شود. شوری آب با EC و قلیائیت آن با SAR مشخص می‌شود. در این مطالعه، SAR از رابطه (۲۰) محاسبه شد (Alavi et al., 2016).

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (20)$$

که در آن Na^+ ، Ca^{2+} و Mg^{2+} به ترتیب، غلظت پارامترهای سدیم، کلسیم و منیزیم می‌باشد. براساس مقادیر EC و SAR می‌توان کیفیت

در این مطالعه داده‌های کیفیت آب در یک ماتریس بنام A بشرح زیر در نظر گرفته شد:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن a_{ij} متغیر کیفی λ_m در سال λ_m ، اندیس i شماره سال (بسته به هر ایستگاه متفاوت است) و j شماره متغیر کیفی آب رودخانه (از یک تا ۱۱ در این مطالعه) است. ضمناً m تعداد سال‌ها و n تعداد متغیرهای کیفی آب است.

۲- استاندارد نمودن درایه‌های ماتریس A:

با استفاده از رابطه زیر درایه‌های ماتریس A استاندارد شدند.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (11)$$

ماتریس استاندارد شده با R نشان داده شد طوری که:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

۳- تعیین وزن هر پارامتر کیفی آب رودخانه (w_i):

برای تعیین وزن هر کدام از پارامترهای کیفیت آب از شیوه آنتروپی شانون که قبلاً شرح داده شد، استفاده گردید.

پس از تعیین وزن هر پارامتر که با نماد W نشان داده می‌شود، ماتریس جدیدی بنام V بشرح زیر تشکیل داده شد:

۴- درایه‌های ماتریس جدید V به شرح زیر در نظر گرفته شدند (Zarei et al., 2011):

$$V_{ij} = R_{ij} \cdot w_n \times m \quad (13)$$

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

۵- تعیین ایده‌آل‌های مثبت و منفی (بالاترین و پایین‌ترین عملکرد در هر شاخص)

$$A^+ = \{(\max V_{ij} | j \in J), (\min V_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^+, V_2^+, V_3^+, \dots, V_4^+, \dots, V_n^+\} \quad (15)$$

$$A^- = \{(\min V_{ij} | j \in J), (\max V_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^-, V_2^-, V_3^-, \dots, V_4^-, \dots, V_n^-\} \quad (16)$$

آب را در دیاگرام ویلکاکس مشخص کرد. جدول ۲ طبقه‌بندی کیفیت آب را برای مصارف کشاورزی نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

جدول ۳ خلاصه نتایج بررسی خطای تعادل یونی را برای ایستگاه‌های منتخب در طی دوره آماری نشان می‌دهد. بطوری‌که از این جدول استنباط می‌شود، در هر سه ایستگاه، طی کل دوره آماری

(۱۳۸۲-۱۴۰۰) مورد بررسی بین ۱- و ۱+ می‌باشد. حدود ۹۸/۲۴٪ نمونه‌ها RE بین ۱- و ۱+ داشتند. مقدار RE در سال ۱۳۸۲ برای ایستگاه آخولا بیشتر از ۱ بود (جدول ۳). این نتیجه نشان می‌دهد آزمایش شیمیایی نمونه‌ها در هر سه ایستگاه به درستی انجام شده است. درصد خطای ۵٪ در مطالعات قابل قبول گزارش شده است (Azish *et al.*, 2019)، بنابراین، براساس خطای تعادل یونی تقریباً، تمام نمونه‌های اندازه‌گیری شده از نظر دقت اندازه‌گیری مورد قبول می‌باشند.

جدول ۲- طبقه‌بندی آب جهت مصارف کشاورزی براساس نمودار ویلکاکس (Goudarzi *et al.*, 2022)

Table 2- Classification of water for agricultural purposes based on the Wilcox chart (Goudarzi *et al.*, 2022)

طبقه بندی آب	نوع کیفیت آب برای کشاورزی
Water category	Type of water quality for agriculture
C ₁ S ₁	آب شیرین، کاملاً بی‌ضرر برای کشاورزی
C ₂ S ₁ , C ₂ S ₂ , C ₁ S ₂	Freshwater, completely harmless to agriculture
C ₃ S ₃ , C ₃ S ₂ , C ₃ S ₁ , C ₂ S ₃ , C ₁ S ₃	کمی شور، تقریباً مناسب برای کشاورزی
	Slightly salty, almost suitable for agriculture
C ₁ S ₄ , C ₂ S ₄ , C ₃ S ₄ , C ₄ S ₄ , C ₄ S ₂ , C ₄ S ₁	آب شور، برای کشاورزی با تمهیدات لازم
	Saltwater, for agriculture with the necessary preparations
	بسیار شور، مضر برای کشاورزی
	Very salty, harmful to agriculture

جدول ۳- نتایج بررسی درصد خطای تعادل یونی (%RE)

Table 3- The results of checking the percentage of ion balance error (%RE)

سال	ارزنق	آخولا	مرکید
Year	Arzanag	Akhola	Markid
1382 (2003)	0.102	-1.185	-0.0539
1383 (2004)	-0.001	-0.008	0.182
1384 (2005)	0.0258	0.017	0.009
1385 (2006)	0.031	0.010	0.017
1386 (2007)	0.013	0.002	0.000
1387 (2008)	0.009	-0.008	-0.433
1388 (2009)	0.015	0.008	0.006
1389 (2010)	0.020	-0.012	0.007
1390 (2011)	0.028	0.012	0.007
1391 (2012)	0.044	0.040	0.007
1392 (2013)	0.052	0.043	0.018
1393 (2014)	0.071	0.042	0.007
1394 (2015)	0.033	0.047	-0.002
1395 (2016)	0.038	0.050	0.003
1396 (2017)	0.052	0.047	0.006
1397 (2018)	0.062	0.030	0.021
1398 (2019)	0.048	0.023	0.004
1399 (2020)	0.014	0.027	0.000
1400 (2021)	0.045	0.027	0.008

جدول ۴- خلاصه آمار توصیفی برخی از پارامترهای مورد مطالعه و حد مطلوب WHO برای آب شرب

Table 4- Summary of descriptive statistics of studied parameters and WHO's optimal limit for drinking water

پارامتر Parameter	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Average	انحراف معیار Standard deviation	حد مطلوب WHO WHO optimal limit
TDS(mg/l)	1524.54	13762.94	6122.27	6662.52	100
EC(μ mhos/cm)	2249.65	21179.14	9424.19	10250.22	1500
pH	7.79	7.86	7.83	0.036	8.5
HCO ₃ ⁻ (mg/lit)	179.77	311.97	246.73	66.11	120
Cl ⁻ (mg/l)	467.53	8432.73	3401.37	4377.31	250
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	276.04	892.72	491.04	348.15	250
Ca ²⁺ (mg/l)	114.99	390.29	212.85	153.94	200
Mg ²⁺ (mg/l)	55.90	132.93	83.52	42.66	150
Na ⁺ (mg/l)	287.28	5227.88	2117.35	2715.89	200
K ⁺ (mg/l)	6.83	12.36	9.62	2.76	12
سختی (mg/l CaCO ₃) کل (TH)	548.45	1529.63	881.39	561.46	300

می‌دهد در این ایستگاه مقدار فاصله از ایده‌آل مثبت ($d_i^+ = 0/017$) و از ایده‌آل منفی ($d_i^- = 0/151$) می‌باشد، بنابراین، ادعای ما را در وضعیت کیفی آب حوضه آبریز آبی‌چای تأیید می‌کند (جدول ۶).

جدول ۵- مقادیر محاسبه شده شاخص EWQI براساس میانگین سالانه در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید طی دوره آماری (۱۳۸۲-۱۴۰۰)

Table 5- Calculated values of EWQI index based on the annual average in three stations of Arzanag, Akhola and Marki during the statistical period (2003-2021)

ایستگاه Station	مقدار شاخص EWQI EWQI index value	وضعیت کیفیت آب Water quality status
ارزنق Arzanag	127.36	متوسط Medium
آخولا Akhola	219.67	متوسط Medium
مرکید Markid	945.92	بشدت ضعیف Extremely poor

بعد از آن رتبه دوم مربوط به ایستگاه آخولا با مقدار فاصله از ایده‌آل مثبت ($d_i^+ = 0/136$) و فاصله از ایده‌آل منفی ($d_i^- = 0/028$) و همچنین ایستگاه ارزنق بیشترین فاصله از راه حل ایده‌آل ($d_i^+ = 0/151$) و کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی ($d_i^- = 0/008$) را داشت. بنابراین با توجه به نزدیک بودن مقدار (C_i^+) به عدد یک در ایستگاه مرکید، این ایستگاه بدترین وضعیت کیفی را در بین دو ایستگاه دیگر نشان می‌دهد. بنابراین بالاترین رتبه تاپسیس نشان دهنده آلوده‌ترین ایستگاه می‌باشد.

در این پژوهش ۱۱ پارامتر جهت کیفیت آب رودخانه آبی‌چای مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۴ خلاصه خصوصیات آماری نمونه‌های مورد بررسی را به همراه استاندارد WHO برای آب شرب نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر (بیشترین مقدار از بین هر سه ایستگاه در کل دوره آماری) تمامی پارامترها و مقدار حداقل (کمترین مقدار از بین هر سه ایستگاه در کل دوره آماری) تمامی پارامترها (بجز Ca^{2+} ، Mg^{2+} و K^+) بیشتر از حد مطلوب WHO برای آب شرب است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت آب ایستگاه‌ها از لحاظ شرب در وضعیت مطلوبی قرار ندارد.

ارزیابی شاخص کیفیت آب

در مرحله بعد با روش آنتروپی شانون به وزن‌دهی هر یک از پارامترها پرداخته و مقدار شاخص EWQI محاسبه شد. که در جدول ۵ نتایج مقدار شاخص کیفیت آب ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که ایستگاه‌های ارزنق و آخولا در وضعیت متوسط ($100 < EWQI < 150$) و ایستگاه مرکید در وضعیت بشدت ضعیف ($EWQI > 200$) قرار دارد.

رتبه‌بندی ایستگاه‌ها با استفاده از روش تاپسیس

نتایج پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های مختلف حوضه آبریز آبی‌چای نشان داد که در ایستگاه مرکید تمام پارامترهای کیفیت آب (بجز پارامتر HCO_3^-) بیشتر از ایستگاه‌های دیگر می‌باشد، در عین حال، ایستگاه مرکید براساس رتبه‌بندی تاپسیس حداکثر مقدار نزدیکی نسبی به راه حل ایده‌آل مثبت (C_i^+) (با بدترین شرایط کیفیت آب) را نشان

میلی گرم در لیتر می باشد که در محدوده متوسط و بدترین وضعیت مربوط به ایستگاه مرکید است با مقدار TDS، ۱۳۷۶۲/۹۴ میلی گرم در لیتر و در محدوده غیر قابل شرب قرار دارد (شکل ۲).

ارزیابی کیفیت آب جهت مصارف کشاورزی با استفاده از دیاگرام ویلکاکس

نتایج بررسی کیفیت شیمیایی آب ایستگاه های منتخب در حوضه آبی چای طی دوره مطالعاتی مورد بررسی به وسیله دیاگرام ویلکاکس نشان می دهد کیفیت آب ایستگاه مرکید بسیار نامناسب می باشد که حتی در خارج از مرزهای دیاگرام ویلکاکس قرار گرفته است. بعد از آن ایستگاه آخولا بدترین کیفیت را دارد به طوری که در محدوده کلاس C₄S₄ قرار دارد و در نهایت، آب ایستگاه ارزنق در محدوده کلاس C₄S₂ قرار دارد، که این موضوع نشان دهنده آب با کیفیت نامناسب (شور- برای کشاورزی نامناسب) برای آبیاری و کشاورزی در این محدوده می باشد (شکل ۳).

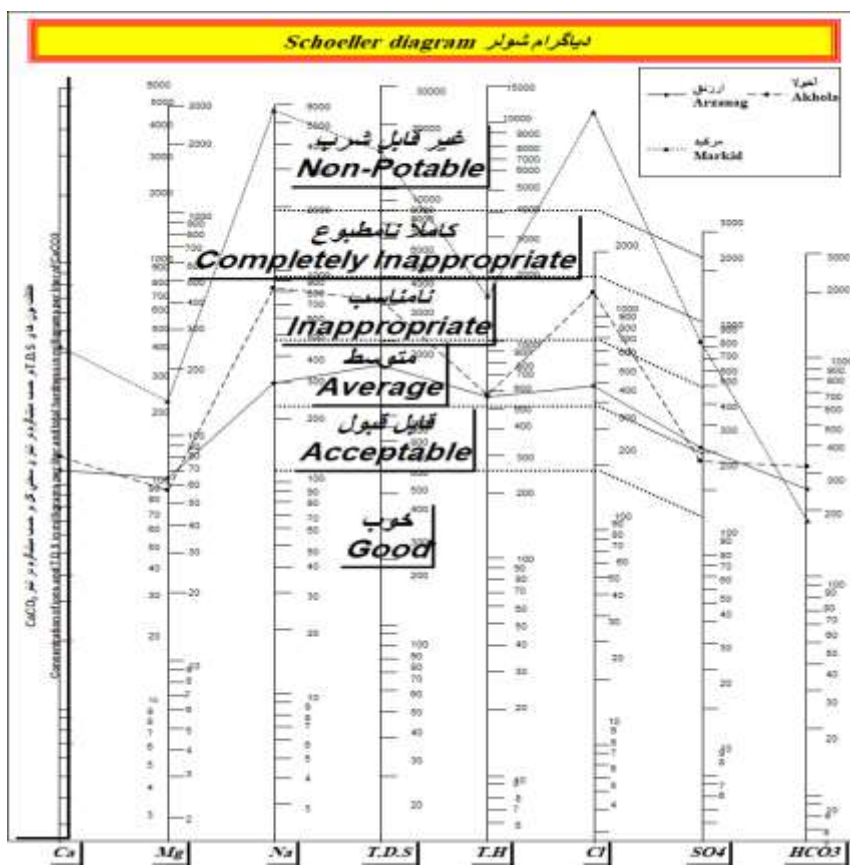
جدول ۶- نتایج مربوط به رتبه بندی ایستگاه ها با روش تاپسیس در حوضه آبریز آبی چای

Table 6- Results of ranking of the selected stations using the TOPSIS method in Aji Chai basin

ایستگاه Station	di ⁺	di ⁻	ci ⁺	رتبه Rank
مرکید Markid	0.017	0.151	0.894	1
آخولا Akhola	0.136	0.028	0.171	2
ارزنق Arzanag	0.151	0.008	0.054	3

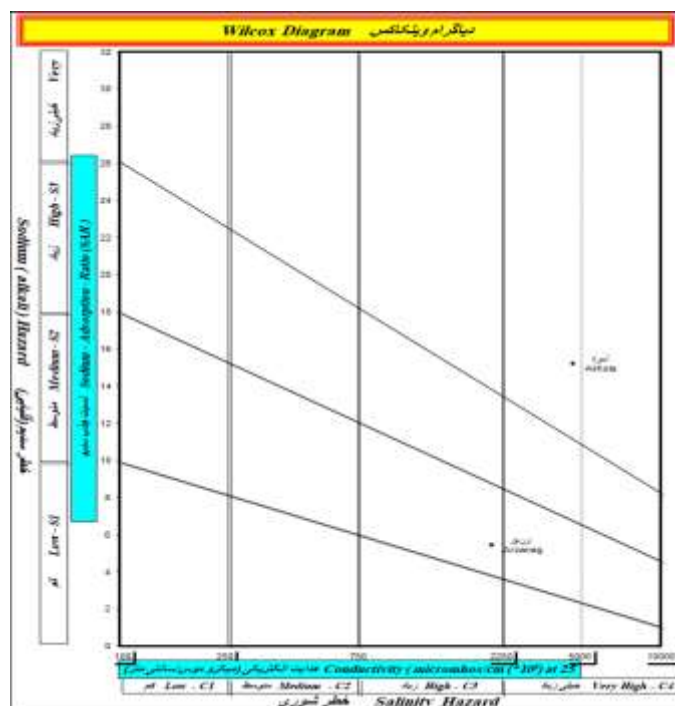
ارزیابی کیفیت آب جهت مصارف شرب با استفاده از دیاگرام شولر

نتایج کیفیت آب با استفاده از دیاگرام شولر نشان داد که ایستگاه ارزنق کمترین میزان TDS، با مقدار ۱۵۲۴/۵۴ میلی گرم در لیتر را دارد و در محدوده متوسط قرار دارد، ایستگاه آخولا با مقدار TDS، ۳۰۷۹/۳۲ و

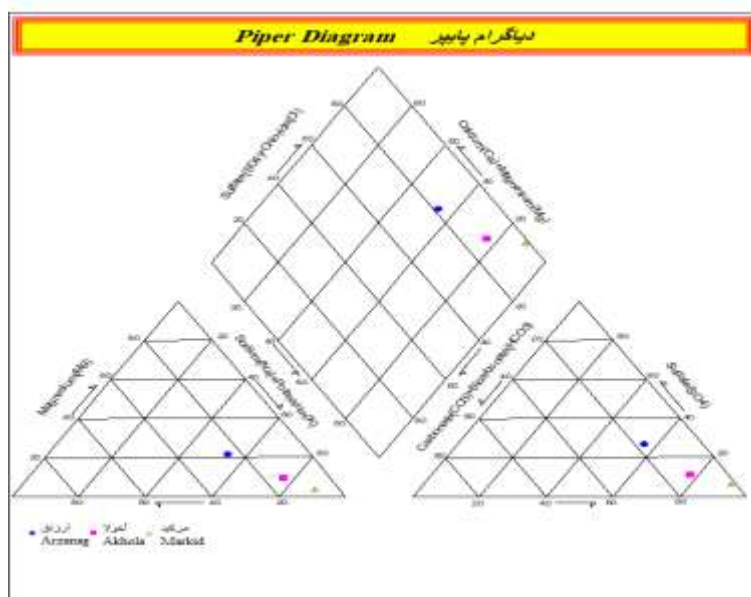


شکل ۲- دیاگرام شولر برای ایستگاه های ارزنق، آخولا و مرکید طی دوره آماری (۱۳۸۲-۱۴۰۰)

Figure 2- Schoeller diagram for Arzanag, Akhola and Markid stations during the statistical period (2003-2021)



شکل ۳- دیاگرام ویلکاکس برای ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید طی دوره آماری ۱۴۰۰-۱۳۸۲
Figure 3- Wilcox diagram for Arzanag, Akhola and Markid stations in the period 2003-2021



شکل ۴- دیاگرام پایپر برای ایستگاه‌های ارزنق، آخولا و مرکید در دوره آماری (۱۴۰۰-۱۳۸۲)
Figure 4- Piper diagram for Arzanag, Akhola and Markid stations in the period 2003-2021

نمودار پایپر رخساره آب در این منطقه، کلردار و سدیک می‌باشد. جدول ۷ تیپ و رخساره آب و همچنین غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از بررسی نمودار پایپر نمودار پایپر جهت مصارف صنعتی برای نمونه‌های آب مورد بررسی در حوضه رودخانه آجی‌چای بررسی و در شکل ۴ ارائه شد. براساس

جدول ۷- تیپ و رخساره آب در سه ایستگاه ارزنق، آخولا و مرکید در دوری آماری (۱۳۸۲-۱۴۰۰)

Table 7- Type and surface of water in three stations of Arzanag, Akhola and Markid in the period 2003-2021

محل نمونه برداری Sampling location	غلظت آنیون‌ها Concentration of anions	غلظت کاتیون‌ها Concentration of cations	تیپ آب Water type	رخساره آب Water facies	تیپ و رخساره Type and facies	نحوه توسعه تیپ و رخساره How to develop type and facies
ارزنق Arzanag	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره Chloride	سدیک Sodium	کلروره سدیک Sodium chloride	توسعه اساسی Basic development
آخولا Akhola	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره Chloride	سدیک Sodium	کلروره سدیک Sodium chloride	توسعه اساسی Basic development
مرکید Markid	Cl > SO ₄ > HCO ₃	Na+K > Ca > Mg	کلروره Chloride	سدیک Sodium	کلروره سدیک Sodium chloride	توسعه اساسی Basic development

نتیجه گیری

غیر قابل شرب تشخیص داده شد که در بین سه ایستگاه بدترین جایگاه را به خود اختصاص داد.

۴- براساس دیاگرام ویلکاکس معلوم شد که کیفیت آب مرکید از نظر کشاورزی بسیار نامناسب می باشد که حتی در خارج از مرزهای دیاگرام ویلکاکس قرار می گیرد و طبق نتایج روش تاپسیس رتبه ۱ را از نظر آلودگی به خود اختصاص داده است بنابراین کیفیت آب این ایستگاه نسبت به دو ایستگاه دیگر نامناسب تر است ضمن اینکه آب ایستگاه ارزنق از نظر آلودگی رتبه ۳ قرار داشت که از نظر کیفی دارای آب در کلاس C₄S₂ واقع شد. در نهایت آب ایستگاه آخولا در دیاگرام ویلکاکس در کلاس C₄S₄ قرار داشت که کیفیت بسیار نامناسب آب را نشان می دهد.

۵- براساس روش تاپسیس اولویت اول از نظر آلودگی آب متعلق به ایستگاه مرکید دو ایستگاه دیگر شامل آخولا و ارزنق در رتبه های ۲ و ۳ از نظر آلودگی قرار داشتند.

به طور کلی، براساس نمودار شولر و ویلکاکس و شاخص کیفیت آب می توان کیفیت آب حوضه مطالعاتی را نامناسب برای شرب و کشاورزی عنوان کرد. به طوری که ایستگاه مرکید نسبت به دو ایستگاه دیگر وضعیت نامناسب تری دارد و طبق روش تاپسیس هم این ایستگاه رتبه اول را به خود اختصاص داد. یافته های این مطالعه با در نظر گرفتن محدودیت های مطالعه مانند وجود داده های گم شده و بازسازی آن ها باید با احتیاط استفاده شود. بهتر است با افزایش دوره آماری این مطالعه هر ۵ سال یکبار تکرار و نتایج با یافته های همین مطالعه مقایسه شود. ضمناً نتایج با لحاظ کردن پارامترهای کیفی منتخب حاصل شده است و مسلم است که وجود دیگر پارامترها مانند نیترات، آرسنیک، بور، جیوه، فلزات سنگین نیز می تواند نتایج را تا حدودی تحت تأثیر قرار دهد که در این مطالعه به دلیل عدم دسترسی به آن ها استفاده نشد. بنابراین،

بررسی کمی و کیفی منابع آبی از ارکان مهم توسعه پایدار است. با توجه به وضعیت بحرانی منابع آبی کشور استفاده از روش هایی که در مدیریت و اتخاذ سیاست های مناسب در این امر کمک نماید ضروری است. هدف این تحقیق ارزیابی کیفیت آب در حوضه آبریز آجی چای واقع در استان آذربایجان شرقی می باشد. در این راستا، روش تاپسیس که یک روش ساده و کاربردی جهت اولویت بندی و ارزیابی کیفی آب است، استفاده شد. در این مطالعه سه ایستگاه ارزنق مرکید و آخولا واقع در شاخه های مختلف رودخانه آجی چای از نظر کیفیت آب بررسی گردید از داده های مربوط به TDS، EC، pH، HCO₃⁻، Cl⁻، SO₄²⁻، Ca²⁺، Mg²⁺، Na⁺، K⁺ و TH پارامترهای شیمیایی که از شرکت آب منطقه ای استان آذربایجان شرقی اخذ شد و براساس میانگین طولانی مدت پارامترهای کیفی استفاده شد. نتایج به طور خلاصه به شرح زیر بود:

۱- نتایج مقدماتی در صد خطای تعادل یونی (RE%) نشان داد که در تمام سال های دوره آماری (۱۳۸۲-۱۴۰۰) مقادیر RE تقریباً برابر صفر و اغلب آن ها مثبت بود که حاکی از بیشتر بودن مجموع کاتیون ها در مقابل مجموع آنیون ها می باشد.

۲- نتایج شاخص کیفیت آب شانون نشان داد که در بین ایستگاه ها، بیشترین مقدار شاخص مربوط به ایستگاه مرکید با مقدار ۹۴۵/۹۲ و کمترین آن مربوط به ایستگاه ارزنق با مقدار ۱۲۷/۳۶ می باشد.

۳- براساس دیاگرام شولر معلوم شد که کیفیت آب ایستگاه ارزنق از نظر شرب در حد متوسط می باشد که در مقایسه با دو ایستگاه دیگر از نظر کیفی در جایگاه مناسب قرار دارد، ضمن اینکه آب ایستگاه آخولا از این نظر در محدوده کیفیت نامناسب قرار داشته است، اما آب مرکید

شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از همکاری شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان شرقی در راستای تهیه داده‌های مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی بعمل می‌آید. ضمناً از داوران محترم که با ارائه نکات ارزنده موجب ارتقاء کیفیت این مقاله گردیده‌اند سپاسگزاری می‌نماید.

نتایج بدست آمده از این مطالعه تأکید داشت روش تاپسیس، روشی کارآمد به منظور تحلیل و رتبه‌بندی ایستگاه‌ها از نظر آلودگی کیفی آب سطحی بوده است، همچنین مطالعات مظاهری کوهستانی و همکاران (Mazaheri Kohanestani et al., 2013)، قربانی و همکاران (Ghorbani Mooselu et al., 2020)، ساین و همکاران (Singh et al., 2022) و دز (Das, 2023a & Das, 2023b) نیز اهمیت و کارایی روش تاپسیس را در شناسایی ایستگاه‌های آلوده تأیید کردند. پیشنهاد می‌شود سایر ایستگاه‌های این حوضه نیز در ادامه همین مطالعه بررسی

References

- Alavi, N., Zaree, E., Hassani, M., Babaei, A.A., Goudarzi, G., Yari, A.R., & Mohammadi, M.J. (2016). Water quality assessment and zoning analysis of Dez eastern aquifer by Schuler and Wilcox diagrams and GIS. *Desalination and Water Treatment*, 57(50), 23686-23697. <http://doi.org/10.1080/19443994.2015.1137786>
- Amiri, V., Rezaei, M., & Sohrabi, N. (2014). Groundwater quality assessment using entropy weighted water quality index (EWQI) in Lenjanat, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 72, 3479-3490. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3255-0>
- Aouiti, S., Hamzaoui Azaza, F., El Melki, F., Hamdi, M., Celico, F., & Zammouri, M. (2021). Groundwater quality assessment for different uses using various water quality indices in semi-arid region of central Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 46669-46691.
- Asadi, E., & Bayat, F. (2019). Evaluation of the quality of groundwater resources in Zanjan plain using EWQI and TOPSIS methods. *Environmental Sciences*, 17(1), 41-56. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.29252/envs.17.1.41>
- Awasthi, A., Rishi, M.S., Khosla, A., & Panigotra, S. (2023). Geographic information system-based groundwater quality assessment for drinking and irrigation purposes in transboundary aquifers of River Ravi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 34536-34552.
- Azish, S., Asareh, A., & Khodadadi Dehkordi, D. (2019). Effect of drought on the water quality and quantity of Dez river. *Iran-Water Resources Research*, 15(2), 306-318. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.2.23.2>
- Behzadian, M., Otaghsara, S.K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Bhushan, M., Praveen, K., Kumar, K., & Roy, L.B. (2023). Assessment of groundwater quality for irrigation purpose in Badua-Chandan sub-basin in Bihar-a case study. *Annals of Forest Research*, 66(1), 1871-1882.
- Das, A. (2023 a). Identification of Surface Water Contamination Zones and its Sources on Mahanadi River, Odisha Using Entropy-Based WQI and MCDM Techniques. *Engineering Research Transcripts*, 4, 67-92. https://doi.org/10.55084/grinrey/ERT/978-81-964105-1-3_5
- Das, A. (2023 b). Anthropogenic Effects on Surface Water Quality Assessment in Baitarani River Basin, Odisha Using GIS and MCDM Techniques. *Engineering Research Transcripts*, 5, 37-64. https://doi.org/10.55084/grinrey/ERT/978-81-964105-3-7_4
- Derdour, A., Mahamat Ali, M. M., & Chabane Sari, S. M. (2020). Evaluation of the quality of groundwater for its appropriateness for drinking purposes in the watershed of Naâma, SW of Algeria, by using water quality index (WQI). *SN Applied Sciences*, 2(12), 1951.
- Fallah M, Pirali Zefrehei A, Hedayati S. Evaluation of water quality of the Anzali international wetland using TOPSIS method. *ijhe* 2018; 11 (2) :225-236 (In Persian).
- Fatima, S. U., Khan, M. A., Siddiqui, F., Mahmood, N., Salman, N., Alamgir, A., & Shaukat, S. S. (2022). Geospatial assessment of water quality using principal components analysis (PCA) and water quality index (WQI) in Basho Valley, Gilgit Baltistan (Northern Areas of Pakistan). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 151. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-09845-5>
- Galik, A., Bąk, M., Bałandynowicz-Panfil, K., & Cirella, G. T. (2022). Evaluating labour market flexibility using the TOPSIS method: Sustainable Industrial Relations. *Sustainability*, 14(1), 526. <https://doi.org/10.3390/su14010526>
- Ghorbani Mooselu, M., Liltved, H., Nikoo, M.R., Hindar, A., & Meland, S. (2020). Assessing optimal water quality monitoring network in road construction using integrated information-theoretic techniques. *Journal of Hydrology*, 589, 125366. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125366>
- Goudarzi, M.R., Abedi, M.J., Niknam, A.R.R., & Heydaripour, M. (2022). Groundwater quality status based on a modification of water quality index in an arid area, Iran. *Water Supply*, 22(7), 6245-6261.

<https://doi.org/10.3390/w15101876>

17. Hwang, C.L., & Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey*, 58-191.
18. Isazadeh, M., Fakheri Fard, A., & darbandi, S. (2023). Study of the development of greenhouse estates and its impact on groundwater levels of Ajichay Basin aquifers using SWAT model. *Hydrogeology*, 7(2), 15-29. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/HYDRO.2023.13880>
19. Jafari, N. (2019). *Investigating the stability of Gamasiab basin using sustainability indicators with a multi-criteria decision-making approach*. Master's thesis. Water group. Agriculture and Natural Resources Campus. Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University. (In Persian with English abstract)
20. Khan, M., Almazah, M.M., Ellahi, A., Niaz, R., Al-Rezami, A. Y., & Zaman, B. (2023). Spatial interpolation of water quality index based on Ordinary kriging and Universal kriging. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 14(1), 2190853. <https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2190853>
21. Li, P., Wu, J., & Qian, H. (2012). Groundwater quality assessment based on rough sets attribute reduction and TOPSIS method in a semi-arid area, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(8), 4841-4854. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2306-1>
22. Manu, E., De Lucia, M., & Kühn, M. (2023). Hydrochemical characterization of surface water and groundwater in the crystalline basement aquifer system in the Pra Basin (Ghana). *Water*, 15(7), 1325. <https://doi.org/10.3390/w15071325>
23. Mazaheri Kohanestani, Z., Ghorbani, R., & Fazel, A. (2013). Evaluation of water quality using TOPSIS method in the Zaringol Stream (Golestan Province, Iran). *International Journal of Aquatic Biology*, 1(5), 202-208. <https://doi.org/10.22034/ijab.v1i5.148>
24. Meshram, S. G., Alvandi, E., Meshram, C., Kahya, E., & Fadhil Al-Quraishi, A. M. (2020). Application of SAW and TOPSIS in prioritizing watersheds. *Water Resources Management*, 34, 715-732. [10.1007/s11269-019-02470-x](https://doi.org/10.1007/s11269-019-02470-x)
25. Mirbolooki, H., Razdar, B., & Mohafezatkar, M. (2021). Investigation of Gilan index dams' water quality using multivariate methods. *Journal of environmental Research and Technology*, 5(8), 25-35 (In Persian with English Abstract). <https://doi.org/10.29252/5.8.25>
26. Ortega, R.G., Vázquez, M.L., Figueiredo, J.A.S., & Guijarro-Rodriguez, A. (2018). Sinos river basin social-environmental prospective assessment of water quality management using fuzzy cognitive maps and neutrosophic AHP-TOPSIS. *Neutrosophic Sets and Systems*, 23, 160-171.
27. Rouhani, H., Zaki, E., Kashani, M., & Fathabadil, A. (2015). Evaluation of stability of surface water quality variation in Gorganrood river basin. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 2(2), 129-140. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ije.2015.56143>
28. Sanikhani, H., Dinpashoh, Y., Pour Yusef, S., Zamanzad Ghavidel, S., & Solati, B. (2014). The impacts of climate change on runoff in watersheds (Case study: Ajichay watershed in East Azerbaijan Province, Iran). *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 27(6), 1225-1234. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.21513>
29. Sarikhani, R., Ghassemi Dehnavi, A., Ahmadnejad, Z., & Kalantari, N. (2015). Hydrochemical characteristics and groundwater quality assessment in Bushehr Province, SW Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74, 6265-6281. <http://doi.org/10.1007/s12665-015-4651-9>
30. Shannon, C. (1988). A mathematical theory of communication, *Bell System Technology Journal*, 27, 379-423.
31. Singh, K.R., Dutta, R., Kalamdhad, A.S., & Kumar, B. (2022). Study of physicochemical parameters and wetland water quality assessment by using Shannon's entropy. *Applied Water Science*, 12(11), 247. <http://doi.org/10.1007/s13201-022-01759-4>
32. Sippi, S., & Parmar, D. (2022). Water-quality-based ranking and benchmarking of rivers in india using a multicriteria decision-making technique. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(2), 05021008.
33. Sohrabizadeh, Z., Sharifi Moghadam, E., & Hakimzadeh, M. A. (2018). Trend changes analysis of the water quality in the Talar river watershed using the Man-Kendall (MK) test. *Natural Ecosystems of Iran*, 9(3), 1-20. (In Persian with English abstract).
34. Srdjevic, B., Medeiros, Y.D.P., & Faria, A.S. (2004). An objective multi-criteria evaluation of water management scenarios. *Water Resources Management*, 18, 35-54.
35. Ukah, B.U., Ameh, P.D., Egbueri, J.C., Unigwe, C.O., & Ubido, O.E. (2020). Impact of effluent-derived heavy metals on the groundwater quality in Ajao industrial area, Nigeria: an assessment using entropy water quality index (EWQI). *International Journal of Energy and Water Resources*, 4(3), 231-244. <http://doi.org/10.1007/s42108-020-00058-5>
36. WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality-4th ed.* Geneva World Health Organization. p 564.
37. Zamani Ahmad Mahmoudi, R., Fathi, A., Bayati, S., & Akbari, Z. (2023). Water quality assessment of rivers in Behesht Abad watershed using different methods (emphasis on irrigation). *Journal of Environment and Transsectoral Development*, 7(75), 29-39. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jewe.2018.105969.1200>
38. Zarei, H., Fathi, M.R., Karimi Zarchi, M., & Azizollahi, S. (2011). The application of fuzzy TOPSIS approach to

- personnel selection for Padir company: Iran, *Journal of Management Research*, 2, 3. <https://dpo.org/10.5296/jmr.v3i2.663>
39. Zhang, Q., Xu, P., & Qian, H. (2020). Groundwater quality assessment using improved water quality index (WQI) and human health risk (HHR) evaluation in a semi-arid region of northwest China. *Exposure and Health*, 12, 487-500. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-020-00345-w>



The Impact of Agricultural Waste and Residue Composts on Two Consecutive Spinach Cultivations: 1- Response of Soil Fertility Indicators, Plant Nutrient Uptake, and Yield

Kh. Salarinik¹, M. Nael^{2*} 

1 and 2- Ph.D. Student of Soil Science and Assistant Professor Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: m.nael@basu.ac.ir)

Received: 05-08-2023
Revised: 16-12-2023
Accepted: 24-12-2023
Available Online: 24-12-2023

How to cite this article:

Salarinik, Kh., & Nael, M. (2024). The impact of agricultural waste and residue composts on two consecutive spinach cultivations: 1- response of soil fertility indicators, plant nutrient uptake, and yield. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 871-890. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83762.1318>

Introduction

Large amounts of agricultural waste such as straw, leaves and pulps, with high nutritional value are produced every year. Grape pomace (GP) is rich in macro- and micro-nutrients and can be used as a soil amendment. However, due to its slow decomposition rate and the spread of diseases and pests, it should not be applied directly to the soil. Therefore, GP is composted in combination with other wastes. There is not enough information about the composting of GP and the effect of the produced composts on soil fertility in Iran. Hence, the aims of this study were twofold: to explore the impact of various GP composts on both soil fertility and spinach yield, relative to two levels of urea fertilizer, through a pot experiment conducted over two consecutive cultivation seasons; to categorize soil treatments based on fertilization regimes and timing (season), thus elucidating any patterns or trends in the observed effects.

Materials and Methods

To investigate the effects of GP composts on soil fertility and spinach (Persius hybrid) yield, an outdoor pot experiment was conducted as a randomized complete block design with eight compost treatments, two levels of urea fertilizer (46%), and a control treatment (C0), in three replications and two continuous cropping seasons (spring and fall). Compost treatments included: high grape pomace (HG) (60-63%) with chickpea straw and alfalfa (HG-Ch-A), high GP with chickpea straw and sugar beet pulp (HG-Ch-B), high GP with alfalfa and sugar beet pulp (HG-A-B), high GP combined with chickpea straw, alfalfa, and sugar beet pulp (HG-All); four other compost treatments included low level of grape pomace (LG) (37-42%) combined with other residues/wastes similar to the first four treatments (LG-Ch-A, LG-Ch-B, LG-A-B, and LG-All). Urea treatments included: 150 kg per hectare (C150) (two-step top dressing) and 500 kg per hectare (C500) (three-step top dressing). A sandy loam soil was used for this experiment. The composts were separately mixed into the soil at a rate of 2% (by weight). The first crop was grown for 50 days in May 2018 and the second crop was grown for 45 days in September 2018. In both seasons, the fresh and oven-dried weigh of spinach shoot and root were determined. Also, total concentration of K, Na, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Cu, and NO_3^- were measured in spinach to determine the amount of soil elements taken up by the crop. In both seasons, soil pH and EC, and contents of soil organic carbon (OC), active carbon (AC), total nitrogen (TN), NO_3^- , NH_4^+ , and exchangeable K, Ca, Mg, and Na, as well as available forms of P, Fe, Cu, and Zn were determined. One-way



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83762.1318>

ANOVAs were applied separately to spring and fall data, and mean comparisons were made using Duncan's test at 0.05% level. To determine the similarities and dissimilarities of the different treatments based on their effect on soil characteristics, cluster analysis was performed on all soil characteristics that showed significant differences between treatments.

Results and Discussion

In both cultivation periods, TN levels exhibited no significant variance across treatments. Notably, the highest potassium (K) levels were consistently observed in the HG-All and LG-All treatments, while the lowest K levels were consistently recorded in the C0, C150, and C500 treatments. In the initial cultivation period, no notable differences were observed between the C0, C150, and C500 treatments, except for potassium (K) and ammonium (NH_4^+), with significantly higher levels detected in the C0 treatment. Conversely, during the second cultivation period, significant disparities were observed among the C0, C150, and C500 treatments solely in terms of nitrate (NO_3^-) content, with notably higher nitrate levels detected in the C150 and C500 treatments. Through cluster analysis, all treatments from both cultivation periods were categorized into five distinct groups. Specifically, the C0, C150, and C500 treatments for each season were consistently grouped together, respectively, into groups one and two. All compost treatments of each season, except the HG-All treatment in the spring cultivation, were grouped into one class. In the second cultivation, the HG-Ch-A showed significantly higher EC than all treatments, except the HG-Ch-B. The LG-A-B treatment showed the highest amount of OC and C/N (in both cultivations), and NH_4^+ and Cu (in the second cultivation). The HG-Ch-A and HG-Ch-B treatments increased TN, P, K, Mg, OC, and AC in the second cultivation compared to the first. The amounts of all macronutrients and micronutrients, except Fe and Ca, increased in the compost treatments compared to the control and chemical treatments. In addition, an increase in EC was observed in the compost treatments compared to the control and chemical treatments, and an increase in pH compared to the C500 treatment. In the first cultivation, the LG-Ch-A and C500 treatments had significantly higher yields than the control. In the second cultivation, the LG-All, HG-All, HG-Ch-A, and LG-A-B treatments were the best compost treatments, while the LG-Ch-B and HG-Ch-B treatments were the weakest treatments in terms of soil fertility and plant yield. In both seasons, the absorption of elements by spinach depended on multiple factors, including the element type, its available content in the soil, its initial content in the composts (or fertilizer), soil pH, and yield.

Conclusion

The application of GP composts over two consecutive growing seasons increased the levels of nitrogen, phosphorus, potassium, magnesium, zinc, copper, active carbon and organic carbon in the soils. These results are very important as magnesium, copper and zinc are rarely applied by farmers. In contrast, depletion of all elements, except organic carbon, occurred in the control and chemical fertilizer treatments due to plant uptake of elements. The combination of chickpea straw with sugar beet pulp is not recommended for the production of GP compost, especially at low GP levels, due to its minimal effect on soil fertility and plant yield. Despite the positive effect of the GP composts in increasing soil fertility, the continuous application of large amounts of these composts is not recommended in the arid regions due to the increase in soil EC and pH. The difference between the compost treatments after two applications of GP composts was less than after one application; these results were confirmed by cluster analysis, in the sense that all compost treatments in the second season were placed in one cluster.

Keywords: Grape pomace, Organic carbon, Soil nitrate, Sugar beet pulp

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۸۹۰-۸۷۱

تأثیر کمپوست برخی پسماندها و بقایای کشاورزی در دو کشت متوالی اسفناج: ۱- پاسخ شناسه‌های حاصلخیزی خاک، جذب عناصر غذایی و عملکرد گیاه

خدیدجه سالاری نیک^۱ - محسن نائل^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۳

چکیده

استفاده از کمپوست پسماندهای کشاورزی در نظام‌های کشت یک مدیریت بالقوه پایدار در جهت بهبود کیفیت و حاصلخیزی خاک و افزایش عملکرد و سلامتی محصول است. در این پژوهش، تأثیر هشت کمپوست تولید شده از تفاله انگور (G) (در دو سطح کم (LG) (۳۷ تا ۴۲ درصد) و زیاد (HG) (۶۰ تا ۶۳ درصد)) در ترکیب با یونجه (A)، تفاله چغندر (B) و کاه نخود (Ch)، در مقایسه با دو سطح کود اوره (C150 و C500) و یک تیمار شاهد (C0)، بر حاصلخیزی خاک و عملکرد گیاه اسفناج در دو کشت متوالی (بهار و پاییز) مطالعه شد. عملکرد اسفناج در هر دو فصل کشت، اختلاف معناداری بین تیمارهای کمپوست و کود شیمیایی نشان نداد، بجز تیمار LG-Ch-A که در فصل بهار عملکرد بیشتری از تیمار C150 داشت. با این حال در کشت اول، تیمارهای LG-Ch-A و C500، و در کشت دوم، تیمارهای HG-All (متشکل از تمام مواد اولیه)، LG-All و LG-A-B به‌طور معناداری عملکرد بیشتری نسبت به تیمار شاهد داشتند. به دلیل جذب عناصر توسط گیاه، افزایش pH، افزایش مقدار کربن آلی خاک و هم‌چنین آبشویی در پی بارندگی شدید در کشت دوم، غلظت عناصر کم‌مصرف خاک در همه تیمارها نسبت به فصل اول کشت کاهش یافت. تیمارهای HG-Ch-A و HG-Ch-B سبب افزایش مقادیر N، P، K، Mg، کربن آلی و کربن فعال در فصل دوم کشت نسبت به فصل اول کشت شدند؛ در مقابل، کاهش مقدار نیتروژن کل در دو تیمار LG-Ch-A و LG-A-B نسبت به فصل اول کشت مشاهده شد. تیمار LG-All بهترین تیمار از نظر افزایش غلظت N، P و K، و کاهش غلظت نیترات خاک در بین همه تیمارها بود. تیمار HG-Ch-A با وجود افزایش هدایت الکتریکی خاک، به دلیل مقدار سدیم کم و حاصلخیزی بالا بعد از تیمار LG-All قرار گرفت. مقادیر تمام عناصر پرمصرف و کم‌مصرف، بجز Ca و Fe، در تیمارهای کمپوست نسبت به تیمارهای شاهد و شیمیایی افزایش نشان داد. به علاوه، در تیمارهای کمپوست افزایش EC (۹ تا ۲۱ درصد) نسبت به تیمارهای شاهد و شیمیایی، و افزایش pH (۰/۲ تا ۳ درصد) نسبت به تیمار C500 مشاهده شد. در مقابل، تخلیه تمام عناصر، بجز کربن آلی، در تیمارهای کود شیمیایی و شاهد به دلیل جذب توسط گیاه اتفاق افتاد. تیمار C500 سبب افزایش غلظت نیترات خاک شد. برطبق تحلیل خوشه‌بندی، تیمارهای شاهد و شیمیایی کشت اول در گروه یک، تیمارهای شاهد و شیمیایی کشت دوم در گروه دو، تیمارهای کمپوست کشت دوم در گروه سه، تیمارهای کمپوست کشت اول، بجز تیمار HG-All، در گروه چهارم و تیمار HG-All کشت اول در گروه پنجم قرار گرفتند. به طور کلی با وجود تأثیر مثبت کمپوست‌های به کار رفته در افزایش حاصلخیزی خاک، استفاده پیوسته این ترکیبات آلی به مقدار زیاد، به دلیل افزایش EC و pH در خاک‌های مناطق خشک دارای محدودیت است.

واژه‌های کلیدی: تفاله انگور، تفاله چغندر، کربن آلی، نیترات خاک

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: m.nael@basu.ac.ir)

مقدمه

کشاورزی آلی^۱ زیر مجموعه‌ای از کشاورزی پایدار است که استفاده از کودهای شیمیایی، آفت‌کش‌ها و تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه را ممنوع می‌کند. اصول کشاورزی آلی حفظ حاصلخیزی خاک با مدیریت مواد مغذی بیولوژیک، بازیافت پسماندهای کشاورزی، تهیه کمپوست و ورمی‌کمپوست، حذف یا کاهش نهاده‌های خارجی و کنترل طبیعی آفات و علف‌های هرز است (Hansen et al., 2006). پسماندهای کشاورزی شامل مواد باقی‌مانده بعد از برداشت محصولات کشاورزی و همچنین مواد باقی‌مانده بعد از فرآوری نظیر کاه، برگ، و تفاله‌ها می‌باشد (Ajila et al., 2012). مقدار زیادی از پسماندهای جامد و مایع توسط کارخانه‌های فرآوری مواد غذایی تولید می‌شوند که دارای ارزش بالایی هستند (Mirabella et al., 2014). کاربرد پسماندهای کشاورزی به صورت کمپوست شده سبب کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از رها سازی آن‌ها در طبیعت نظیر آلودگی هوا، آب و خاک می‌شود (Ugwuoke et al., 2018). به علاوه، استفاده از کمپوست پسماندهای کشاورزی به منظور کاهش اثرات منفی کودهای شیمیایی و همچنین حفظ و بهبود کیفیت شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک حائز اهمیت است.

تفاله انگور پسماند جامد اصلی بعد از آب‌گیری انگور است که غنی از عناصر غذایی نظیر N، P، K، C و همچنین عناصر کم‌مصرف است. این پسماند حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد از وزن انگور را شامل می‌شود (Eleonora et al., 2014) که با توجه به مقدار بالای تولید سالانه انگور در همدان (۴۱۶۶۶۹ تن) (Agriculture Jihad Organization of Hamedan Province, 2022)، تفاله انگور به مقدار زیاد توسط کارخانه‌های فراوری انگور و همچنین باغداران بعد از آب‌گیری انگور تولید می‌شود. بخشی از تفاله انگور برای تولید سرکه، تولید الکل و خوراک دام استفاده می‌شود و بخش اعظم آن در طبیعت رها می‌شود. با توجه به ارزش غذایی بالای تفاله انگور، این پسماند می‌تواند به عنوان اصلاح‌کننده آلی خاک بکار رود. با این حال، به دلیل سرعت تجزیه کم و همچنین خطر گسترش آلودگی، این پسماند نباید به طور مستقیم به خاک اضافه شود (Nerantzis & Tataridis, 2006)، بلکه باید به صورت کمپوست شده استفاده شود. از طرف دیگر، به دلیل pH اسیدی تفاله انگور (۳/۷ تا ۴/۵)، این پسماند باید در ترکیب با دیگر بقایا و کودهای دامی کمپوست شود (Eleonora et al., 2014). از جمله دیگر پسماندها، تفاله چغندر و ملاس می‌باشد که به ترتیب پسماند جامد و مایع حاصل از تولید شکر هستند که ارزش غذایی بالایی دارند و به مقدار زیاد توسط کارخانه‌های قند تولید می‌شوند. افزون بر این، امروزه

به دلیل کشت زیاد نخود در همدان، مقدار زیادی کاه نخود تولید می‌شود. بنابراین، تفاله انگور را می‌توان همراه با کاه نخود، تفاله چغندر، و یا دیگر بقایا کمپوست نمود. کمپوست‌ها اثرات مثبتی در افزایش حاصلخیزی خاک دارند. با این حال، بسته به ماهیت و نوع مواد اولیه به کار رفته در تهیه کمپوست‌ها، این ترکیبات آلی می‌توانند دارای pH و شوری بالا و غلظت بالایی از فلزات سنگین باشند که در این صورت می‌توانند محدودیت استفاده داشته باشند.

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه اثر کمپوست‌ها بر روی ویژگی‌های خاک انجام شده است. با این حال اثرات کمپوست‌های حاصل از تفاله انگور بر روی ویژگی‌های خاک چندان مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. النورا و همکاران (Eleonora et al., 2014) نسبت‌های مختلف کودمرغی و تفاله انگور را در تهیه کمپوست به کار بردند و اثرات کمپوست حاصله بر کیفیت خاک و رشد و سلامت کاهو را مورد بررسی قرار دادند. مارتینز و همکاران (Martínez et al., 2018) با کاربرد کمپوست حاصل از تفاله انگور و کود بز در تاکستان مشاهده کردند که مقدار عناصر غذایی، ماده آلی و فعالیت آنزیمی خاک نسبت به تیمار شاهد و تیمار کود شیمیایی افزایش پیدا کرد. فینچرا روبلز و همکاران (Fincheira-Robles et al., 2016) بیان کردند که کمپوست تفاله انگور سبب بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک تاکستان‌ها شد.

امروزه تأثیر کاربرد پسماندهای آلی و کمپوست‌ها در حفظ حاصلخیزی و افزایش کیفیت خاک و زیست‌فراهمی عناصر غذایی برای جذب توسط گیاهان همچنان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. با این حال اطلاعات کافی درباره‌ی تأثیر میان مدت کمپوست‌های حاصل از تفاله انگور بر کیفیت خاک، به ویژه در ایران وجود ندارد. با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون مطالعه‌ای درباره تهیه کمپوست از تفاله انگور و همچنین بررسی تأثیر کمپوست حاصل از تفاله انگور بر خاک در ایران انجام نشده است. بنابراین هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی مدیریت کودی مرسوم در کشت اسفناج در منطقه (کاربرد کود شیمیایی اوره) و مقایسه‌ی آن با یک مدیریت حاصلخیزی پایدارتر (کاربرد کمپوست پسماندها و بقایای کشاورزی) می‌باشد. اهداف ویژه این تحقیق عبارتند از: ۱) بررسی تأثیر کمپوست‌های مختلف تفاله انگور بر حاصلخیزی خاک و عملکرد گیاه اسفناج و مقایسه آن با دو سطح کود شیمیایی اوره (میزان توصیه شده براساس نیاز کودی گیاه اسفناج و میزان به کار رفته توسط کشاورزان)، به عنوان تنها کود شیمیایی مورد استفاده توسط کشاورزان منطقه، در دو فصل کشت متوالیو ۲) گروه‌بندی تیمارهای خاک بر اساس تأثیر رژیم‌های کوددهی و مدت زمان (فصل کشت). کمپوست‌های تفاله انگور استفاده شده در این مطالعه قبلاً با ترکیب دو

سطح (کم و زیاد) تفاله انگور به عنوان جزء اصلی و دیگر پسماندهای کشاورزی (تفاله چغندر قند، کاه نخود و بقایای یونجه) در حضور ملاس چغندر تهیه شدند.

مواد و روش‌ها

تیمارها: به منظور بررسی اثر کمپوست تفاله انگور بر حاصلخیزی خاک، یک آزمایش گلدانی خارج گلخانه‌ای در سال ۱۳۹۸ در دانشگاه بوعلی سینا، طراحی و انجام شد. این آزمایش در چارچوب طرح بلوک های کامل تصادفی با ۸ تیمار کمپوست، دو سطح تیمار کود شیمیایی اوره و یک تیمار شاهد (C0) در سه تکرار و در دو نوبت (فصل بهار و فصل پاییز) انجام شد. تیمارهای کمپوست شامل: (۱) سطح بالای تفاله انگور (۶۰ تا ۶۳ درصد) همراه با کاه نخود و یونجه (HG-Ch-A؛ ۲) سطح بالای تفاله انگور همراه با کاه نخود و تفاله چغندر (HG-Ch-B)؛ (۳) سطح بالای تفاله انگور همراه با یونجه و تفاله چغندر (HG-A-B)؛ (۴) سطح بالای تفاله انگور همراه با کاه نخود، یونجه و تفاله چغندر (HG-All)، و چهار تیمار دیگر کمپوست شامل سطح پایین تفاله انگور (۳۷ تا ۴۲ درصد) در ترکیب با سایر پسماندها/بقایا مشابه چهار تیمار

اول بود (LG-All و LG-A-B، LG-Ch-B، LG-Ch-A). روش تهیه کمپوست‌ها به این ترتیب بود: توده‌های کمپوست در ابعاد ۱ متر طول، ۱ متر عرض و ۰/۸ متر ارتفاع با نسبت‌های مختلف از مواد اولیه تهیه شد (جدول ۱). مقدار مشابهی از ملاس رقیق شده (با نسبت ۱ به ۲۰ ملاس به آب) نیز برای کوتاه کردن فرآیند کمپوست به هر تیمار اضافه شد. مواد اولیه در هر توده کمپوست کاملاً مخلوط شده و با یک ورقه پلاستیکی پوشانده شد. مرحله تهیه کمپوست به مدت ۱۸۲ روز از مهر ۱۳۹۷ تا اردیبهشت ۱۳۹۸ در دانشگاه بوعلی سینا انجام شد. دمای توده‌های کمپوست به صورت دوره‌ای در مرکز توده‌ها، سه بار در هفته، در طول دوره کمپوست اندازه‌گیری شد. میزان رطوبت هر توده کمپوست به صورت هفتگی در مرکز آن بررسی شد و با افزودن آب مقدار رطوبت در حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد تنظیم شد. توده‌های کمپوست هر دو هفته یکبار با یک چنگال باغبانی همزده می‌شدند تا هوادهی مناسب فراهم شود، دما زیر ۷۰ درجه سانتی‌گراد حفظ شود و از همگنی بهتر توده کمپوست اطمینان حاصل شود. پس از پایان فرآیند کمپوست، مواد کمپوست در هر توده مخلوط شده و از الک ۲۰ میلی‌متری عبور داده شد. سه نمونه از هر تیمار برای تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی جمع آوری شد.

جدول ۱- نسبت مواد اولیه‌ی مورد استفاده در تهیه کمپوست‌های مختلف (بر حسب وزن تر) و ویژگی‌های مواد اولیه

Table 1- The ratio of raw materials in compost piles (based on the fresh weight) and characteristics of raw materials

مواد اولیه Feedstock	تفاله انگور Grape pomace	کود گاوی Cow manure	کود گوسفندی Sheep manure	کاه گندم Wheat straw	کاه نخود Chickpea straw	یونجه Alfalfa	تفاله چغندر Sugar beet pulp	ملاس Molasses
تیمار Treatment	(%)							
HG-Ch-A	63	7	7	11	4	4	-	4
HG-Ch-B	60	7	7	11	4	-	7	4
HG-A-B	60	7	7	11	-	4	7	4
HG-All	62	7	7	11	2	2	5	4
LG-Ch-A	42	8	8	12	13	13	-	4
LG-Ch-B	37	7	7	11	11	-	23	4
LG-A-B	37	7	7	11	-	11	23	4
LG-All	38	8	8	11	8	8	15	4
ویژگی‌ها Characteristics								
نیترژن N (%)	1.89	1.80	1.64	0.32	1.02	3.27	1.40	1.24
کربن آلی OC (%)	42.7	35.3	28.8	37.7	34.0	39.1	35.8	27.4
نسبت کربن به نیترژن C/N	22.6	19.6	17.6	117	3.3	12.0	25.6	22.1
پH	4.2	9.1	8.6	6	4.8	5.7	5.1	7.4
هدایت الکتریکی EC (ms cm ⁻¹)	3.3	7.8	7.9	2.1	4.5	4.9	1.3	9.0

HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ C: کود گاوی؛ Sh: کود گوسفندی؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ A: یونجه؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه

HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; C: Cow manure; Sh: Sheep manure; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; A: Alfalfa; All: Composed of the all raw materials.

جدول ۲- ویژگی‌های اولیه خاک و کمپوست‌های نهایی
Table 2- Characteristics of the initial soil and final composts

شناسه‌ها Indicators	خاک اولیه Initial soil	کمپوست‌ها Composts							
		HG-Ch-A	LG-Ch-A	HG-Ch-B	LG-Ch-B	HG-A-B	LG-A-B	HG-All	LG-All
pH	8.26	8.4 ^b	8.1 ^d	8.6 ^a	8.4 ^b	8.0 ^{de}	8.3 ^c	8.1 ^d	8.0 ^e
نسبت کربن به نیتروژن C/N	9.17	12.7 ^{bcd}	12.6 ^{bcd}	14.2 ^{ab}	15.4 ^a	13.3 ^{abc}	11.3 ^{cd}	12.4 ^{bcd}	10.7 ^d
نسبت آمونیوم به نیترات NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻	0.71	0.0054 ^{cd}	0.0029 ^d	0.0135 ^b	0.0110 ^{bc}	0.1072 ^a	0.0094 ^{bc}	0.0732 ^a	0.0090 ^{bc}
نسبت جذب سدیم SAR	ND*	6.3 ^a	6.5 ^a	6.1 ^a	7.1 ^a	6.4 ^a	7.5 ^a	7.2 ^a	5.5 ^a
هدایت الکتریکی EC (μs cm ⁻¹)	250	833 ^b	1460 ^a	546 ^d	776 ^b	800 ^b	837 ^b	642 ^c	786 ^b
فسفر P (mg kg ⁻¹)	13.5	3627 ^a	3473 ^{ab}	3113 ^{bc}	3033 ^c	3083 ^c	2833 ^c	2713 ^d	2573 ^d
پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	265.3	12567 ^a	12567 ^a	11767 ^a	10900 ^a	10677 ^a	12500 ^a	12367 ^a	11000 ^a
سدیم Na (mg kg ⁻¹)	155.6	2600 ^{ab}	2090 ^{bc}	2430 ^{abc}	2700 ^a	2053 ^c	2460 ^{abc}	2427 ^{abc}	2020 ^c
کلسیم Ca (mg kg ⁻¹)	1282.6	2296 ^{ab}	2797 ^{ab}	1587 ^c	1280 ^c	2463 ^{ab}	2088 ^b	2714 ^{ab}	3090 ^a
منیزیم Mg (mg kg ⁻¹)	12.2	2609 ^a	760 ^b	2761 ^a	2533 ^a	963 ^b	1343 ^b	963 ^b	1241 ^b
آهن Fe (mg kg ⁻¹)	4.5	8104 ^{cde}	7687 ^{de}	10689 ^a	8886 ^{bcd}	7555 ^e	9565 ^{ab}	9322 ^{bc}	9839 ^{ab}
روی Zn (mg kg ⁻¹)	0.39	112 ^a	103 ^{ab}	115 ^a	108 ^{ab}	97 ^b	106 ^{ab}	104 ^{ab}	105 ^{ab}
مس Cu (mg kg ⁻¹)	0.59	34.8 ^a	32.1 ^a	35.5 ^a	34.3 ^a	35.1 ^a	33.5 ^a	34.3 ^a	33.2 ^a
آمونیم NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	26.4	2.8 ^c	3.7 ^{bc}	3.4 ^{bc}	5.0 ^{bc}	38.7 ^a	4.5 ^{bc}	35.1 ^a	6.9 ^b
نیترات NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	36.3	524 ^c	1291 ^a	255 ^e	483 ^{cd}	362 ^{de}	491 ^{cd}	478 ^{cd}	787 ^b
کربن آلی OC (%)	0.64	15.6 ^{ab}	19.1 ^a	19.5 ^a	15.0 ^{ab}	16.0 ^{ab}	12.5 ^{bc}	14.2 ^{bc}	10.0 ^c
نیتروژن کل TN (%)	0.07	1.2 ^{abc}	1.5 ^a	1.4 ^{ab}	1.0 ^c	1.2 ^{abc}	1.1 ^{bc}	1.1 ^{bc}	0.9 ^c

HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه. در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت

اختلاف معناداری دارند (p<0.05).

*: اندازه‌گیری نشده است.

HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: All three raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different (p<0.05).

*: Not determined.

و آمونیوم و نیتريت کمتر از ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد (Van der Wurff et al., 2016). با این حال، زمانی که مجموع غلظت آمونیوم و نیتريت کمپوست بالاتر از ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، نسبت آمونیوم به نیتريت در مقایسه با مقدار مطلق نیتريت و آمونیوم، شاخص مناسب-تری برای ارزیابی بلوغ کمپوست خواهد بود. نسبت آمونیوم به نیتريت در کمپوست بسیار بالغ به صفر تمایل دارد (CQCC- California; Compost Quality Council, 2001 Van der Wurff et al., 2016).

برای ارزیابی کیفیت کمپوست‌های بالغ، تمامی داده‌های به‌دست آمده از آنالیز نمونه‌های کمپوست با چندین استاندارد پایه‌گذاری شده برای کمپوست مقایسه شد. شناسه‌های کیفیت و بلوغ کمپوست و استانداردهای استفاده شده برای ارزیابی آن‌ها در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است. مقدار آمونیوم، نیتريت و نسبت آمونیوم به نیتريت از جمله شناسه‌های تعیین بلوغ کمپوست می‌باشد. کمپوست زمانی بالغ در نظر گرفته می‌شود که میزان نیتريت بالاتر از ۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد

جدول ۳- شناسه‌های اندازه‌گیری شده در کمپوست و حدود استاندارد برای شاخص‌های بلوغ و کیفیت کمپوست
Table 3- Parameters determined in final composts and different standard threshold levels of maturity and quality indicators for compost

شناسه‌ها Parameters	روش‌های اندازه‌گیری Measurement methods	مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران Institute of Standards and Industrial Research of Iran (ISIRI)		سازمان بهداشت جهانی The World Health Organization (WHO)	طرح تضمین کیفیت اروپا European Quality Assurance Scheme (ECN-QAS)	شورای وزیران محیط زیست کانادا Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)		شورای کیفیت کمپوست کالیفرنیا California Compost Quality Council (CCQC)	
		A	B			A	B	خیلی رسیده Very Mature	رسیده Mature
خاکستر Ash (%)	(Yeomans & Bremner, 1988)	50	50						
ماده آلی OM (%)		>35	>25	10-30	>15	>30	>15	>30	
کربن آلی OC (%)	CHNS analyzer	>25	>15						
پی‌اچ pH (1:10 compost to water ratio)	(Papadimitriou <i>et al.</i> , 1997)	6-8	6-8	6-9	4-9				
هدایت الکتریکی EC (ds m ⁻¹) (1:5 compost to water ratio)	(Sánchez-Monedero <i>et al.</i> , 2001)	<8	<14		≤1.9				
نسبت جذب سدیم SAR		<10	<10						
پتاسیم K (mg kg ⁻¹)	(Zheljazkov & Warman, 2002) flame photometry	5000-18000	5000-18000	1000-28000					
سدیم Na (mg kg ⁻¹)					≤250 mg/L				
کلسیم Ca (mg kg ⁻¹)	(Zheljazkov & Warman, 2002) (Cheng & Bray, 1951)								
منیزیم Mg (mg kg ⁻¹)	(Zheljazkov & Warman, 2002) (Motsara & Roy, 2008)	10000-38000	3000-38000	2000-38000					
فسفر P (mg kg ⁻¹)									
آهن Fe (mg kg ⁻¹)	(Zheljazkov & Warman, 2002) atomic absorption spectrometer	<1300	<1300	800-1200	<600	<500	<1850	200	500
روی Zn (mg kg ⁻¹)		<650	<650	90-260	<300	<100	<750	70	150
مس Cu (mg kg ⁻¹)									
نیتروژن N (%)	CHNS analyzer	1.25-1.66	1-1.5	0.3-1.5					
آمونیم NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	(Riley & Sinhaseni, 1957)							<75	75-500
نیترات NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	(Cataldo <i>et al.</i> , 1975)								
نسبت آمونیوم به نیترات NH ₄ /NO ₃		0.5-3	0.5-3					<0.5	0.5-3
شاخص جوانه زنی GI (%)	(Van der Wurff <i>et al.</i> , 2016)	>70	>70	>90	>80	>90	>90	>90	80-90
نسبت کربن به نیتروژن C:N (mature)		15-20	10-15	≤25	≤25	≤25	≤25	<25	<25
رطوبت Moisture (mature) (%)		>15	>35	30-50	30-60	30-60	30-60		

نیتریک و هیدروژن پراکسید هضم شد (Huang & Schulte, 1985). غلظت روی، آهن و مس توسط دستگاه جذب اتمی (Varian Spectra AA 220 FS atomic absorption spectrophotometer) و مقادیر سدیم و پتاسیم به روش فلیم فوتومتر (PFP7 flame photometer) تعیین شد. مقدار فسفر به روش فسفومولیدات-وانادات توسط دستگاه اسپکتروفوتومتری تعیین شد (Estefan et al., 2013). برای اندازه گیری نیترات از روش سالیسیلیک اسید بهره‌گیری شد (Cataldo et al., 1975). غلظت کلسیم و منیزیم به روش تیتراسیون اندازه‌گیری شد (Cheng & Bray, 1951). سپس مقدار جذب هر عنصر توسط گیاه به وسیله فرمول زیر تعیین شد:

$$U_x = C_x \cdot Y / 100$$

در این رابطه، U_x مقدار جذب یک عنصر بر حسب گرم در گلدان، C_x مقدار عنصر در گیاه بر حسب درصد در واحد وزن تر و Y عملکرد وزن تر بر حسب گرم در گلدان می‌باشد.

نمونه‌برداری از خاک: بعد از هر نوبت نمونه‌برداری از گیاه در فصل بهار و پاییز، نمونه‌برداری از خاک انجام شد. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و هوا خشک شدند. بعد از کوبیدن نمونه‌ها و عبور از الک ۲ میلی‌متر، pH (Hendershot et al., 2007) و هدایت الکتریکی (Rhoades, 1996) در نسبت آب به خاک ۲:۱ تعیین شد. مجموع کاتیون‌های محلول و تبدلی با استات آمونیوم خنثی (Klute, 1966) عصاره‌گیری شد و مقدار K و Na به روش فلیم فوتومتر، و Ca و Mg به روش تیتراسیون (Cheng & Bray, 1951) اندازه‌گیری شد. کربن آلی به روش اکسایش تر (Walkley & Black, 1934)، کربن فعال با استفاده از محلول ۰/۰۲ مولار پرمنگنات پتاسیم (Weil et al., 2003)، نیتروژن کل خاک به روش کج‌دلال (Rutherford et al., 2008)، آمونیوم (Riley & Sinhaseni, 1957) و نیترات (Cataldo et al., 1975; Vendrell & Zupancic, 1990) به روش اسپکتروفوتومتری، و فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen et al., 1954) تعیین شد. روی، آهن و مس فراهم بعد از عصاره‌گیری با DTPA ۰/۰۰۵ مولار (Lindsay & Norvell, 1978) با دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد. تحلیل‌های آماری داده‌ها توسط نرم‌افزار SAS (SAS Institute Inc, 2013) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار به روش ANOVAs انجام شد. مقایسات میانگین به روش دانکن در سطح ۰/۰۵ درصد و برای هر نوبت کشت به طور جداگانه انجام شد. برای یافتن شباهت‌ها و تفاوت‌های تیمارهای مختلف براساس تأثیر آن‌ها بر کل ویژگی‌های خاک، تجزیه و تحلیل خوشه‌ای با استفاده از تمام متغیرهای خاکی که به لحاظ آماری دارای تفاوت معنادار بودند، انجام شد. برای جلوگیری از تأثیر مقیاس واحدهای اندازه‌گیری، تمام متغیرها استاندارد شد و با روش خوشه‌بندی دو مرحله‌ای و اندازه‌گیری فاصله‌ی اقلیدوسی، گروه‌بندی تیمارهای آزمایشی توسط

برنال و همکاران (Bernal et al., 1998) مقدار این نسبت را کمتر از ۰/۱۶ در کمپوست بالغ با مواد اولیه مختلف تعیین کرده‌اند. برای تیمارهای کود شیمیایی از کود اوره ۴۶ درصد به مقدار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار (C150) (اضافه شده در دو مرحله در طول دوره رشد گیاه) و ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار (C500) (اضافه شده در سه مرحله در طول دوره رشد گیاه) استفاده شد. لازم به ذکر است که اوره تنها کود شیمیایی است که توسط کشاورزان منطقه و به مقدار بسیار بالا در کشت اسفناج استفاده می‌شود. برای این آزمایش از یک خاک لومی شنی (مقدار رس ۶٪، سیلت ۱۸٪ و شن ۷۶٪) استفاده شد (جدول ۲).

کشت: در اردیبهشت ۱۳۹۸، قبل از کشت اسفناج (رقم هیبرید پرسپوس)، کمپوست‌های رسیده به مقدار ۲ درصد وزنی، به طور یکنواخت با خاک هر گلدان مخلوط شدند. وزن خاک و کمپوست در هر گلدان معادل ۷/۸ کیلوگرم بود. به دلیل وجود عوامل بیماری‌زا و آفات گوناگون در گلخانه و نیز گرم بودن گلخانه و نبود تهویه مناسب در زمان کشت اسفناج، و با توجه به اینکه گرمای زیاد برای رشد اسفناج محدودیت ایجاد می‌کند، کشت در خارج از گلخانه انجام شد. در هر گلدان ۱۵ بذر در عمق ۱ سانتی‌متری کشت شد. آبیاری با آب شهری به صورت روزانه (به دلیل گرمای هوا) برای حفظ رطوبت خاک در ۷۰ درصد ظرفیت زراعی انجام شد. بعد از جوانه‌زنی، ۵ بوته سالم در هر گلدان حفظ شد. پس از گذشت ۵۰ روز و اتمام فصل اول کشت (بهار)، برداشت کامل گیاه و سپس نمونه‌برداری از خاک انجام شد. مجدداً در شهریور ۱۳۹۸، به خاک قبلی هر گلدان مقادیر مشابه کمپوست و کود شیمیایی به ترتیبی که در بالا ذکر شد، اضافه شد و نوبت دوم کشت (پاییز) اجرا شد. در کشت پاییز به دلیل تعدیل دمای هوا، آبیاری یک روز در میان انجام شد. پس از گذشت ۴۵ روز از زمان کشت، به دلیل اطلاعیه صادر شده از طرف سازمان هواشناسی مبنی بر وقوع بارندگی شدید، کاهش محسوس دما و از بین رفتن محصولات کشاورزی به دلیل یخ‌زدگی، برداشت اسفناج قبل از بارندگی انجام شد. بارندگی به مدت چند روز ادامه داشت و بعد از آن دما به شدت کاهش یافت.

بعد از اتمام دوره رشد دوم، مجدداً از خاک و گیاه نمونه‌برداری شد. در کشت دوم به دلیل بارندگی زیاد، نمونه‌برداری خاک یک هفته بعد از نمونه‌برداری گیاه به تعویق افتاد و پس از بهبود شرایط آب و هوایی و کاهش رطوبت گلدان‌ها انجام شد.

نمونه‌برداری از گیاه: بعد از اتمام هر دوره رشد، نمونه‌برداری از اندام هوایی و ریشه گیاه در صبح زود انجام شد. نمونه‌ها درون پاکت کاغذی قرار گرفته و به منظور تعیین عملکرد و غلظت عناصر به آزمایشگاه منتقل شدند. برای تعیین وزن تر، نمونه‌ها سریع وزن شدند. سپس نمونه‌ها برای تعیین وزن خشک درون آون در دمای ۷۰ درجه به مدت ۴۸ ساعت خشک شدند. برای تعیین مقدار جذب عناصر غذایی توسط گیاه، ابتدا ۰/۵ گرم از نمونه‌های آون‌خشک گیاه توسط اسید

نرم افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی های خاک

کشت اول (فصل بهار): اختلاف آماری معناداری برای تمام شناسه ها، بجز نیتروژن کل، در بین تیمارها مشاهده شد. مقادیر کربن آلی، هدایت الکتریکی، پتاسیم فراهم و نسبت کربن به ازت در تیمارهای

کمپوست به طور معناداری بیشتر از تیمارهای کود شیمیایی و شاهد بود. نتیجه عکس برای مقدار آمونیوم مشاهده شد. بیشترین مقدار هدایت الکتریکی (۶۷۷/۳ میکروزیمنس بر سانتی متر)، نسبت کربن به ازت (۱۰/۸)، مس (۰/۷۴ میلی گرم بر کیلوگرم)، روی (۱/۰۱ میلی گرم بر کیلوگرم) و فسفر (۲۲/۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم)، و کمترین مقدار آهن فراهم (۴/۲۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار LG-All مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۴- تأثیر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی آورده بر ویژگی های خاک

Table 4- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on selected soil properties

تیمارها Treatments	pH	هدایت	کربن	نسبت	کربن	کربن فعال AC	نیترات NO ₃ ⁻	آمونیم NH ₄ ⁺	پتاسیم K	سدیم Na	کلسیم Ca	منیزیم Mg	مس Cu	روی Zn	آهن Fe	فسفر P
		الکتریکی EC	آلی OC	نیتروژن TN	به نیتروژن C:N											
		(μs cm ⁻¹)	(%)													
بهار Spring																
C0	8.21 ^{bc}	410.3 ^c	0.49 ^{bc}	0.07 ^a	6.5 ^{bc}	218.8 ^{cd}	70.0 ^a	43.8 ^a	247.4 ^d	159.7 ^b	1295.9 ^b	85.1 ^{abc}	0.73 ^a	0.62 ^c	4.95 ^b	13.24 ^{bc}
C150	8.23 ^{abc}	376.0 ^c	0.47 ^c	0.08 ^a	5.9 ^c	258.0 ^{bc}	98.7 ^a	30.7 ^b	200.0 ^e	161.1 ^b	1339.3 ^{ab}	83.1 ^{abc}	0.71 ^{abc}	0.61 ^c	4.45 ^b	15.10 ^{bc}
C500	8.19 ^{bc}	352.0 ^c	0.50 ^{bc}	0.07 ^a	7.7 ^{abc}	236.6 ^{cd}	83.8 ^{ab}	30.3 ^b	165.5 ^e	163.8 ^b	1336.0 ^{ab}	85.1 ^{abc}	0.72 ^{abc}	0.62 ^c	6.58 ^{ab}	11.24 ^c
HG-Ch-A	8.43 ^{abc}	505.7 ^{ab}	0.60 ^{ab}	0.08 ^a	8.1 ^{abc}	286.5 ^{bc}	120.2 ^a	16.6 ^{de}	288.4 ^{bcd}	233.8 ^a	1302.6 ^b	85.1 ^{abc}	0.65 ^c	0.78 ^{abc}	6.03 ^{ab}	17.01 ^b
HG-Ch-B	8.49 ^{ab}	422.3 ^{bc}	0.66 ^a	0.07 ^a	10.4 ^a	338.8 ^{ab}	105.9 ^a	16.8 ^{de}	265.3 ^d	219.5 ^{ab}	1362.7 ^{ab}	64.9 ^{abc}	0.67 ^{abc}	0.97 ^{ab}	4.96 ^b	14.64 ^{bc}
HG-A-B	8.35 ^{abc}	594.3 ^a	0.64 ^a	0.07 ^a	9.3 ^{ab}	242.2 ^{cd}	54.1 ^{bcd}	21.6 ^{bcd}	273.0 ^{cd}	168.0 ^b	1376.1 ^{ab}	40.5 ^c	0.66 ^{abc}	0.89 ^{ab}	5.39 ^{ab}	17.84 ^b
HG-All	8.33 ^{abc}	566.0 ^{ab}	0.69 ^a	0.07 ^a	10.1 ^a	291.8 ^{bc}	21.1 ^d	18.4 ^{de}	334.5 ^a	214.2 ^{ab}	1356.0 ^{ab}	105.4 ^a	0.73 ^a	0.82 ^{abc}	7.99 ^a	15.88 ^{bc}
LG-Ch-A	8.32 ^{abc}	619.0 ^a	0.69 ^a	0.08 ^a	9.5 ^{ab}	171.1 ^d	79.5 ^{abc}	23.0 ^{bcd}	282.0 ^{cd}	200.0 ^{ab}	1356.0 ^{ab}	73.0 ^{abc}	0.70 ^{abc}	0.93 ^{ab}	4.95 ^b	15.23 ^{bc}
LG-Ch-B	8.54 ^a	550.0 ^{ab}	0.66 ^a	0.07 ^a	9.7 ^{ab}	372.3 ^a	110.3 ^a	10.9 ^e	257.6 ^d	203.6 ^{ab}	1416.2 ^a	52.7 ^{bc}	0.65 ^c	0.73 ^{bc}	5.25 ^{ab}	16.80 ^b
LG-A-B	8.39 ^{abc}	612.7 ^a	0.72 ^a	0.08 ^a	10.1 ^a	259.6 ^{bc}	41.9 ^{cd}	19.9 ^{cde}	310.1 ^{abc}	192.9 ^{ab}	1416.2 ^a	83.1 ^{abc}	0.72 ^{abc}	0.88 ^{ab}	5.38 ^{ab}	16.71 ^b
LG-All	8.13 ^c	677.3 ^a	0.70 ^a	0.07 ^a	10.8 ^a	269.0 ^{bc}	80.3 ^{abc}	20.6 ^{bcd}	329.3 ^{ab}	192.9 ^{ab}	1362.7 ^{ab}	97.3 ^{ab}	0.74 ^a	1.01 ^a	4.22 ^b	22.13 ^a
پاییز Fall																
C0	8.49 ^{ab}	160.3 ^{de}	0.60 ^{fg}	0.05 ^b	12.1 ^{bc}	228.4 ^c	36.7 ^{de}	14.4 ^{bc}	181.2 ^c	154.2 ^a	1128.9 ^{ab}	48.6 ^{bc}	0.53 ^d	0.51 ^{ef}	3.93 ^a	12.0 ^b
C150	8.49 ^{ab}	130.3 ^e	0.55 ^g	0.06 ^{ab}	9.5 ^c	254.9 ^c	81.0 ^{abc}	11.2 ^c	170.0 ^c	154.9 ^a	1148.9 ^{ab}	56.7 ^{bc}	0.58 ^{bcd}	0.55 ^{def}	4.44 ^a	8.1 ^b
C500	8.35 ^b	182.7 ^{cde}	0.66 ^{efg}	0.05 ^b	14.9 ^{abc}	195.6 ^c	104.8 ^a	13.9 ^c	158.8 ^c	154.9 ^a	1149.0 ^{ab}	48.6 ^{bc}	0.57 ^{bcd}	0.45 ^f	4.25 ^a	12.2 ^b
HG-Ch-A	8.44 ^{ab}	405.3 ^a	0.95 ^{ab}	0.08 ^a	12.4 ^{bc}	437.6 ^a	53.9 ^{cde}	19.1 ^{abc}	310.1 ^{ab}	154.9 ^a	1035.4 ^{bc}	109.4 ^a	0.58 ^{abc}	0.78 ^{abc}	3.91 ^a	21.3 ^a
HG-Ch-B	8.37 ^b	312.7 ^{ab}	0.79 ^{cde}	0.08 ^a	11.3 ^{bc}	375.4 ^a	37.8 ^{de}	19.1 ^{abc}	284.9 ^b	157.7 ^a	1045.4 ^{bc}	75.0 ^{ab}	0.54 ^{cd}	0.62 ^{cdef}	3.48 ^a	18.6 ^a
HG-A-B	8.39 ^{ab}	216.7 ^{cd}	0.81 ^{bcd}	0.07 ^{ab}	11.1 ^{bc}	340.4 ^b	81.9 ^{abc}	14.9 ^{bc}	286.3 ^b	152.1 ^a	1005.3 ^c	93.2 ^{ab}	0.58 ^{bcd}	0.72 ^{abc}	3.85 ^a	25.7 ^a
HG-All	8.49 ^{ab}	220.7 ^{cd}	0.92 ^{abc}	0.07 ^{ab}	14.0 ^{abc}	388.4 ^{ab}	45.6 ^{de}	23.3 ^{ab}	311.5 ^{ab}	154.9 ^a	1209.1 ^a	56.7 ^{bc}	0.59 ^{bcd}	0.63 ^{cde}	3.28 ^a	21.8 ^a
LG-Ch-A	8.52 ^{ab}	270.0 ^{bc}	0.90 ^{abc}	0.06 ^{ab}	15.8 ^{ab}	365.0 ^{ab}	95.6 ^{ab}	17.8 ^{abc}	289.1 ^{ab}	160.6 ^a	1115.6 ^{abc}	77.0 ^{ab}	0.56 ^{bcd}	0.87 ^a	3.85 ^a	22.8 ^a
LG-Ch-B	8.58 ^a	255.7 ^{bc}	0.70 ^{def}	0.07 ^{ab}	12.0 ^{bc}	368.9 ^{ab}	61.9 ^{cd}	16.5 ^{bc}	283.5 ^b	164.8 ^a	1195.7 ^a	22.3 ^c	0.63 ^{ab}	0.69 ^{bcd}	4.19 ^a	19.1 ^a
LG-A-B	8.44 ^{ab}	246.3 ^{bc}	1.04 ^a	0.05 ^b	19.5 ^a	365.0 ^{ab}	67.2 ^{bcd}	25.8 ^a	298.9 ^{ab}	157.7 ^a	1215.8 ^a	77.0 ^{ab}	0.69 ^a	0.83 ^{ab}	4.26 ^a	20.7 ^a
LG-All	8.49 ^{ab}	199.0 ^{cde}	0.92 ^{abc}	0.08 ^a	13.3 ^{bc}	348.2 ^b	25.6 ^e	18.5 ^{abc}	324.1 ^a	158.5 ^a	1235.8 ^a	64.9 ^{bc}	0.62 ^{abc}	0.78 ^{abc}	3.60 ^a	25.5 ^a

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار آورده ۴۶ درصد؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار آورده ۴۶ درصد؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله

چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین های با حروف متفاوت متفاوت معناداری دارند (p<0.05).

C0: Control; C150: 150 kg ha⁻¹ of urea 46%; C500: 500 kg ha⁻¹ of urea 46%; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: All three raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different (p<0.05).

چنین، تیمار HG-Ch-A مقدار کربن فعال بیشتری (۲۸۶/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) نسبت به تیمار LG-Ch-A (۱۷۱/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) داشت. بین دیگر تیمارهای کمپوست اختلاف معناداری بین دو سطح تفاله انگور مشاهده نشد.

بیشتر نتایج خاکی تیمارهای کمپوست، با ویژگی‌های شیمیایی کمپوست‌های متناظرشان قابل توجیه نبود (جدول ۲ با ۴ مقایسه شود). این می‌تواند تحت تأثیر نسبت کربن به ازت کمپوست (نرخ تجزیه کمپوست)، نقش pH کمپوست و pH خاک در قابلیت فراهمی یا تثبیت عناصر، غلظت عناصر دیگر، نرخ فعالیت بیولوژیکی خاک، مقدار جذب عناصر توسط گیاه و نقش کربن آلی و کربن فعال خاک در قابلیت فراهمی یا تثبیت عناصر باشد. به علاوه، لازم به ذکر است که در خاک های تیمار شده، غلظت فراهم عناصر اندازه گیری شد، حال آنکه در کمپوست‌های تولید شده، غلظت کل عناصر اندازه گیری شد.

مقادیر آمونیوم و پتاسیم در تیمار شاهد به طور معناداری بیشتر از تیمارهای شیمیایی بود. مقدار پتاسیم جذب شده توسط گیاه در تیمار شاهد حدود ۸۳ درصد کمتر از تیمار C500 بود (جدول ۶)؛ به عبارت دیگر، تخلیه ی کمتر پتاسیم خاک در تیمار شاهد رخ داده است.

اختلاف معناداری برای تمام شناسه ها بین دو تیمار شیمیایی C500 و C150 مشاهده نشد (جدول ۴). علت نبود تفاوت بین دو تیمار شیمیایی می‌تواند تحت تأثیر مقدار عناصر جذب شده توسط گیاه باشد. در تیمار C500 مقدار نیترا ت جذب شده توسط گیاه حدود ۴۹۶/۴ درصد بیشتر از تیمار C150 بود. همچنین با افزایش جذب نیترا ت، مقدار جذب عنصر پتاسیم نیز در تیمار C500 به طور معناداری (۹۲/۷ درصد) افزایش یافت (جدول ۶). بنابراین تخلیه بیشتر عناصر نیتروژن، پتاسیم و نیترا ت در تیمار C500 نسبت به تیمار C150 رخ داده است (جدول ۴).

کشت دوم (فصل پاییز)

اختلاف آماری معناداری برای تمام شناسه ها، بجز مقادیر سدیم و آهن، در بین تیمارها مشاهده شد. کمترین مقدار pH در تیمار C500 (۸/۳۵) مشاهده شد که تنها با تیمار LG-Ch-B (۸/۵۸) اختلاف معناداری نشان داد (جدول ۴). علت افزایش pH در تیمار LG-Ch-B را می‌تواند pH بالای کمپوست متناظر آن (جدول ۲) و همچنین افزایش pH خاک بعد از یکبار تیمار شدن (کشت اول) توجیه نماید (جدول ۴). مقدار هدایت الکتریکی در تیمار HG-Ch-A (۴۰۵/۳ میکروزیمنس بر سانتی متر) به طور معناداری بیشتر از همه ی تیمارها، بجز تیمار HG-Ch-B (۳۱۲/۷ میکروزیمنس بر سانتی متر)، بود و کمترین مقدار این ویژگی در تیمار C150 (۱۳۰/۳ میکروزیمنس بر سانتی متر) مشاهده شد.

مقدار کربن آلی، کربن فعال، پتاسیم، روی و فسفر در تیمارهای

به نظر می رسد به دلیل غلظت پایین نیتروژن در کمپوست LG-All (جدول ۲)، مقدار عملکرد گیاه کاهش (جدول ۵) و بنابراین کمترین مقدار جذب عناصر توسط گیاه در این تیمار (LG-All) رخ داده باشد (جدول ۶). این امر سبب شده است پتاسیم، فسفر، منیزیم، روی و مس کمتری از خاک خارج شود. از طرف دیگر، وجود همبستگی مثبت بین مقدار کربن آلی با مقدار پتاسیم (۰/۶۷۳)، فسفر (۰/۳۷۶) و روی فراهم (۰/۵۱۲) نشان دهنده نقش ماده آلی و کربن آلی در افزایش حاصلخیزی خاک می باشد.

بیشترین مقدار پتاسیم (۳۳۴/۵ میلی گرم بر کیلوگرم)، منیزیم (۱۰۵/۵ میلی گرم بر کیلوگرم) و آهن (۷۹۹/۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در تیمار HG-All مشاهده شد. کمپوست HG-All دارای مقدار بالای پتاسیم و آهن در مقایسه با دیگر کمپوست ها (جدول ۲) می باشد. از طرف دیگر کمترین جذب آهن، و کاهش قابل توجه جذب عناصر منیزیم و پتاسیم توسط گیاه در این تیمار رخ داده است (جدول ۶). این کاهش جذب می‌تواند تحت تأثیر مقدار کم نیتروژن و نیترا ت در کمپوست متناظرش و به دنبال آن کاهش عملکرد ایجاد شده در این تیمار باشد (جدول ۵).

تیمار LG-Ch-B بیشترین مقدار pH (۸/۵۴)، کربن فعال (۳۷۲/۳ میلی گرم بر کیلوگرم) و کلسیم (۱۴۱۶/۲ میلی گرم بر کیلوگرم)، و کمترین مقدار آمونیوم (۱۰/۹ میلی گرم بر کیلوگرم) و مس (۰/۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم) را در بین تیمارها داشت. در کمپوست LG-Ch-B، مقدار pH بالا و غلظت آمونیوم کم است (جدول ۲). از طرف دیگر، مس بیشتری توسط گیاه از خاک تیمار شده با کمپوست LG-Ch-B در مقایسه با غالب تیمارها، خارج شده است (جدول ۶).

مقدار نیترا ت در تیمارهای HG-Ch-A، HG-Ch-B و LG-Ch-B B بیشتر از دیگر تیمارها بود (به ترتیب ۱۲۰/۲، ۱۰۵/۹ و ۱۱۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم). این می‌تواند به دلیل مقدار نیتروژن بیشتر در کمپوست های HG-Ch-A و HG-Ch-B (جدول ۲) و همچنین جذب کمتر نیترا ت توسط گیاه در خاک های تیمار شده با تیمارهای HG-Ch-A و LG-Ch-B باشد (جدول ۶).

مقایسه دو سطح تفاله انگور نشان داد که تیمار LG-All، مقدار نیترا ت و فسفر بیشتر (به ترتیب ۸۰/۳ و ۲۲/۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم) و مقدار آهن فراهم (۴/۲۲ میلی گرم بر کیلوگرم) کمتری نسبت به تیمار HG-All (به ترتیب ۲۱/۱، ۱۵/۸۸ و ۷/۹۹ میلی گرم بر کیلوگرم) داشت. دلیل این تفاوت بین دو تیمار می‌تواند در مقدار نیترا ت بالای کمپوست LG-All (جدول ۲) و مقدار جذب بالای آهن (۳۰ درصد بیشتر از تیمار HG-All) و مقدار جذب کم فسفر (۱۹۶ درصد کمتر از تیمار HG-All) توسط گیاه از خاک تیمار شده با کمپوست LG-All باشد (جدول ۶). به علاوه، وجود همبستگی مثبت معنادار بین کربن آلی و فسفر فراهم (۰/۳۷۶) بیانگر نقش مواد آلی در افزایش مقدار فسفر فراهم است. هم

کربن به ازت در کمپوست‌های متناظرشان (جدول ۲) بود. پایین بودن نسبت کربن به ازت باعث افزایش نرخ تجزیه و به دنبال آن، افزایش فراهمی عناصر می‌شود.

مقایسه دو سطح تفاله انگور نشان داد که تیمار LG-Ch-B به‌طور معناداری مقدار pH، کلسیم و مس بیشتر، و منیزیم کمتری نسبت به تیمار HG-Ch-B داشت. این مشاهده می‌تواند تحت تأثیر اثرات باقی مانده‌ی کشت اول (جدول ۴)، و همچنین مقدار این جذب این عناصر توسط گیاه (جدول ۶) باشد. همچنین، تیمار LG-A-B به‌طور معناداری مقادیر بیشتری از کربن آلی، نیترات، کلسیم، مس و نسبت کربن به ازت نسبت به تیمار HG-A-B داشت. تفاوت بین این دو تیمار می‌تواند به دلیل مقدار بالای نیترات در کمپوست LG-A-B (جدول ۲)، و مقدار بالای کربن آلی، کلسیم، مس و نسبت کربن به ازت در خاک تیمار شده با کمپوست LG-A-B بعد از کشت اول (اثرات باقی مانده‌ی کشت اول) باشد (جدول ۴). همچنین، مقدار هدایت الکتریکی در تیمار HG-Ch-A به‌طور معناداری بیشتر از تیمار LG-Ch-B بود.

در فصل دوم نیز بیشتر نتایج خاکی تیمارهای کمپوست، با ویژگی های شیمیایی کمپوست‌های متناظرشان قابل توجیه نبود (دو جدول ۲ و ۴ مقایسه شود). همانطور که قبلاً هم بیان شد، تأثیر کمپوست بر غلظت فراهم عناصر خاک تنها تحت تأثیر غلظت این عناصر در کمپوست نمی‌باشد، چرا که عوامل مختلفی نظیر نسبت کربن به ازت کمپوست (مؤثر بر نرخ تجزیه کمپوست)، pH کمپوست و خاک (مؤثر بر قابلیت فراهمی یا تثبیت عناصر)، غلظت عناصر دیگر، نرخ فعالیت بیولوژیکی خاک، مقدار آبشویی، مقدار کربن آلی و مقدار جذب عناصر توسط گیاه نیز بر غلظت فراهم عناصر در خاک تأثیر می‌گذارند.

بین تیمارهای C500، C150 و شاهد هیچ تفاوت معناداری، بجز در مقدار نیترات، مشاهده نشد (جدول ۴). در تیمار C500 به دلیل کاربرد بالای کود اوره و مقدار جذب کمتر نیترات توسط گیاه اسفناج نسبت به تیمار C150 (۷/۳ درصد کمتر)، مقدار نیترات خاک در این تیمار به‌طور معناداری نسبت به تیمار C150 افزایش یافت.

جمع‌بندی نتایج خاکی در دو فصل کشت

در هر دو فصل کشت، مقدار pH و EC در اغلب تیمارهای کمپوست بیشتر از تیمارهای کود شیمیایی و شاهد بود، هر چند این تفاوت‌ها در برخی موارد معنادار نبود (جدول ۴). این نتیجه همسو با یافته‌های روبیو و همکاران (Rubio et al., 2013) در بررسی اثر کمپوست تفاله انگور بر خاک است. به‌طور کلی، رابطه‌ی مستقیمی بین pH و EC خاک با pH و EC کمپوست و کودهای دامی وجود دارد (Aytenew et al., 2020). به‌طوری‌که استفاده طولانی مدت از این اصلاح‌کننده‌ها، بسته به نوع بقایا و pH اولیه آن‌ها، سبب افزایش pH (Butler & Miur, 2006) یا کاهش pH (Bastida et al., 2008)

کمپوست به‌طور معناداری بیشتر از تیمارهای شیمیایی و شاهد بود. از آن‌جاکه کمپوست‌ها منابع غنی از عناصر هستند، بنابراین کاربرد پیوسته‌ی این ترکیبات آلی می‌تواند سبب افزایش عناصر غذایی خاک در مقایسه با کود اوره شود. در بین تیمارهای کمپوست، مقدار کربن آلی در تیمار LG-A-B (۱/۰۴ درصد) اختلاف معناداری با تیمارهای HG-Ch-B، LG-Ch-B و HG-A-B (به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۹ و ۰/۷۰ درصد) نشان داد. مقدار کربن فعال در تیمار HG-Ch-A (۴۳۷/۶ میلی گرم بر کیلوگرم) اختلاف معنادار با تیمارهای LG-A-B و HG-A-B (به ترتیب ۳۴۰/۴ و ۳۴۸/۲ میلی گرم بر کیلوگرم) نشان داد. روندهای بیان شده برای کربن کل و کربن فعال تحت کنترل اثرات باقی مانده کشت اول می‌باشد.

کمترین مقدار نیترات در تیمار LG-All (۲۵/۶ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد، که اختلاف معناداری با تمام تیمارها، بجز تیمارهای شاهد، HG-Ch-A، HG-Ch-B و HG-All، نشان داد. به نظر می‌رسد با وجود مقدار بالای نیترات در کمپوست LG-All (جدول ۲)، به دلیل مقدار جذب بالای نیترات توسط گیاه از خاک‌های تیمار شده با کمپوست‌های LG-All و HG-All، مقدار نیترات خاک کاهش یافته است (جدول ۶). مقدار آمونیوم در تیمار LG-A-B (۲۵/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) به‌طور معناداری بیشتر از تیمارهای شاهد، شیمیایی، HG-A-B و LG-Ch-B بود.

بیشترین مقدار پتاسیم در تیمار LG-All (۳۲۴/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد که اختلاف معناداری با تمام تیمارها، بجز تیمارهای HG-Ch-A، LG-Ch-A، HG-All و LG-A-B داشت. این مشاهده می‌تواند به دلیل مقدار بالای پتاسیم در کمپوست‌های متناظر تیمارهای مذکور (جدول ۲) و همچنین مقدار بالای پتاسیم خاک بعد از کشت اول (اثرات باقی مانده) در سه تیمار LG-All، HG-All و LG-A-B باشد (جدول ۴).

تیمار HG-Ch-A بیشترین مقدار منیزیم (۱۰۹/۴ میلی گرم بر کیلوگرم) را در بین تیمارها داشت که اختلاف معناداری با تیمارهای شاهد، شیمیایی، HG-All، LG-All و LG-Ch-B نشان داد. این روند همسو با مقدار منیزیم در کمپوست‌های متناظرشان می‌باشد (جدول ۲). بیشترین مقدار مس در تیمار LG-A-B مشاهده شد، که اختلاف معناداری با تمام تیمارها، بجز LG-All و LG-Ch-B نشان داد. به نظر می‌رسد مقدار بالای مس در دو تیمار LG-A-B و LG-All ناشی از اثرات باقی مانده‌ی کشت اول (جدول ۴)، و در تیمار LG-Ch-B به دلیل جذب کمتر توسط گیاه باشد (جدول ۶). مقدار مس خاک در تیمارهای شیمیایی، HG-Ch-A، HG-Ch-B و HG-All به دلیل مقدار جذب بیشتر توسط گیاه کاهش یافت (جدول ۶). تیمار LG-Ch-A بیشترین مقدار روی (۰/۷۷ میلی گرم بر کیلوگرم) را داشت که اختلاف معناداری با تمام تیمارها، بجز تیمارهای HG-Ch-A، HG-A-B و LG-A-B و LG-All، نشان داد (جدول ۴). این نتیجه همسو با مقدار کم نسبت

LG-Ch-A) ۱/۵٪ و ۱۲۹۱ میلی گرم بر کیلوگرم) و نیتروژن کل در کمپوست HG-A-B (۱/۲٪) سبب افزایش مقدار نیترات در خاک شد. همچنین، مقدار بالای آمونیوم در کمپوست HG-All (۳۵/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) سبب افزایش آمونیوم خاک شد.

در تیمارهای کمپوست، مقدار کربن آلی نسبت به تیمار C0 در فصل اول کشت بین ۲۲ تا ۴۷ درصد و در فصل دوم کشت بین ۱۷ تا ۷۳ درصد افزایش پیدا کرد. بیشترین افزایش کربن آلی در هر دو فصل کشت مربوط به تیمار LG-A-B بود. مقدار کربن آلی در تیمار C150 نسبت به شاهد در هر دو فصل بین ۴ تا ۹ درصد کاهش و در تیمار C500 بین ۲ تا ۱۰ درصد افزایش یافت. مک کانل و همکاران (McConnell et al., 1993) گزارش دادند که کاربرد مقادیر متفاوت کمپوست از ۱۸ تا ۱۴۶ تن در هکتار، سبب افزایش ۶ تا ۱۶۳ درصدی در محتوای مواد آلی خاک شد. مقادیر فسفر (۱۴ تا ۴۴٪)، کربن فعال (۱- تا ۱۶۵٪)، کربن آلی (۶ تا ۴۵٪)، pH (۰/۱ تا ۴/۴٪) و نسبت کربن به ازت (۱۰ تا ۹۳٪) در تیمارهای کمپوست در فصل دوم کشت، نسبت به فصل اول کشت افزایش یافت. محققان یکی از روش‌های افزایش ماده آلی و حاصلخیزی خاک را استفاده از کمپوست می‌دانند (Machado et al., 2020). از طرف دیگر، مقدار جذب فسفر توسط گیاه در فصل اول کشت در همه تیمارهای کمپوست، به جز تیمار LG-All، به مقدار ۴۴ تا ۳۷۰ درصد بیشتر از فصل دوم کشت بود، که این نیز بر کاهش مقدار فسفر خاک در فصل اول کشت تأثیر گذاشته است. یک روند کاهشی در مقادیر تمام شناسه‌ها، بجز مقادیر کربن آلی (۲۳ تا ۳۴٪ افزایش)، pH (۲ تا ۴٪ افزایش) و نسبت کربن به ازت (۶۳ تا ۹۵٪ افزایش)، در تیمارهای کود شیمیایی و شاهد در فصل دوم کشت نسبت به فصل اول کشت مشاهده شد. این تخلیه عناصر غذایی خاک در تیمارهای کود شیمیایی و شاهد به دلیل جذب توسط گیاه، آبشویی توسط بارندگی و عدم ورود پیوسته عناصر به خاک می‌باشد.

در پایان فصل دوم کشت، مقدار نیتروژن (۲۰ تا ۶۰ درصد)، منیزیم (۱۷ تا ۱۱۶ درصد)، مس (۲ تا ۳۰ درصد)، روی (۲۲ تا ۷۱ درصد)، آمونیوم (۴ تا ۷۴ درصد)، نیترات (۳ تا ۱۶۱ درصد) و هدایت الکتریکی (۲۴ تا ۱۵۳ درصد) در همه تیمارهای کمپوست نسبت به تیمار شاهد افزایش یافت؛ تنها استثناء، کاهش محتوای نیترات در تیمار LG-All، و منیزیم در تیمار LG-Ch-B بود. با این وجود، افزایش این شناسه‌ها در بیشتر تیمارهای کمپوست فاقد تفاوت معنادار با تیمار شاهد بود. مقدار جذب بالای نیترات توسط گیاه از خاک تیمار شده با کمپوست LG-All نسبت به تیمار شاهد (۲۲۷ درصد بیشتر از شاهد) می‌تواند علت کاهش محتوای نیترات در تیمار LG-All نسبت به تیمار شاهد باشد (جدول ۶). به علاوه، اثرات باقی مانده‌ی کشت اول می‌تواند دلیل کاهش منیزیم در تیمار LG-Ch-B نسبت به تیمار شاهد باشد. در مقابل، در پایان فصل دوم کشت، افزایش معنادار در مقدار فسفر (۵۵ تا ۱۱۴ درصد)، پتاسیم (۵۷ تا ۷۹ درصد)، کربن آلی (۱۷ تا ۷۳ درصد) و کربن

خاک‌ها شده است. این افزایش (یا کاهش) بسته به pH اولیه خاک می‌تواند دارای اهمیت باشد. بنابراین با توجه به مقدار pH و هدایت الکتریکی نسبتاً بالای کمپوست‌های به کار رفته (جدول ۲)، و همچنین تأثیر این کمپوست‌ها در افزایش pH و هدایت الکتریکی خاک (جدول ۴)، باید در استفاده پیوسته و مقدار زیاد این کمپوست‌ها در خاک‌های مناطق خشک و با pH بالا احتیاط نمود.

مقادیر هدایت الکتریکی (۵۴/۷ تا ۲۳۸/۸٪)، کلسیم (۱۰/۳ تا ۳۷/۸٪)، سدیم (۴/۷ تا ۵۱/۲٪)، روی (۲/۵ تا ۵۸/۶٪)، مس (۲/۷ تا ۳۹/۰٪) و آهن (۲/۳ تا ۱۴۴/۵٪) در همه تیمارها در کشت دوم نسبت به فصل اول کشت کاهش یافت. این کاهش می‌تواند به دلیل آبشویی نمک‌ها و عناصر در پی بارندگی در کشت دوم، جذب عناصر توسط گیاه، افزایش pH، فسفر و کربن آلی خاک به ویژه در تیمارهای کمپوست باشد. در فصل دوم کشت افزایش مقدار کربن آلی و کربن فعال در خاک رخ داد. افزایش مقدار مواد آلی خاک با توجه به ماهیت ترکیب آلی اثر متفاوتی بر مقدار فراهمی عناصر غذایی کم مصرف خاک دارد. زمانی که ترکیبات آلی با وزن مولکولی کم، نظیر فولویک اسید، با عناصر کم مصرف کلات تشکیل دهند، سبب افزایش فراهمی این عناصر می‌شوند (Stevenson, 2018). از آنجاکه در کمپوست بخش های فعال کربن در طول فرایند کمپوست از بین می‌روند، بنابراین کمپوست یک ترکیب آلی غنی از هیومیک اسید با وزن مولکولی بالا می‌باشد (Gurmu, 2019). هیومیک اسید می‌تواند با عناصر کم مصرف کلات تشکیل داده و سبب کاهش فراهمی این عناصر شود. از طرفی برخی از ترکیبات آلی می‌توانند با عناصر کم مصرف کمپلکس‌هایی تشکیل دهند که سبب افزایش جذب توسط گیاه و یا آبشویی این عناصر شود (Stevenson, 2018). از طرف دیگر در تیمارهای شیمیایی و شاهد، تنها تخلیه عناصر خاک به دلیل جذب عناصر توسط گیاه و عدم ورود عناصر به خاک توسط کود صورت گرفته است. روبیو و همکاران (Rubio et al., 2013) بیان کردند که مقدار هدایت الکتریکی خاک های تیمار شده با کمپوست تفاله انگور و شاهد در انتهای فصل کشت نسبت به ابتدای فصل کشت به دلیل آبشویی نمک‌ها طی بارندگی، جذب عناصر توسط گیاه و پایداری مواد آلی توسط تشکیل کمپلکس-های هومیک-رس و کلات‌ها کاهش یافت.

روند تغییرات نیترات (۲۴۳/۷- تا ۴۸/۸+ درصد)، آمونیوم (۲۰۶/۶- تا ۳۳/۴+ درصد) و منیزیم (۱۳۸/۹- تا ۵۶/۵+ درصد) در فصل دوم کشت بین تیمارهای کمپوست نسبت به تیمار متناظرشان در فصل اول کشت متفاوت بود. به طوری که در فصل دوم کشت در بیشتر تیمارها کاهش نیترات، آمونیوم و منیزیم رخ داده بود. علت افزایش این شناسه‌ها در برخی از تیمارها، می‌تواند به دلیل مقدار بالای منیزیم، ازت کل، نیترات و آمونیوم در کمپوست متناظرشان باشد (جدول ۲). مقدار بالای منیزیم در کمپوست‌های HG-Ch-A و HG-Ch-B سبب افزایش منیزیم در خاک شد. مقدار بالای نیتروژن کل و نیترات در کمپوست

بولاک و همکاران گزارش شد. غلظت عناصر روی، مس و آهن در فصل دوم کشت نسبت به فصل اول کشت در تمام تیمارها کاهش یافت. کاهش ۱۰ تا ۲۳/۵ درصدی مس و افزایش ۵۳ تا ۶۰ درصدی روی در تیمارهای کمپوست تفاله انگور با نسبت استفاده ۲ و ۴ درصد توسط کاراکا (Karaca, 2004) مشاهده شد. غلظت روی در هر دو فصل، و مس در فصل دوم در تیمارهای کمپوست بیشتر از تیمارهای شاهد و شیمیایی بود. این مشاهده با همبستگی مثبت بین مقدار روی با کربن آلی در هر دو فصل (به ترتیب ۰/۵۱۲ و ۰/۵۷۶ برای کشت اول و دوم) و مس با کربن آلی (۰/۳۹۷) در فصل دوم قابل توجیه است. ژائو و همکاران (Zhao et al., 2006) گزارش کردند که استفاده متوالی کمپوست به مدت شش سال به طور معناداری سبب غلظت‌های بالاتر مس و روی در خاک تیمارهای کمپوست نسبت به شاهد شده است.

خوشه‌بندی تیمارهای خاک

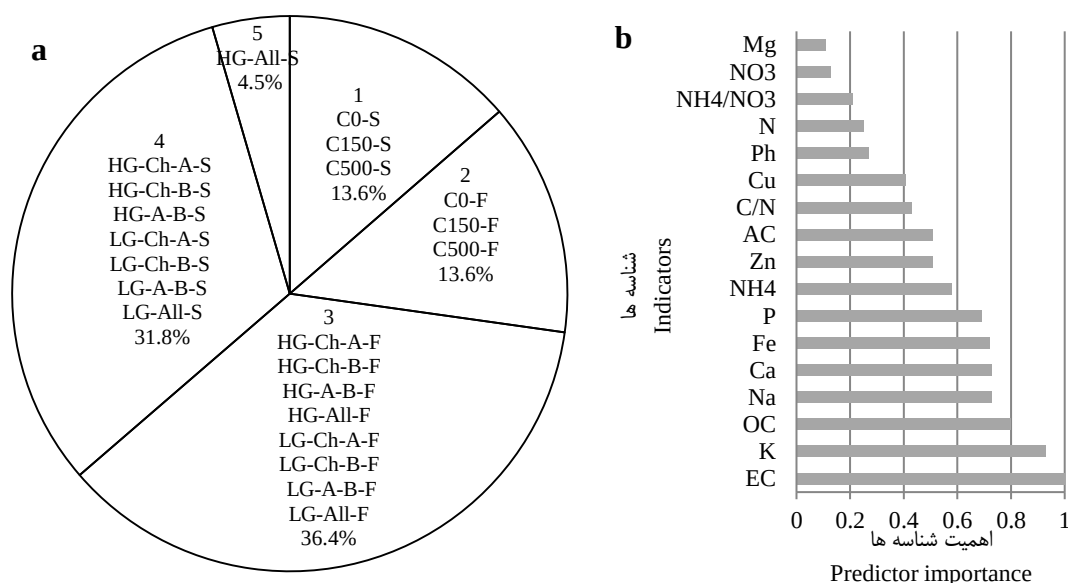
بر اساس تحلیل خوشه‌ای دو مرحله‌ای، تعداد پنج خوشه برای تیمارهای خاکی هر دو فصل کشت به دست آمد (شکل ۱ a). در این تحلیل، از تمام شناسه‌های اندازه‌گیری شده استفاده شد، زیرا این شناسه‌ها اختلاف معناداری بین تیمارها در یک یا هر دو فصل کشت نشان دادند. هدایت الکتریکی، پتاسیم، کربن آلی، سدیم، کلسیم، آهن، فسفر، آمونیوم، روی و کربن فعال، مهم‌ترین فاکتورها در خوشه‌بندی بودند (شکل ۱ b).

اولین خوشه، با کمترین مقدار کربن کل (۰/۴۹٪)، pH (۸/۲۱) و نسبت کربن به ازت (۶/۷)، و بالاترین مقدار ازت (۰/۰۷۳٪) و آمونیوم (۳۴/۹ میلی گرم بر کیلوگرم) از دیگر خوشه‌ها جدا شد و شامل تیمارهای شیمیایی و شاهد کشت اول (C500-S، C150-S، C0-S) بود. خوشه دوم (C500-F، C150-F، C0-F) دارای کمترین مقادیر هدایت الکتریکی، پتاسیم، سدیم، فسفر، آمونیوم، روی، کربن فعال، مس، ازت، منیزیم و نسبت آمونیوم به نیترات در بین تمام خوشه‌ها بود.

فعال (۴۹ تا ۹۲ درصد) در همه‌ی تیمارهای کمپوست نسبت به تیمار شاهد رخ داد. این امر می‌تواند تحت تأثیر ورود این عناصر توسط کمپوست به خاک باشد.

استفاده منظم کمپوست یا کود، باعث افزایش ذخایر P (Mohamed et al., 2007)، C و N خاک، از طریق محافظت فیزیکی این مواد مغذی در درون خاک‌دانه‌های بزرگ می‌شود (Sodhi et al., 2009). دیاکونو و مونتورو (Diacono & Montemurro, 2011) اظهار داشتند که استفاده مکرر از مواد کمپوست‌شده محتوای نیتروژن آلی خاک را تا ۹۰ درصد افزایش می‌دهد و آن را برای معدنی شدن در فصول زراعی بعدی، اغلب بدون شستشوی نیترات به آب‌های زیرزمینی، ذخیره می‌کند. سطوح بالاتر فسفر در تیمارهای کمپوست نسبت به تیمارهای کود شاهد و شیمیایی می‌تواند به دلیل رهاسازی اسیدهای آلی توسط کمپوست‌ها در خاک باشد که منجر به هیدرولیز فسفر آلی می‌شوند، از این رو تغذیه فسفر برای گیاهان و میکروارگانیسم‌ها بهبود می‌یابد (Li et al., 2004). بولاک و همکاران (Bulluck et al., 2002) نشان دادند که غلظت پتاسیم در خاک‌های تیمار شده با کمپوست‌ها به میزان سه برابر افزایش یافت و در پایان سال دوم بیشتر از سال اول بود، در حالی که غلظت پتاسیم در خاک‌های تیمار شده با کودهای شیمیایی در طول زمان کاهش یافت. کبیری‌نژاد و هودجی (Kabirinejad & Hoodaji, 2012) به طور مشابه نشان دادند که کاربرد کمپوست (۵۰ تن در هکتار) به طور معناداری سطح پتاسیم در خاک را افزایش داد.

یکی دیگر از مزایای کمپوست‌ها تأثیر آن‌ها بر عناصر ثانویه (کلسیم، منیزیم، گوگرد) و کم‌مصرف (منگنز، روی، مس و آهن) خاک می‌باشد، چرا که این عناصر به ندرت توسط کشاورزان استفاده می‌شود و تأثیر بالقوه‌ای بر عملکرد و سلامت محصول دارند. در فصل دوم کشت، افزایش قابل توجهی در میزان منیزیم در تیمارهای کمپوست، بجز تیمار LG-Ch-B، مشاهده شد. کم بودن مقدار منیزیم در تیمار LG-Ch-B می‌تواند به دلیل اثرات باقی‌مانده‌ی کشت اول (جدول ۴) باشد؛ چرا که در کشت اول، مقدار جذب بالای منیزیم توسط گیاه (جدول ۶) سبب تخلیه‌ی بیشتر منیزیم از خاک تیمار شده با کمپوست LG-Ch-B شده است. همچنین مقدار بالای نسبت کربن به ازت (۱۵/۴) در کمپوست LG-Ch-B نسبت به دیگر کمپوست‌ها (جدول ۲) می‌تواند دلیل دیگر کم بودن منیزیم در خاک تیمار شده با کمپوست LG-Ch-B باشد. زمانی که نسبت کربن به ازت یک ترکیب آلی بالا باشد، نرخ تجزیه کاهش یافته در نتیجه مقدار رهاسازی عناصر غذایی کاهش پیدا می‌کند. بولاک و همکاران (Bulluck et al., 2002) گزارش کردند که غلظت منیزیم در خاک‌های دارای اصلاح‌کننده‌های آلی در طول دوره ۲ ساله، بیش از دو برابر افزایش یافته است. افزایش جزئی در غلظت منیزیم در خاک‌های حاوی کودهای شیمیایی توسط



شکل ۱- تحلیل خوشه‌ای دو مرحله‌ای برای تیمارهای خاک (a) و اهمیت ویژگی‌های مختلف خاک در خوشه‌بندی (b)
Figure 1- Two-step cluster analysis for soil treatments (a) and importance of soil properties in clustering (b)

چند این تفاوت در مورد همه شناسه‌ها نبوده است، با این حال مطابق تحلیل خوشه‌بندی، تیمارهای کمپوست هر فصل، بجز تیمار HG-All-S، در یک گروه قرار گرفتند و بنابراین تنها تأثیر زمان (استفاده مجدد) سبب جداسازی تیمارهای کمپوست از همدیگر شد. این بدین معنا است که استفاده مجدد از کمپوست‌ها منجر به حفظ یا افزایش سطح ازت، پتاسیم، فسفر، کربن، کربن فعال، نسبت کربن به ازت، هدایت الکتریکی، سدیم و pH در خاک شده است. تیمار LG-All-S و HG-Ch-A-F با وجود مقدار بالای هدایت الکتریکی و عدم اختلاف معنادار در غلظت سدیم با دیگر تیمارها، دارای مقدار بالای عناصر غذایی می‌باشند.

عملکرد اسفناج

در کشت اول (بهار)، تیمار LG-Ch-A بیشترین عملکرد (۸۴/۷ و ۱۱/۸ g pot^{-1} به ترتیب برای وزن تازه و آون خشک)، وزن تر و خشک ریشه (به ترتیب ۸/۰ و ۲/۲ g pot^{-1}) را نسبت به همه تیمارها داشت، و اختلاف معناداری با تیمارهای LG-All، HG-All، C0 و C150 نشان داد. در تیمار LG-All کمترین عملکرد مشاهده شد (۳۷/۵ و ۵/۴ g pot^{-1} به ترتیب برای وزن تازه و آون خشک). بعد از تیمار LG-Ch-A، تیمارهای HG-Ch-B و C500 عملکرد بهتری نسبت به دیگر تیمارها داشتند (به ترتیب ۱۰/۸ و ۱۰ گرم وزن آون خشک در گلدان) و اختلاف معناداری با تیمار LG-All نشان دادند (جدول ۵).

خوشه‌ی سوم که شامل تمام تیمارهای کمپوست فصل دوم کشت بود، دارای بیشترین مقدار کربن آلی (۸/۷۸٪)، کربن فعال (۳۷۳/۶ میلی گرم بر کیلوگرم)، فسفر (۲۱/۹ میلی گرم بر کیلوگرم)، pH (۸/۴۶) و نسبت کربن به ازت (۱۳/۶۵)، و کمترین مقدار کلسیم (۱۱۳۲/۳ میلی گرم بر کیلوگرم) و آهن (۳/۸۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در بین دیگر خوشه‌ها بود.

خوشه‌ی چهارم (تمام تیمارهای کمپوست فصل اول کشت، بجز تیمار HG-All-S) و خوشه پنجم (HG-All-S) شباهت زیادی با هم داشتند، به طوری که مقدار بالای هدایت الکتریکی، سدیم، کلسیم، روی و ازت را در بین دیگر خوشه‌ها داشتند. تفاوت این دو خوشه در مقدار بالای نیترات در خوشه چهارم، و مقدار بالای پتاسیم، آهن، منیزیم، نسبت آمونیوم به نیترات، و مقدار کم نیترات در خوشه‌ی پنجم بود.

با انجام تحلیل خوشه‌بندی، تأثیر تیمارها بر خاک بهتر نمایان می‌شود، چرا که همزمان تمام شناسه‌های اندازه‌گیری شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. در هر دو دوره کشت، تیمارهای کمپوست از تیمارهای شیمیایی و شاهد جدا شدند (شکل ۱ a). بررسی وضعیت مقدار عناصر در تیمارهای شاهد و شیمیایی در کشت پاییز که در خوشه دوم قرار گرفتند نشان می‌دهد که تخلیه عناصر غذایی ازت، پتاسیم، فسفر، منیزیم، آمونیوم، روی، آهن، مس و کربن فعال در این تیمارها به دلیل جذب عناصر توسط گیاه و عدم ورود آنها از طریق کودها اتفاق افتاده است. به علاوه، در تیمار C500 به دلیل استفاده از سطح بالای کود اوره، افزایش غلظت نیترات رخ داده است. براساس نتایج تجزیه واریانس (مقایسه شناسه‌ها به طور جداگانه)، بین برخی از تیمارهای کمپوست تفاوت‌های آماری مشاهده شد (بخش ویژگی‌های شیمیایی خاک)، هر

جدول ۵- تأثیر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی اوره بر عملکرد اسفناج

Table 5- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on yield of spinach

وزن خشک	وزن تازه	وزن خشک	وزن تازه	وزن خشک	وزن تازه	وزن خشک	وزن تازه	وزن خشک	وزن تازه
ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه	ریشه
Root dry weight	Root fresh weight	Root dry weight	Root fresh weight	Root dry weight	Root fresh weight	Root dry weight	Root fresh weight	Root dry weight	Root fresh weight
تیمارها	وزن تازه	وزن خشک	تیمارها	وزن تازه	وزن خشک	تیمارها	وزن تازه	وزن خشک	تیمارها
Treatments	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Treatments	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Treatments	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Treatments
بهار	برگ	برگ	پاییز	برگ	برگ	پاییز	برگ	برگ	پاییز
Spring	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Fall	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Fall	Shoot fresh weight	Shoot dry weight	Fall
g pot ⁻¹					g pot ⁻¹				
C0	45.1 ^{cd}	6.5 ^{bc}	4.1 ^b	1.1 ^b	C0	21.6 ^c	2.8 ^b	6.3 ^b	2.4 ^{ab}
C150	44.5 ^{cd}	6.8 ^{bc}	3.9 ^b	1.0 ^b	C150	41.0 ^{abc}	5.2 ^{ab}	11.9 ^{ab}	3.4 ^{ab}
C500	74.2 ^{ab}	10.0 ^{ab}	5.9 ^{ab}	1.6 ^{ab}	C500	40.6 ^{abc}	4.9 ^{ab}	8.2 ^{ab}	2.0 ^b
HG-Ch-A	60.3 ^{bcd}	7.9 ^{abc}	6.6 ^{ab}	1.8 ^{ab}	HG-Ch-A	43.9 ^{abc}	5.6 ^{ab}	18.2 ^{ab}	4.9 ^{ab}
HG-Ch-B	68.7 ^{abc}	10.8 ^{ab}	6.5 ^{ab}	1.8 ^{ab}	HG-Ch-B	29.0 ^{bc}	3.7 ^{ab}	11.0 ^{ab}	4.7 ^{ab}
HG-A-B	53.4 ^{bcd}	7.7 ^{abc}	5.4 ^{ab}	1.5 ^{ab}	HG-A-B	29.3 ^{bc}	3.9 ^{ab}	9.7 ^{ab}	4.3 ^{ab}
HG-All	56.1 ^{bcd}	7.1 ^{bc}	4.5 ^b	1.2 ^b	HG-All	48.1 ^{ab}	6.3 ^a	19.5 ^a	8.0 ^a
LG-Ch-A	84.7 ^a	11.8 ^a	8.0 ^a	2.2 ^a	LG-Ch-A	41.2 ^{abc}	5.4 ^{ab}	12.5 ^{ab}	4.1 ^{ab}
LG-Ch-B	56.9 ^{bcd}	8.5 ^{abc}	5.3 ^{ab}	1.4 ^{ab}	LG-Ch-B	26.4 ^{bc}	3.2 ^{ab}	7.2 ^{ab}	2.5 ^{ab}
LG-A-B	66.2 ^{abc}	9.6 ^{abc}	6.7 ^{ab}	1.8 ^{ab}	LG-A-B	56.4 ^a	6.4 ^a	13.7 ^{ab}	3.8 ^{ab}
LG-All	37.5 ^d	5.4 ^c	3.6 ^b	1.0 ^b	LG-All	49.8 ^{ab}	6.4 ^a	11.5 ^{ab}	3.3 ^{ab}

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره ۴۶ درصد؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ۴۶ درصد؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A: یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت متفاوت معناداری دارند (p<0.05).

C0: Control; C150: 150 kg ha⁻¹ of urea 46%; C500: 500 kg ha⁻¹ of urea 46%; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: All three raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different (p<0.05).

۱۰۰٪ سبب افزایش شاخص‌های رشد و عملکرد در اسفناج شد و با افزایش سطح کود شیمیایی به میزان ۱۲۵ و ۱۵۰ درصد، شاخص‌های رشد و عملکرد، بجز وزن تر، به میزان قابل توجهی کاهش یافت. در فصل پاییز، میزان عملکرد در تمام تیمارها کمتر از فصل بهار بود (جدول ۵). در فصل بهار با افزایش دما، گیاه رشد بیشتری داشته و سریع وارد فاز گلدهی شد. از طرف دیگر، در فصل پاییز با کاهش دما و حمله‌ی حشرات شدت رشد اسفناج کاهش یافت.

مقدار جذب عناصر غذایی توسط اسفناج

در هر دو فصل کشت، مقدار جذب عناصر غذایی خاک توسط اسفناج اختلاف آماری معناداری بین تیمارها نشان داد (جدول ۶). در فصل اول کشت، تیمار C500 بیشترین جذب پتاسیم، و تیمارهای C150 و LG-All کمترین جذب پتاسیم را در بین تیمارها داشتند. تیمار LG-Ch-A بیشترین مقدار جذب پتاسیم را در بین تیمارهای کمپوست داشت. روند تغییرات مقدار جذب پتاسیم تحت تأثیر مقدار فراهمی پتاسیم و نیتروژن قرار داشت. به عبارتی، روابط هم‌افزایی بین نیتروژن و پتاسیم مشاهده شد. به طوری که با افزایش فراهمی نیتروژن، مقدار جذب پتاسیم و به دنبال آن مقدار عملکرد افزایش یافت (جداول ۲، ۵ و ۶). تیمارهای LG-Ch-A و HG-Ch-B به دلیل فراهمی بالای نیتروژن، و تیمارهای LG-Ch-B و HG-Ch-B (جدول ۲) به دلیل

در کشت دوم، تیمار LG-A-B دارای بیشترین عملکرد (۵۶/۴ و ۶/۴ g pot⁻¹ به ترتیب برای وزن تازه و آون خشک) بود، و بیشترین شباهت و بیشترین تفاوت را به ترتیب با تیمارهای LG-All و C0 داشت. به علاوه، این تیمار از نظر وزن تازه اختلاف معناداری با تیمارهای LG-Ch-B، HG-A-B، HG-Ch-B و C0 نشان داد. علی رغم عدم تفاوت معنادار، مقدار عملکرد در تمام تیمارهای کمپوست و کود شیمیایی بیشتر از تیمار شاهد بود. افزایش عملکرد اسفناج با کاربرد کودهای آلی به دلیل رهاسازی فسفر، پتاسیم و ازت در طول معدنی‌شدن ترکیب آلی و همچنین بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد (Mbarki et al., 2008). نجفی و رحیمی (Najafi-Ghiri & Rahimi, 2016) بیان کردند که میزان وزن خشک اسفناج در تیمار ۲ درصد ورمی کمپوست به طور معناداری بیشتر از تیمار شاهد بود (به ترتیب ۲/۱۳ و ۰/۸ گرم در گلدان). میزان عملکرد در تیمارهای کمپوست در هر دو فصل، بین ۰/۲۵ تا ۲/۵ برابر بیشتر از تیمار شاهد، و در فصل بهار بیشتر از تیمار C150 بود (جدول ۵). این نتایج همسو با یافته‌ی ماکادو و همکاران (Machado et al., 2020) و ملانو و بواکوا (Mellano & Bevacqua, 1992) می‌باشد.

در فصل پاییز مقدار عملکرد در تیمار C150 بیشتر از تیمار C500 بود، هرچند این اختلاف معنادار نبود (جدول ۵). گالی و همکاران (Ghaly et al., 2017) بیان کردند که تیمار کود شیمیایی با سطح

همزمان دیگر عناصر، به‌ویژه عناصر کم‌مصرف، در افزایش عملکرد، و همچنین نقش عناصر کم‌مصرف، به‌ویژه آهن، در کاهش تجمع نیترات در گیاه باشد. زیرا آهن در ساختار آنزیم‌های کاهنده نیترات حضور دارد (Ghaly et al., 2017).

در فصل دوم کشت، تیمار LG-A-B بیشترین مقدار جذب پتاسیم را نسبت به دیگر تیمارها داشت که تنها با تیمارهای شاهد، HG-Ch-B، LG-Ch-B و HG-A-B اختلاف معنادار نشان داد (جدول ۶). فراهمی پتاسیم توسط کمپوست و همچنین مقدار باقیمانده پتاسیم خاک بعد از کشت اول اثر مستقیمی بر روی مقدار جذب پتاسیم داشتند (جداول ۲ و ۴). در تیمارهای شیمیایی با وجود فراهمی کم پتاسیم خاک، مقدار پتاسیم جذب شده توسط گیاه اختلاف معناداری با تیمارهای کمپوست نشان نداد. این مشاهده می‌تواند به دلیل فراهمی بالای نیتروژن و وجود رابطه‌ی هم‌افزایی بین این دو عنصر باشد.

فراهمی بالای منیزیم، مقدار جذب منیزیم بالاتری نسبت به دیگر تیمارها داشتند (جدول ۶). مقدار جذب فسفر توسط گیاه در تیمارها تحت تأثیر فراهمی فسفر، نیتروژن و پتاسیم قرار داشت. به‌طوری‌که تیمارهای HG-Ch-B، LG-Ch-A و HG-A-B به‌ترتیب بیشترین جذب فسفر را داشتند که اختلاف معناداری با تیمارهای شاهد، شیمیایی و LG-All نشان دادند (جدول ۶). مقدار جذب روی و آهن همسو با مقدار نیتروژن کمپوست و عملکرد بود. تیمار LG-Ch-A به‌دلیل نیتروژن بالای کمپوست و عملکرد بالا، بیشترین جذب روی و آهن، و تیمارهای LG-All و LG-Ch-B به‌دلیل نیتروژن کم کمپوست و عملکرد کم، کم‌ترین جذب روی و آهن را داشتند (جدول ۶). در تیمار C500، افزایش عملکرد همراه با افزایش مقدار جذب نیترات توسط گیاه بود. در حالی‌که در تیمار LG-Ch-A با وجود مقدار بالای نیترات و نیتروژن در کمپوست متناظرش، افزایش عملکرد همراه با افزایش مقدار جذب نیترات نبود. این مشاهده می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تأثیر حضور

جدول ۶- اثر هشت تیمار کمپوست تفاله انگور و دو سطح کود شیمیایی اوره بر مقدار جذب عناصر غذایی توسط اسفناج در دو نوبت کشت

Table 6- The effect of eight grape pomace composts and two levels of urea fertilizer on uptake of nutrient by spinach in two seasons

تیمار Treatment	پتاسیم K	سدیم Na	کلسیم Ca	منیزیم Mg	فسفر P	آهن Fe	روی Zn	مس Cu	نیترات NO ₃ ⁻
mg pot ⁻¹									
بهار Spring									
C0	618.0 ^{de}	13.1 ^{bc}	90.4 ^{abc}	23.7 ^{cd}	17.8 ^{def}	5.26 ^b	0.55 ^{bcd}	0.25 ^c	8.39 ^{cd}
C150	586.4 ^e	10.4 ^c	66.4 ^{bc}	25.9 ^{bcd}	15.6 ^{ef}	9.19 ^{ab}	0.52 ^{bcd}	0.69 ^a	5.78 ^d
C500	1130.3 ^a	18.7 ^{bc}	121.9 ^a	32.7 ^{bcd}	17.7 ^{def}	8.60 ^{ab}	0.87 ^{ab}	0.42 ^{abc}	34.47 ^a
HG-Ch-A	993.8 ^{abc}	30.0 ^{ab}	87.6 ^{abc}	47.8 ^{abc}	31.5 ^{a-d}	7.80 ^{ab}	0.73 ^{abc}	0.43 ^{abc}	7.25 ^{cd}
HG-Ch-B	960.4 ^{a-d}	21.6 ^{abc}	116.7 ^{ab}	60.5 ^{ab}	40.9 ^a	9.43 ^{ab}	0.77 ^{abc}	0.50 ^{abc}	11.84 ^{bcd}
HG-A-B	698.6 ^{cde}	21.0 ^{abc}	89.6 ^{abc}	38.9 ^{bcd}	34.4 ^{abc}	7.11 ^{ab}	0.64 ^{a-d}	0.41 ^{abc}	10.88 ^{bcd}
HG-All	752.6 ^{b-e}	20.7 ^{abc}	97.8 ^{abc}	23.7 ^{cd}	23.4 ^{cde}	5.29 ^b	0.58 ^{bcd}	0.26 ^{bc}	7.35 ^{cd}
LG-Ch-A	1085.9 ^{ab}	26.8 ^{abc}	114.1 ^{ab}	75.7 ^a	39.3 ^{ab}	10.70 ^a	0.99 ^a	0.67 ^{ab}	17.24 ^b
LG-Ch-B	767.3 ^{b-e}	19.2 ^{bc}	47.1 ^c	81.0 ^a	19.3 ^{c-f}	8.22 ^{ab}	0.42 ^{cd}	0.51 ^{abc}	9.94 ^{bcd}
LG-A-B	1003.4 ^{abc}	30.0 ^{ab}	106.9 ^{ab}	54.6 ^{abc}	25.4 ^{b-e}	9.08 ^{ab}	0.57 ^{bcd}	0.50 ^{abc}	14.51 ^{bc}
LG-All	473.7 ^e	39.0 ^a	69.8 ^{bc}	12.4 ^d	7.9 ^f	6.90 ^{ab}	0.30 ^d	0.47 ^{abc}	12.42 ^{bcd}
پاییز Fall									
C0	214.1 ^c	5.2 ^{ab}	10.0 ^c	21.2 ^{bc}	7.2 ^d	1.38 ^b	0.17 ^{bc}	0.04 ^b	6.25 ^{bc}
C150	396.8 ^{abc}	5.9 ^{ab}	20.3 ^{bc}	43.6 ^a	12.3 ^{a-d}	2.14 ^{ab}	0.28 ^{ab}	0.08 ^a	11.30 ^{abc}
C500	368.3 ^{abc}	2.6 ^b	25.2 ^{abc}	33.7 ^{abc}	12.6 ^{a-d}	2.69 ^{ab}	0.26 ^{abc}	0.07 ^{ab}	10.53 ^{abc}
HG-Ch-A	455.9 ^{ab}	5.0 ^{ab}	30.9 ^{ab}	36.1 ^{abc}	13.6 ^{a-d}	2.75 ^{ab}	0.27 ^{ab}	0.08 ^a	9.44 ^{abc}
HG-Ch-B	295.0 ^{bc}	5.2 ^{ab}	22.3 ^{abc}	18.1 ^c	8.7 ^{cd}	1.81 ^{ab}	0.17 ^{bc}	0.03 ^b	8.98 ^{abc}
HG-A-B	303.6 ^{bc}	2.6 ^b	19.0 ^{bc}	18.6 ^c	8.9 ^{bcd}	1.16 ^b	0.13 ^c	0.03 ^b	6.22 ^{bc}
HG-All	405.4 ^{abc}	2.9 ^b	29.2 ^{abc}	28.4 ^{bc}	15.7 ^{ab}	2.92 ^a	0.31 ^a	0.07 ^{ab}	17.49 ^{ab}
LG-Ch-A	439.4 ^{abc}	2.6 ^b	22.3 ^{abc}	39.1 ^{abc}	14.5 ^{abc}	1.89 ^{ab}	0.24 ^{abc}	0.04 ^b	14.47 ^{abc}
LG-Ch-B	272.7 ^{bc}	5.5 ^{ab}	16.4 ^{bc}	18.7 ^c	8.6 ^{cd}	1.19 ^b	0.14 ^{bc}	0.03 ^b	4.52 ^c
LG-A-B	539.2 ^a	9.1 ^a	41.5 ^a	40.5 ^{ab}	17.6 ^a	3.07 ^a	0.29 ^a	0.07 ^{ab}	14.15 ^{abc}
LG-All	488.6 ^{ab}	8.3 ^{ab}	32.1 ^{ab}	40.5 ^{ab}	16.0 ^a	1.24 ^b	0.28 ^{ab}	0.07 ^{ab}	20.45 ^a

C0: شاهد؛ C150: ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره ۴۶ درصد؛ C500: ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار اوره ۴۶ درصد؛ HG: سطح بالای تفاله انگور؛ LG: سطح کم تفاله انگور؛ A:

یونجه؛ B: تفاله چغندر؛ Ch: کاه نخود؛ All: متشکل از تمام مواد اولیه؛ در هر ستون، میانگین‌های با حروف متفاوت متفاوت معنی‌داری دارند (p<0.05).

C0: Control; C150: 150 kg ha⁻¹ of urea; C500: 500 kg ha⁻¹ of urea; HG: High level of grape pomace; LG: Low level of grape pomace; A: Alfalfa; B: Sugar beet pulp; Ch: Chickpea straw; All: Composed of all raw materials. Means followed by different letters within a column are significantly different (p<0.05).

جذب منیزیم و کلسیم توسط گیاه نیز همانند پتاسیم، تحت تأثیر فراهمی منیزیم توسط کمپوست، مقدار منیزیم فراهم موجود در خاک بعد از کشت اول، نسبت کربن به ازت کمپوست، رابطه‌ی هم‌آوردی منیزیم با کلسیم، و مقدار عملکرد بود. مقدار جذب فسفر توسط گیاه در بین تیمارها مشابه مقدار جذب پتاسیم بود. به‌طوری‌که تیمارهای LG-A-B و LG-All به‌دلیل مقدار بالای پتاسیم فراهم خاک بعد از کشت اول، مقدار بالای فسفر فراهم خاک بعد از کشت اول، و عملکرد بالا، بیشترین جذب فسفر را داشتند، و اختلاف آماری معنی‌داری با تیمار شاهد نشان دادند. کومولاف و همکاران (Komolafe et al., 2021) مشاهده کردند که مقدار جذب فسفر و پتاسیم توسط گیاه ذرت در تیمارهای کمپوست به‌طور معناداری بیشتر از تیمار شاهد بود. تیمارهای LG-A-B و HG-All بیشترین جذب روى و آهن را داشتند که اختلاف معناداری با تیمارهای شاهد، LG-Ch-B و HG-A-B نشان دادند. این مشاهدات همسو با مقدار بالای آهن، روى و پتاسیم کمپوست متناظرشان، پتاسیم فراهم خاک بعد از کشت اول و عملکرد بود. رضایی و همکاران (Rezaee et al., 2021) گزارش کردند که مقدار جذب روى توسط گندم در تیمار کمپوست (۸۲ میلی‌گرم بر گلدان) به‌طور معناداری بیشتر از تیمار شاهد (۵۷ میلی‌گرم بر گلدان) و تیمار شیمیایی سولفات روى (۶۸ میلی‌گرم بر گلدان) بود. بیشترین جذب نیترات در تیمار LG-All مشاهده شد که اختلاف معناداری با تیمارهای شاهد، LG-Ch-B و HG-A-B نشان داد. نتایج مشاهده شده برای نیترات تحت تأثیر مقدار نیترات در کمپوست متناظرشان، پتاسیم فراهم خاک بعد از کشت اول و عملکرد گیاه بود.

نتیجه‌گیری

استفاده از کود شیمیایی اوره در دو سطح و کمپوست‌های تهیه شده از ترکیب دو سطح (کم و زیاد) تفاله انگور همراه با یونجه، کاه نخود و تفاله چغندر در دو فصل کشت، بر عملکرد اسفناج بین تیمار کود شیمیایی سطح بالا و تیمارهای کمپوست تفاوت معناداری نداشت، ولی نسبت به تیمار شاهد باعث افزایش عملکرد شد. در مقابل، تیمارهای شیمیایی و کمپوست اثرات متفاوتی بر خاک و مقدار جذب عناصر توسط اسفناج داشتند. مقدار جذب عناصر توسط گیاه تحت تأثیر نوع عنصر،

فراهمی آن در خاک، مقدار اولیه آن در کود یا کمپوست، pH خاک و عملکرد بود. در کشت دوم علاوه بر عوامل یادشده، اثرات باقیمانده کشت اول بر فراهمی عناصر نیز بر مقدار جذب آنها تأثیر داشت. به طوری‌که در فصل دوم کشت، تیمار یونجه، تفاله چغندر با سطح تفاله انگور کم (LG-A-B)، بیشترین مقدار جذب تمام عناصر به‌جز روى و نیترات را به‌دلیل مقدار عملکرد بالا، فراهمی بیشتر عناصر در خاک، حاصلخیزی بالای کمپوست و مقدار کم نسبت کربن به نیتروژن کمپوست داشت. استفاده از کمپوست‌های تفاله انگور در دو نوبت سبب افزایش محتوای ازت، فسفر، پتاسیم، منیزیم، روى، مس، کربن فعال و کربن آلی در خاک شد. از آنجایی که کاربرد عناصری نظیر منیزیم، مس و روى توسط کشاورزان به ندرت صورت می‌گیرد، این نتایج بسیار حائز اهمیت است. در مقابل، تخلیه تمام عناصر، به‌جز کربن آلی، در تیمارهای کود شیمیایی و شاهد به‌دلیل جذب توسط گیاه و عدم تأمین آن از طریق کود اتفاق افتاد. از طرف دیگر، افزایش غلظت نیترات خاک در تیمار سطح دوم کود شیمیایی رخ داد. مقدار فراهم عناصر خاک تحت تأثیر مقدار ورود عناصر به خاک توسط کود یا کمپوست، مقدار جذب عناصر توسط گیاه و همچنین pH خاک بود. بعد از دو نوبت استفاده از کمپوست، تیمارهای کمپوست متشکل از تمام مواد اولیه در هر دو سطح تفاله انگور به‌عنوان بهترین تیمارهای افزایش‌دهنده حاصلخیزی خاک و کاهش‌دهنده مقدار هدایت الکتریکی و نیترات بودند. تیمار کاه نخود، یونجه با سطح تفاله انگور بالا با وجود افزایش سطح هدایت الکتریکی خاک، حاصلخیزی بالایی بعد از تیمارهای متشکل از تمام مواد اولیه داشت. تیمار کاه نخود، تفاله چغندر با سطح تفاله انگور کم به‌عنوان ضعیف‌ترین تیمار کمپوست به دلیل کربن آلی و حاصلخیزی کم، افزایش pH خاک، جذب کم عناصر توسط گیاه و عملکرد کم شناخته شد. با وجود تأثیر مثبت کمپوست‌های تفاله انگور در افزایش حاصلخیزی خاک، کاربرد مقادیر بالا و پیوسته این کمپوست‌ها به‌دلیل افزایش مقدار pH، هدایت الکتریکی و سدیم در خاک‌های مناطق خشک، به‌ویژه خاک‌های قلیایی و شور، دارای محدودیت است. تفاوت بین تیمارهای کمپوست پس از دو مرحله کاربرد کمپوست، کمتر از یکبار کاربرد کمپوست بود؛ این نتایج با نتایج تحلیل خوشه‌بندی تأیید شد به‌طوری‌که تمام تیمارهای کمپوست در فصل دوم در یک خوشه قرار گرفتند.

References

1. Agriculture Jihad Organization of Hamedan Province. (2022). Basic statistics of 2021, Deputy of planning and economic affairs, Department of Statistics and Information Technology. Hamedan.
2. Ajila, C.M., Brar, S.K., Verma, M., & Prasada Rao, U.J.S. (2012). Sustainable solutions for agro processing waste management: An overview. In *Environmental Protection Strategies for Sustainable Development*, 65–109. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1591-2_3
3. Aytenew, M., & Bore, G. (2020). Effects of organic amendments on soil fertility and environmental quality: A review. *Journal of Plant Sciences*, 8(5), 112. <https://doi.org/10.11648/j.jps.20200805.12>

4. Bastida, F., Kandeler, E., Hernández, T., & García, C. (2008). Long-term effect of municipal solid waste amendment on microbial abundance and humus-associated enzyme activities under semiarid conditions. *Microbial Ecology*, 55(4), 651–661. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9308-0>
5. Bernal, M.P., Paredes, C., Sánchez-Monedero, M.A., & Cegarra, J. (1998). Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bioresource Technology*, 63(1), 91–99. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00084-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00084-9)
6. Bulluck, L.R., Brosius, M., Evanylo, G.K., & Ristaino, J.B. (2002). Organic and synthetic fertility amendments influence soil microbial, physical and chemical properties on organic and conventional farms. *Applied Soil Ecology*, 19(2), 147–160. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(01\)00187-1](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(01)00187-1)
7. Butler, T.J., & Muir, J.P. (2006). Dairy manure compost improves soil and increases tall wheatgrass yield. *Agronomy Journal*, 98(4), 1090–1096. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0348>
8. Cataldo, D.A., Haroon, M.H., 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. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
9. Cheng, K.L., & Bray, R.H. (1951). Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Science*, 72(6), 449–458. <https://doi.org/10.1097/00010694-195112000-00005>
10. CQCC- California Compost Quality Council. (2001). compost maturity index. 26.
11. Diacono, M., & Montemurro, F. (2011). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Sustainable Agriculture*, 2, 761–786. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_34
12. Eleonora, N., Alina, D., Erzsebet, K., & Valeria, C. (2014). Grape pomace as fertilizer. *Forestry and Biotechnology*, 18(2), 141–145.
13. Estefan, G., Sommer, R., & Ryan, J. (2013). *Methods of Soil, Plant, and Water Analysis: A manual for the West Asia and North* (Third Edit). international center for agricultural research in the dry areas.
14. Fincheira-Robles, P., Martínez-Salgado, M., Ortega-Blu, R., & Janssens, M. (2016). Compost and humic substance effects on soil parameters of *Vitis vinifera* L cv Thompson seedless. *Scientia Agropecuaria*, 7, 291–296. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.03.17>
15. Ghaly, F., Baddour, G., & El-Azazy, H. (2017). Nitrate accumulation and oxalate formation in spinach plants (*Spinacia oleracea* L.) as affected by nitrogen fertilization levels and iron foliar application. *Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 8(11), 571–576. <https://doi.org/10.21608/jssae.2017.38092>
16. Gurmu, G. (2019). Soil organic matter and its role in soil health and crop productivity improvement. *Journal of Agricultural Science and Research*, 7(7), 475–483.
17. Hansen, L., Noe, E., & Højring, K. (2006). Nature and nature values in organic agriculture. An analysis of contested concepts and values among different actors in organic farming. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 19(2), 147–168. <https://doi.org/10.1007/s10806-005-1804-y>
18. Hendershot, W., Lalonde, H., & Duquette, M. (2007). *Soil Reaction and Exchangeable Acidity*. In E. Carter, M.R., Gregorich (Ed.), *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Second Edition (p. 1224). <https://doi.org/10.1201/9781420005271.ch16>
19. Huang, C.Y.L., & Schulte, E.E. (1985). Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16(9), 943–958. <https://doi.org/10.1080/00103628509367657>
20. Kabirinejad, S., & Hoodaji, M. (2012). The effects of biosolid application on soil chemical properties and *Zea mays* nutrition. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 1(1), 4. <https://doi.org/10.1186/2251-7715-1-4>
21. Karaca, A. (2004). Effect of organic wastes on the extractability of cadmium, copper, nickel, and zinc in soil. *Geoderma*, 122(2-4 SPEC. IIS.), 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.016>
22. Klute, A. (1966). "Methods and soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 432–449.
23. Komolafe, A.F., Adejuyigbe, C.O., Babalola, O.A., Soretire, A.A., & Kayode, C.O. (2021). Fertilizer values of composts as affected by plant materials and composting duration on maize (*Zea mays*) performance. *Agro-Science*, 20(1), 87–94. <https://doi.org/10.4314/as.v20i1.14>
24. Li, L., Tang, C., Rengel, Z., & Zhang, F.S. (2004). Calcium, magnesium and microelement uptake as affected by phosphorus sources and interspecific root interactions between wheat and chickpea. *Plant and Soil*, 261(1–2), 29–37. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000035579.39823.16>
25. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for Zinc, Iron, Manganese, and Copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
26. Machado, R.M.A., Alves-Pereira, I., Lourenço, D., & Ferreira, R.M.A. (2020). Effect of organic compost and inorganic nitrogen fertigation on spinach growth, phytochemical accumulation and antioxidant activity. *Heliyon*, 6(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05085>
27. Martínez, M.M., Ortega, R., Janssens, M., & Fincheira, P. (2018). Use of organic amendments in table grape: Effect on plant root system and soil quality indicators. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 18(1), 100–112.

- <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005000501>
28. Mbarki, S., Labidi, N., Mahmoudi, H., Jedidi, N., & Abdelly, C. (2008). Contrasting effects of municipal compost on alfalfa growth in clay and in sandy soils: N, P, K, content and heavy metal toxicity. *Bioresource Technology*, 99(15), 6745–6750. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.010>
29. McConnell, D.B., Shiralipour, A., & Smith, W.H. (1993). Compost application improves soil properties. *BioCycle*, 34(4), 61–63.
30. Mellano, V.J., & Bevacqua, R.F. (1992). Sewage sludge compost as a soil amendment for horticultural crops. *HortScience*, 27(6), 697a–697. <https://doi.org/10.21273/hortsci.27.6.697a>
31. Mirabella, N., Castellani, V., & Sala, S. (2014). Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. *Journal of Cleaner Production*, 65, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>
32. Mohamed, A., Ali, O., & Matloub, M. (2007). *Effect of soil amendments on some physical and chemical properties of some soils of Egypt under saline irrigation water*. Society Conference, El-Minia, Egypt, 8, 1571–1578.
33. Motsara, M.R., & Roy, R.N. (2008). Guide to laboratory establishment for plant nutrient analysis. *Fao Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin* 19, 219.
34. Najafi-Ghiri, M., & Rahimi, T. (2016). Zinc uptake by Spinach (*Spinacia oleracea* L.) as affected by zn application rate, Zeolite, and Vermicompost. *Compost Science and Utilization*, 24(3), 203–207. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2015.1124818>
35. Nerantzis, E.T., & Tataridis, P. (2006). Integrated enology utilization of winery by-products into high added value products. *E-Journal of Science and Technology*, 1(3), 79–89.
36. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F., & Dean, L. (1954). Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
37. Papadimitriou, E. K., Chatjipavlidis, I., & Balis, C. (1997). Application of composting to olive mill wastewater treatment. *Environmental Technology* (United Kingdom), 18(1), 101–107. <https://doi.org/10.1080/09593331808616517>
38. Rezaee, Z., Norouzi Masir, M., & Moezzi, A. (2021). Effect of compost and biochar of bagasses on zinc uptake and growth indices of Wheat under greenhouse condition. *Journal of Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization*, (Scientific Journal of Agriculture), 44(2), 255–274.
39. Rhoades, J.D. (1996). *Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids*. In *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods* (pp. 417–435). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
40. 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>
41. Rubio, R., Pérez-Murcia, M.D., Agulló, E., Bustamante, M.A., Sánchez, C., Paredes, C., & Moral, R. (2013). Recycling of agro-food wastes into vineyards by composting: agronomic validation in field conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 44(1–4), 502–516. <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.744152>
42. Rutherford, P.M., McGill, W.B., Arocena, J.M., & Figueiredo, C.T. (2008). *Total Nitrogen*. In M. R. Carter & E. G. Gregorich (Eds.), *Soil Sampling and Methods of Analysis* (Second Edi, pp. 239–250). Canadian society of soil science. <https://doi.org/10.1201/9781420005271-30>
43. Sánchez-Monedero, M.A., Roig, A., Paredes, C., & Bernal, M.P. (2001). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, EC and maturity of the composting mixtures. *Bioresource Technology*, 78(3), 301–308. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00031-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00031-1)
44. SAS Institute Inc. (2013). SAS/ACCESS® 9.4 Interface to ADABAS: Reference. (9.4). Cary, NC: SAS Institute Inc.
45. Sodhi, G.P.S., Beri, V., & Benbi, D.K. (2009). Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 412–418. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.005>
46. Stevenson, F.J. (2018). Organic matter-micronutrient reactions in soil. *Micronutrients in Agriculture*, 145–186. <https://doi.org/10.2136/sssabookser4.2ed.c6>
47. Ugwuoke, C.U., Monwuba, N., Onu, F.M., Shimave, A.G., Okonkwo, E.N., & Oporum, C.C. (2018). Impact of agricultural waste on sustainable environment and health of rural women. *Civil and Environmental Research*, 10(9), 1–9.
48. Van der Wurff, A.W.G., Fuchs, J.G., Raviv, M., & Termorshuizen, A. (2016). *Handbook for composting and compost use in organic horticulture*. In A. J. Van der Wurff, A.W.G., Fuchs, J.G., Raviv, M., Termorshuizen (Ed.), *Veer Ecology*. <https://doi.org/10.18174/375218>
49. 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>
50. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter,

- and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1), 29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
51. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M., Gruver, J.B., & Samson-Liebig, S.E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18(1), 3–17. <https://doi.org/10.1079/ajaa2003003>
52. Yeomans, J.C., & Bremner, J.M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>
53. Zhao, B., Maeda, M., Zhang, J., Zhu, A., & Ozaki, Y. (2006). Accumulation and chemical fractionation of heavy metals in andisols after a different, 6-year fertilization management. *Environmental Science and Pollution Research*, 13(2), 90–97. <https://doi.org/10.1065/espr2005.06.268>
54. Zheljazkov, V.D., & Warman, P.R. (2002). Comparison of three digestion methods for the recovery of 17 plant essential nutrients and trace elements from six composts. *Compost Science and Utilization*, 10(3), 197–203. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2002.10702081>



Effects of Humic Acid as Fertigation on Phosphate and Iron Fertilizers Efficiency and Some of Mineral Nutrients Concentration in Corn (*Zea mays* L.)

M. Amarloo¹, M. Heshmati Rafsanjani^{2*}, M. Hamidpour³

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Assistant Professor and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: heshmati@vru.ac.ir)

Received: 06-08-2023
Revised: 11-10-2023
Accepted: 25-11-2023
Available Online: 25-11-2023

How to cite this article:

Amarloo, M., Heshmati Rafsanjani, M., & Hamidpour, M. (2024). Effects of humic acid as fertigation on phosphate and iron fertilizers efficiency and some of mineral nutrients concentration in corn (*Zea mays* L.). *Journal of Water and Soil*, 37(6), 891-906. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83587.1315>

Introduction

Application of natural organic matter derived components, i.e. humic acid, as fertilizer is a suitable way to improve soil fertility and increase yield and quality of agricultural products. Many researchers reported positive effects of humic acid on water holding capacity, soil aeration, root formation and development, microorganism activities, and availability of mineral nutrients in soil. Antagonistic interaction between soil phosphorus and some micronutrients, especially in calcareous soils, can cause micronutrients deficiency in plants. With regard to positive effects of organic compounds on bioavailability of mineral nutrients, it seems that humic acid can positively affect the phosphorus interaction with micronutrients. Therefore, investigation of the effects of humic acid incorporated into irrigation water, phosphate and iron fertilizers application, on nutrients concentration in plants and their interactions is considerable.

Materials and Methods

This study was carried out to investigate the effects of application of humic acid in irrigation water, and phosphate and iron fertilizers in soil, on corn growth and concentration of P, Fe, Mn, Zn, and Cu in corn tissues. To this aim, a factorial experiment was conducted based on completely randomized design, with three replications in greenhouse. The factors included humic acid in 0, 70, and 140 mg kg⁻¹ levels, (7 times as fertigation during growth season; total use equal to 0, 490, and 980 mg kg⁻¹ of soil, respectively), phosphorus (P, as monocalcium phosphate monohydrate) in 0 and 50 mg kg⁻¹ levels, and Fe (as ferrous sulfate heptahydrate) in 0, 10, and 20 mg kg⁻¹ levels. P and Fe treatments were mixed with 4 kg of air-dried soil (<2 mm in diameter) and filled to the pots. Six seeds of maize (*Zea mays* L. cv. Single cross 704) were seeded per pot, and three seedlings were finally kept and grown for two months. After harvest, fresh and dried weight of shoots were measured. The roots were accurately extracted from the soil, washed, dried at 65°C, and weighed. Sample digestion and measuring concentration of P, Fe, Mn, Zn, and Cu were done according to conventional methods (P by a UV-Visible Spectrophotometer and metal elements by the GBS Savant Atomic Absorption Spectrometer). Statistical analyses were done by the IBM SPSS Statistics version 26 software.

Results and Discussion

According to this study results, the main effect of humic acid, on P concentration and dry matter of shoots and roots, was statistically significant. In presence of P (2nd P level), 490 and 980 mg kg⁻¹ humic acid levels significantly



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83587.1315>

increased the mean of dry matter compared to blank while humic acid had no significant effect on means of shoots and roots dry matter in 1st level of P (no P application). Increasing humic acid level from 490 to 980 mg kg⁻¹, significantly decreased mean of shoots dry matter. The interaction effect between humic acid and the other two factors exhibited statistical significance concerning root dry matter. The treatment combination of 50 mg kg⁻¹ of P, 490 mg kg⁻¹ of humic acid, and 20 mg kg⁻¹ of Fe yielded the highest mean root dry matter, which was 97% greater than that of the control. The 2nd level of P significantly increased the means of shoots P concentration in all levels of humic acid and Fe factors, compared to those of the 1st P factor level. There was no significant difference between means of shoots P concentration in different levels of humic acid and Fe factors, at the 1st level of P factor, separately. On the other hand, at the 2nd level of P factor, significant differences were observed between the means of P concentration for both other factors (significant interaction between P and humic acid, and between P and Fe Factors). Applying humic acid could significantly increase the means of shoots P concentration at the 2nd level of P factor, but there was no significant difference between those of 490 and 980 mg kg⁻¹ levels. About the effect of Fe factor on shoots P concentration, only 10 mg kg⁻¹ level of Fe significantly increased it. The main effect of the P and humic acid factors and interaction of the P and Fe factor on roots P concentration, were statistically significant. Roots P concentration increased significantly by 490 and 980 mg kg⁻¹ humic acid levels. A significant increase of roots P concentration was observed in the 1st P factor level and 10 mg kg⁻¹ level of Fe compared to the blank, and in 50 mg kg⁻¹ level of P, Fe factor had no significant effect on it. The results showed that humic acid could not improve P uptake by corn from the soil with low available phosphorus (*Olsen* extractable P lower than 4 mg kg⁻¹). The humic acid factor had no significant effect on Fe concentration of corn shoots, but its main effect and its triple interaction, with two other factors, on Fe concentration of the roots were statistically significant. There was no significant difference between the means of roots Fe concentration at the 1st level of P factor (9 treatments, various levels of humic acid and Fe factors). The highest mean of root's Fe concentration was found in treatment of the highest level of each factor, significantly more than those of the most of other treatments. About the Mn concentration in corn tissues, the Mn concentration in shoots was significantly increased by P fertilizer application, and Mn concentration in roots was significantly affected and increased by 490 and 980 mg kg⁻¹ humic acid levels. The means of Mn concentration of roots in 490 and 980 mg kg⁻¹ humic acid were not significantly different. The Zn concentration of corn shoots was significantly affected by interaction of the P and humic acid factors as the highest mean of it was in 0 mg kg⁻¹ of P and 980 mg kg⁻¹ humic acid levels, and there was no significant difference between those of other levels. The Zn concentration of corn roots was significantly increased by P applying and affected by the interaction of humic acid and Fe factors. When humic acid was at zero concentration level, Fe application of 20 mg kg⁻¹ significantly decreased the Zn concentration of corn shoots while with humic acid application (490 and 980 mg kg⁻¹) no significant difference was observed between the means. This result showed that humic acid can decrease the antagonistic effects of Fe and Zn in soil. The Cu concentration in shoots was significantly affected by the P and Fe factors. Usage of P fertilizer significantly increased the Cu concentration of corn shoots; on the contrary, the 2nd and 3rd levels of Fe factor (Fe applications) significantly decreased Cu concentration in shoots of corn. Moreover, using humic acid could significantly increase Cu concentration of corn roots without any significant interaction with the other two factors.

Conclusion

The findings suggest that in soils with very low available P, humic acid alone does not enhance the growth and dry matter yield of corn. However, the efficiency of phosphate fertilizer can be enhanced by applying humic acid fertilizer through irrigation water. Additionally, humic acid has been observed to mitigate antagonistic effects between P and certain micronutrients, as well as reduce antagonistic interactions among metal micronutrients. For the positive effect of humic acid on growth and adequate chemical composition of corn, concentration of 490 mg kg⁻¹ humic acid is recommended.

Keywords: Chemical composition, Dry matter, Fertilizer, Micronutrients, Organic acids

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۸۹۱-۹۰۶

تأثیر اسید هیومیک همراه با آب آبیاری بر کارایی کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی عناصر غذایی معدنی گیاه ذرت

محمد امارلو^۱ ID - محمد حشمتی رفسنجانی^{۲*} ID - محسن حمیدپور^۳ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۴

چکیده

به منظور بررسی تأثیر اسید هیومیک بر کارایی کاربرد کودهای شیمیایی فسفر و آهن و غلظت برخی عناصر غذایی در گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴)، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه اجرا شد. فاکتورهای آزمایش شامل اسید هیومیک همراه با آب آبیاری در سه سطح (صفر، ۷۰ و ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم، هفت نوبت با آب آبیاری؛ معادل صفر، ۴۹۰ و ۹۸۰ میلی گرم بر کیلوگرم طی فصل رشد)، فسفر به شکل مونوکلسیم فسفات در دو سطح (صفر و ۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) و آهن به شکل سولفات آهن در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. نتایج نشان داد که اسید هیومیک در اندام هوایی به طور مستقل تنها بر ماده خشک و در برهم کنش با فسفر غلظت فسفر و روی را تحت تأثیر قرار داده است؛ اما در ریشه، اسید هیومیک توانست موجب افزایش معنی دار وزن خشک ریشه و غلظت عناصر فسفر، آهن، منگنز و مس گردد. برهم کنش سه گانه ی اسید هیومیک با دو فاکتور دیگر تنها بر ماده خشک ریشه و غلظت آهن ریشه معنی دار بود. بیش ترین تأثیر بر وزن خشک اندام هوایی و ریشه به ترتیب مربوط به فسفر و اسید هیومیک بود و در ریشه آهن نیز در جایگاه سوم قرار گرفت. با توجه به فقر اولیه خاک از نظر فسفر، اسید هیومیک نتوانست فراهمی آن را افزایش دهد ولی در افزایش بازده فسفر کاربردی مؤثر بود. اسید هیومیک در افزایش غلظت هر چهار عنصر ریزمغذی آهن، منگنز، روی و مس در هر دو بخش اندام هوایی و ریشه یا یکی از آن ها، به طور مستقل یا در برهم کنش با آهن یا فسفر، مؤثر بود. کاربرد اسید هیومیک همراه با آب آبیاری، در هر دو سطح، توانست مانع کاهش غلظت روی در ریشه در حضور ۲۰ میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک شود که در مجموع افزایش جذب روی را نشان می داد. کاربرد آهن باعث افزایش غلظت فسفر در اندام هوایی و کاهش آن در ریشه شد. آهن هم چنین موجب کاهش غلظت روی ریشه و مس اندام هوایی شد در حالی که بر خلاف انتظار بر غلظت منگنز بافت گیاه، تأثیر معنی داری نداشت.

واژه های کلیدی: اسیدهای آلی، ترکیب شیمیایی، عناصر ریزمغذی، کودهای شیمیایی، وزن خشک

مقدمه

تجاری و نوآوری و تحویل، برآورده شد. تخمین زده می شود در سال ۲۰۵۰ جمعیت جهان به حدود ۱۰ میلیارد نفر برسد و نیاز به مواد غذایی ۷۰ درصد بیش تر از دهه دوم قرن، خواهد بود (Keating et al., 2014; Keating et al., 2010). در راستای مبارزه با گرسنگی، در برنامه ی توسعه پایدار سازمان ملل، پایان دادن به گرسنگی و بهبود امنیت غذایی، به عنوان اهداف اولیه تعیین و در دستور کار قرار گرفته

تغذیه پایدار جهان یکی از چالش های بزرگ جامعه ما است (FAO, 2015). افزایش تصاعدی جمعیت، بین سال های ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۰، تقاضا برای غذا را به شدت افزایش داد؛ این تقاضا با ترکیبی از پیشرفت های علمی و فناوری، سیاست دولت ها، مداخله نهادی و سرمایه گذاری

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: heshmati@vru.ac.ir)

است. تولید ذرت برای بقای انسان، به عنوان یکی از سه محصول غذایی جهانی، حیاتی است (Li et al., 2022). ذرت، پس از گندم و برنج، به عنوان سومین فرآورده مهم کشاورزی در جهان، اهمیت دارد. این فرآورده کشاورزی ارزشمند، علاوه بر آنکه حدود ۷۰ درصد از خوراک طیور را فراهم می‌آورد، دانه‌ای سودمند برای تولید روغن خوراکی، نشاسته و گلوکز و چندین فرآورده دیگر است (Hosseini & Abedi, 2007). گیاهان برای اینکه به طور طبیعی رشد نموده و به زندگی خود ادامه دهند به عناصر غذایی کافی و متعادل نیاز دارند. به منظور تأمین نیاز غذایی محصولات کشاورزی و افزایش تولید در واحد سطح، عملیات متعددی نظیر مصرف کودهای شیمیایی صورت می‌گیرد (Chaji et al., 2013). مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی موجب آسیب‌های زیادی به محیط زیست و بهداشت مواد خوراکی شده و مواد مضر سرطان‌زا را افزایش می‌دهند (Subhash et al., 2001). استفاده از کودها و مشتقات آلی طبیعی، از جمله اسید هیومیک، بدون اثرات مخرب زیست‌محیطی جهت بالا بردن عملکرد و میزان زیست‌توده گیاهان، به خصوص در شرایط متغیر محیطی، راهکار مناسبی است و از اسید هیومیک به عنوان کود آلی سازگار با طبیعت نام برده می‌شود (Arjumend et al., 2015). اسید هیومیک علاوه بر تأثیر مثبتی که بر جنبه‌های مختلف فتوسنتز دارد با افزایش تولید قند، پروتئین و ویتامین در گیاه، محتوای غذایی محصولات کشاورزی را بهبود می‌بخشد (Cavani et al., 2023). قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2010) در بررسی اثر کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری، بر عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت به این نتیجه رسیدند که استفاده از اسید هیومیک می‌تواند اثرات مثبتی را بر عملکرد دانه ذرت و برخی از صفات زراعی مرتبط با عملکرد دانه داشته باشد، که این اثرات می‌تواند در نتیجه بهبود شرایط فیزیولوژیکی گیاه باشد. اسید هیومیک به عنوان یک کود آلی باعث بهبود ساختار خاک، افزایش ریشه‌زایی، نگهداری بیش‌تر آب در خاک، کمک به رشد سریع باکتری‌های مفید در خاک، کمک به انحلال و آزادسازی عناصر غذایی و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی می‌گردد (Oktem & Oktem, 2020). همچنین مواد هیومیکی می‌توانند فسفات‌های نامحلول را به فسفر قابل‌دسترس در خاک تبدیل کنند و در نتیجه نقش حمایتی در تأمین فسفر برای رشد گیاه دارند (Yuan et al., 2022).

فسفر دومین عنصر پرمغذی مهم محدود کننده رشد گیاه و کم تحرک‌ترین عنصر ریزوسفر گیاهی است که برای رشد و توسعه محصول ضروری است (Holford, 1997). برخلاف فراوان بودن فسفر در بسیاری از خاک‌ها، مقادیر قابل جذب این عنصر برای گیاهان اندک و اغلب کم‌تر از نیاز گیاهان است زیرا عمده‌ی فسفر خاک به شکل فسفات‌های آهن و آلومینیم یا کلسیم، در شرایط اسیدی و قلیایی، بوده و حلالیت ناچیزی دارند (Li et al., 2016)؛ بخش زیادی از فسفات موجود در کودهای فسفر نیز پس از ورود به خاک، در ترکیب با

کاتیون‌های آهن، آلومینیم و کلسیم، بسته به واکنش خاک و حضور این کاتیون‌ها، به صورت رسوب از محلول خاک خارج می‌شوند. رسوب و جذب سطحی نیز در کاهش فراهمی فسفر خاک نقش دارند که در حضور ترکیبات آلی محلول خاک، انرژی جذب کم‌تر و فراهمی ثانویه افزایش می‌یابد. به طور کلی، تنها بخش کوچکی از فسفر کودهای فسفاتی در حمایت از رشد گیاه مؤثر هستند و بخش فراوانی از آن از دسترس گیاه خارج می‌شود (Yuan et al., 2022). اگر چه پژوهش‌های بسیاری نشان داده‌اند که اسید هیومیک به همراه مونوکلسیم فسفات می‌تواند حرکت و در دسترس بودن فسفر را در خاک افزایش دهد و همچنین اسید هیومیک در مقادیر زیاد، می‌تواند با آزادسازی پروتون در ریزوسفر کارایی کودهای فسفر را افزایش دهد (Jing et al., 2020)، ولی به نظر می‌رسد با تشکیل کمپلکس‌های فسفات با بنیان‌های آلی و از طرفی تشکیل کمپلکس‌های آلی پایدار آهن، با کاربرد اسید هیومیک برهم‌کنش تنازعی این دو عنصر غذایی نیز کاهش و بازدهی کودی و فراهمی دو عنصر، افزایش یابد. آهن یکی از عناصر ریزمغذی و ضروری رشد گیاه است که به شکل کاتیون Fe^{2+} جذب می‌شود. این عنصر یکی از عناصر ضروری برای ساخت کلروفیل، فتوسنتز، تنفس و سیستم‌های آنزیمی در گیاه است. میانگین غلظت عنصر آهن در پوسته‌ی جامد زمین و خاک به ترتیب ۵/۱ و ۳/۸ درصد وزنی است (Lindsay, 1979). برخی از خصوصیات خاک از جمله قلیایی بودن خاک و مصرف بیش از حد کودهای فسفردار تغذیه آهن برای گیاه را تحت تأثیر قرار داده و باعث کاهش فراهمی این عنصر می‌شود (Ronaghi et al., 2002). یکی از راه‌های افزایش قابلیت دسترسی آهن، افزودن مواد آلی یا مشتقات آن‌ها به خاک است. اسیدهای آلی با مکانیسم‌های شیمیایی مانند کاهش pH ریزوسفری و ایجاد کمپلکس‌های فلزی، فراهمی آهن و به طور کلی عناصر ریزمغذی را افزایش می‌دهند. مطالعات زیادی، نقش مثبت اسیدهای آلی در افزایش جذب و دسترس‌پذیری آهن و عناصر ریزمغذی را گزارش کرده اند (Gerke, 2021). برهم‌کنش منفی میان فسفر و برخی عناصر غذایی ضروری گیاه در مطالعات زیادی گزارش شده است. مصرف بی‌رویه کودهای فسفاتی موجب کاهش در جذب، قابلیت دسترسی و انتقال عناصر ریزمغذی، از جمله آهن می‌شود (Ronaghi et al., 2002).

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تأثیر کاربرد اسید هیومیک با آب آبیاری، کود فسفاتی و کود آهن و برهم‌کنش آن‌ها بر غلظت فسفر، آهن، منگنز، روی و مس در گیاه ذرت مورد بررسی قرار گرفت. پژوهش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه انجام شد؛ فاکتورهای آزمایش شامل اسید هیومیک در آب آبیاری، در سه سطح (صفر، ۷۰ و ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم، هفت نوبت با آب آبیاری؛ معادل

شستشو و خشک کردن در آون، توزین انجام شد. هضم به روش خشک‌سوزانی و عصاره‌گیری با اسید کلریدریک دو نرمال انجام شد. غلظت فسفر به روش طیف‌سنجی با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر و غلظت آهن، منگنز، روی و مس با استفاده از دستگاه جذب اتمی، مدل GBC Savant AA، اندازه‌گیری شد. تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS Statistic 26 و مقایسه‌ی میانگین داده‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن، در سطح احتمال پنج درصد، انجام شد.

نتایج

نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر وزن خشک و غلظت عناصر غذایی اندام هوایی (برگ و ساقه) و ریشه گیاه ذرت در **جدول ۲ و ۳**، آمده است. وزن خشک اندام هوایی تحت تأثیر معنی‌دار هر سه فاکتور و نیز برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک و فسفر-آهن قرار گرفت اما ماده خشک تولیدی ریشه فقط تحت تأثیر معنی‌دار فاکتورهای فسفر و اسید هیومیک، برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک و برهم‌کنش هر سه عامل قرار گرفت؛ یعنی اگرچه آهن به‌طور مستقل یا در برهم‌کنش دوگانه با دو فاکتور دیگر بر وزن خشک ریشه اثر معنی‌داری نداشت ولی در برهم‌کنش سه‌گانه با دو فاکتور دیگر، اثرات معنی‌داری بر وزن خشک ریشه داشت. براساس نتایج، در اندام هوایی فاکتورهای فسفر و آهن بر غلظت فسفر، آهن و مس اثر معنی‌دار داشته‌اند در حالی‌که اسید هیومیک بر غلظت هیچ‌کدام از پنج عنصر مورد بررسی در اندام هوایی، تأثیر معنی‌دار نداشت (**جدول ۲**).

صفر، ۴۹۰ و ۹۸۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم طی فصل رشد)، فسفر به صورت مونوکلسیم فسفات، در دو سطح صفر و ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Masood et al., 2021) و آهن به صورت سولفات آهن، در سه سطح (صفر، ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک) بودند. تیمارهای فسفر و آهن به چهار کیلوگرم خاک زیر الک دو میلی‌متر (برخی ویژگی‌های خاک در **جدول ۱** آمده است)، افزوده و به‌خوبی مخلوط و به گلدان‌ها منتقل شد. گلدان‌ها تا ظرفیت زراعی آبیاری و تعداد شش بذر ذرت، رقم سینگل کراس ۷۰۴، ابتدا با قارچ کش و ویتاواکس ضدعفونی و پس از جوانه‌زنی در عمق سه سانتی‌متری خاک هر گلدان کشت و با ماسه‌ی شسته پوشانده شد. پس از سبز شدن و استقرار کامل گیاه، تعداد سه گیاهچه در هر گلدان حفظ و مابقی حذف شدند. پس از تنک کردن بوته‌ها آبیاری به‌صورت یک نوبت آب مقطر و یک نوبت تیمارهای اسید هیومیک، در ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، انجام شد؛ در هر نوبت آبیاری با آب مقطر، رطوبت گلدان‌ها به ظرفیت زراعی رسانده شد که با توزین چند گلدان انجام می‌شد. در طول دوره‌ی رشد نه هفته‌ای، هفت بار تیمارهای اسید هیومیک اعمال گردیدند. با توجه به نتایج تجزیه خاک و نیاز غذایی گیاه، پتاسیم در یک نوبت و نیتروژن مورد نیاز در سه نوبت به صورت محلول به خاک افزوده شد. سایر عناصر غذایی ریزمغذی، غیر از آهن، نیز در ترکیب مشابه محلول هوکلند در چهار نوبت، به صورت آب آبیاری، به خاک گلدان‌ها افزوده شدند. در پایان دوره‌ی رشد حدود دو ماهه، برخی پارامترهای رویشی اندازه‌گیری و برداشت بوته‌ها از ۱/۵ سانتی‌متری سطح خاک انجام و نمونه‌ها به روش متداول شسته و در ۶۵ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت خشک و توزین شدند. چند روز پس از برداشت، استخراج ریشه‌ها از خاک انجام و پس از

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از اعمال تیمارها و کاشت

Table 1- Some of physical and chemical parameters in soil before treatment and planting

ویژگی	مقدار	ویژگی	مقدار
Parameter	Value	Parameter	Value
رطوبت وزنی ظرفیت زراعی	21	فسفر قابل استفاده	3.8
% θ_m , FC		Available P (mg kg ⁻¹)	
شن	70	پتاسیم قابل استفاده	279
Sand (%)		Available K (mg kg ⁻¹)	
سیلت	13	آهن قابل استفاده*	0.81
Silt (%)		Available Fe* (mg kg ⁻¹)	
رس	17	روی قابل استفاده*	0.45
Clay (%)		Available Zn* (mg kg ⁻¹)	
بافت خاک	Sandy loam	منگنز قابل استفاده*	1.37
Soil texture		Available Mn* (mg kg ⁻¹)	
قابلیت هدایت الکتریکی	3.54	مس قابل استفاده*	0.27
EC (dS m ⁻¹)		Available Cu* (mg kg ⁻¹)	
pH	7.9		

*: عصاره‌گیری شده با DTPA

*: Extracted by DTPA

شدند (جدول ۲). در ریشه‌ی گیاه ذرت، اثر فاکتورها و برهم‌کنش بین آن‌ها بر غلظت عناصر غذایی مورد بررسی، متفاوت از اندام هوایی بود که در جدول ۳، قابل مشاهده هستند.

برهم‌کنش سه‌گانه‌ی فاکتورها بر غلظت عناصر غذایی در اندام هوایی، معنی‌دار نبود ولی برهم‌کنش فسفر-اسید هیومیک بر غلظت فسفر و روی و برهم‌کنش فسفر-آهن تنها بر غلظت فسفر معنی‌دار

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس وزن خشک اندام هوایی (گرم بر گلدان)، غلظت عناصر فسفر (درصد) و آهن، منگنز، روی و مس (میلی گرم بر کیلوگرم) در اندام هوایی ذرت

Table 2- Results of analysis of variance of shoots dry matter (g pot⁻¹), P concentration (%), and Fe, Mn, Zn, and Cu concentrations (mg kg⁻¹) in corn shoot

منبع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن خشک اندام هوایی Shoot dry matter	فسفر P	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu
P	1	569.65**	0.074**	2343.90**	12043.6**	12.78 ^{ns}	105.57**
HA	2	41.64**	0.001 ^{ns}	51.83 ^{ns}	612.6 ^{ns}	8.64 ^{ns}	9.30 ^{ns}
Fe	2	9.88*	0.001*	3273.14**	112.4 ^{ns}	1.79 ^{ns}	19.39**
P*HA	2	25.01**	0.002**	727.21 ^{ns}	3.2 ^{ns}	17.79**	9.95 ^{ns}
P*Fe	2	8.35*	0.001*	490.92 ^{ns}	448.1 ^{ns}	2.59 ^{ns}	2.66 ^{ns}
HA*Fe	4	1.87 ^{ns}	0.0003 ^{ns}	353.32 ^{ns}	385.9 ^{ns}	1.40 ^{ns}	3.99 ^{ns}
P*HA*Fe	4	1.26 ^{ns}	0.001 ^{ns}	94.74 ^{ns}	346.2 ^{ns}	1.33 ^{ns}	6.44 ^{ns}
Error خطا	34	1.91	0.0004	244.63	199.8	3.26	3.22
ضریب تغییرات CV (%)		30.2	26.3	17.5	22.9	5.9	12.3

P: فسفر؛ HA: اسید هیومیک؛ Fe: آهن؛ **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪؛ *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪؛ ^{ns}: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ درصد.
P: Phosphorus; HA: Humic Acid; Fe: Iron; *Significant at the 5% level; ** Significant at the 1% level; ns: not Significant at P=0.05.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان)، غلظت عناصر فسفر (درصد) و آهن، منگنز، روی و مس (میلی گرم بر کیلوگرم) در ریشه‌ی ذرت

Table 3- Results of analysis of variance of shoots dry matter (g pot⁻¹), P concentration (%), and Fe, Mn, Zn, and Cu concentrations (mg kg⁻¹) of corn root

منبع تغییرات Sources of variations	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean of squares					
		وزن خشک ریشه Root dry matter	فسفر P	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu
P	1	32.59**	0.0290**	217811.01*	3157.5 ^{ns}	19.69*	101.30*
HA	2	2.94**	0.0010*	56372.47**	7239.1*	5.58 ^{ns}	79.38*
Fe	2	0.59 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	31865.20*	2234.2 ^{ns}	3.03 ^{ns}	46.96 ^{ns}
P*HA	2	2.81**	0.0001 ^{ns}	7761.11 ^{ns}	3603.7 ^{ns}	2.32 ^{ns}	10.96 ^{ns}
P*Fe	2	0.324 ^{ns}	0.0010*	35480.75**	2756.7 ^{ns}	1.10 ^{ns}	23.54 ^{ns}
HA*Fe	4	0.183 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	13781.22 ^{ns}	1512.6 ^{ns}	15.78**	28.97 ^{ns}
P*HA*Fe	4	0.75*	0.0003 ^{ns}	17527.49*	1948.6 ^{ns}	4.62 ^{ns}	31.64 ^{ns}
Error خطا	34	0.27	0.0002	6502.46	1455.2	3.64	23.21
ضریب تغییرات CV (%)		24.4	30.1	25.3	31.2	4.8	22.1

P: فسفر؛ HA: اسید هیومیک؛ Fe: آهن؛ **: معنی‌دار در سطح احتمال ۱٪؛ *: معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪؛ ^{ns}: غیر معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ درصد.
P: Phosphorus; HA: Humic Acid; Fe: Iron; *Significant at the 5% level; ** Significant at the 1% level; ns: not Significant at P=0.05.

وزن خشک

نتایج تجزیه‌ی واریانس اثر معنی‌دار هر سه فاکتور بر وزن خشک اندام هوایی را نشان داد (جدول ۲)؛ اما فقط برهم‌کنش دوگانه‌ی فسفر-اسید هیومیک و فسفر-آهن بر این ویژگی، به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد، معنی‌دار بود. مقایسه‌ی میانگین‌های وزن خشک اندام هوایی برای این برهم‌کنش‌ها در **جدول ۴ و ۵** آمده است. وزن خشک اندام هوایی بدون مصرف فسفر به‌طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای با کاربرد فسفر در تمامی سطوح کاربرد اسید هیومیک بود که به دلیل فقر اولیه فسفر خاک (جدول ۱) بوده است. سطوح مختلف اسید هیومیک بدون کاربرد فسفر نتوانست اختلاف معنی‌داری در میانگین‌های ماده خشک هوایی ایجاد کند در صورتی‌که با بر طرف شدن نیاز فسفر (سطح دوم فسفر)، کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری به‌طور معنی‌داری ماده خشک اندام هوایی را افزایش داد و بیش‌ترین افزایش در سطح ۷۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۱۰۳ درصد افزایش نسبت به شاهد) مشاهده شد و وزن خشک اندام هوایی در سطح ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌طور معنی‌داری نسبت به آن کاهش نشان داد (جدول ۴). کاهش ماده تولیدی (خشک و تر) با افزایش مقدار کاربردی اسید هیومیک یا سایر اسیدهای آلی در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است که می‌تواند به دلیل کاهش پتانسیل اسمزی و اثر شوری باشد؛ اما نتایج پژوهش

آیلاج و همکاران (Aylaj et al., 2023) نشان داد که تأثیر غلظت‌های بالای اسید هیومیک بر ماده‌ی خشک تولیدی بستگی به منبع مواد آلی کمپوست شده برای تهیه‌ی اسید هیومیک دارد و این تأثیر در افزایش غلظت اسید هیومیک استخراج شده از منابع مختلف، از صفر به ۰/۱ و یک گرم بر لیتر (تزیق ۱۰ میلی‌لیتر نزدیک ریشه، معادل ۲/۸ متر مکعب بر هکتار)، در گیاه منداب، متفاوت بود به‌طوری‌که در مواردی، موجب افزایش یا برعکس کاهش وزن خشک ریشه شده بود. همانند اسید هیومیک، سطوح مختلف آهن نیز بدون مصرف فسفر، اثر معنی‌داری بر وزن خشک اندام هوایی نداشتند اما در سطح ۲ (کاربرد) فسفر، سطوح ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم، وزن خشک را به‌طور معنی‌داری افزایش دادند (جدول ۵). افزایش وزن خشک هوایی در سطح ۳ آهن نسبت به سطح ۲، معنی‌دار نبود. بیش‌ترین مقدار وزن خشک اندام هوایی در سطح ۲ فسفر و سطح ۳ آهن مشاهده گردید که نسبت به شاهد ۷۸ درصد افزایش داشت.

وزن خشک ریشه تحت تأثیر معنی‌دار فاکتور آهن و برهم‌کنش دوگانه‌ی آن با دو فاکتور دیگر، قرار نگرفت ولی بر هم‌کنش سه گانه ی فسفر-اسید هیومیک-آهن معنی‌دار شد که مقایسه میانگین‌ها در **جدول ۶** آمده است. در سطح ۱ فسفر هیچ اختلاف معنی‌داری بین تیمارهای نه‌گانه‌ی با سطح متفاوت آهن و اسید هیومیک وجود نداشت.

جدول ۴- مقایسه‌ی میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر و اسید هیومیک

Table 4- Mean comparison of corn shoot dry matter (g pot⁻¹) in different levels of phosphorus and humic acid

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertigation)			میانگین Mean
	0	70	140	
0	9.38 ^d	10.05 ^d	9.46 ^d	9.65 ^B
50	13.85 ^c	19.02 ^a	15.80 ^b	16.32 ^A
میانگین Mean	11.62 ^C	14.28 ^A	12.82 ^A	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ۵- مقایسه‌ی میانگین وزن خشک اندام هوایی ذرت (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر و آهن

Table 5- Mean comparison of corn shoot dry matter (g pot⁻¹) in different levels of phosphorus and Fe (iron)

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soil)			میانگین Mean
	0	10	20	
0	9.61 ^c	9.55 ^c	9.75 ^c	9.65 ^B
50	14.76 ^b	16.60 ^{ab}	17.11 ^a	16.32 ^A
میانگین Mean	12.18 ^B	13.28 ^A	13.21 ^A	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ۶- مقایسه‌ی میانگین‌های وزن خشک ریشه (گرم بر گلدان) در سطوح مختلف فسفر، اسید هیومیک، آهن
 Table 6- Mean comparison of corn root dry matter (g pot⁻¹) in different levels of phosphorus, humic acid, and Fe (iron)

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertilization)	آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soil)			میانگین Mean
		0	10	20	
0	0	3.28 ^h	3.58 ^{gh}	3.72 ^{fgh}	3.53 ^C
	70	3.48 ^{gh}	3.56 ^{fgh}	3.48 ^{gh}	3.51 ^C
	140	3.28 ^h	4.10 ^{e-h}	3.58 ^{fgh}	3.60 ^C
50	0	4.33 ^{d-g}	4.55 ^{c-f}	3.94 ^{e-h}	4.27 ^B
	70	5.32 ^{bc}	5.79 ^{ab}	6.47 ^a	5.78 ^A
	140	5.28 ^{bcd}	4.81 ^{cde}	5.96 ^{ab}	5.35 ^A
میانگین*		4.16	4.41	4.42	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

میانگین‌ها نشان داد که آهن نیز همانند اسید هیومیک توانسته است غلظت فسفر اندام هوایی را بدون کاربرد فسفر تحت تأثیر قرار دهد ولی با کاربرد فسفر، کاربرد ۱۰ میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌داری غلظت فسفر در اندام هوایی شد ولی اختلاف میانگین غلظت فسفر اندام هوایی در سطح ۳ آن با سطح ۱، معنی‌دار نبود (جدول ۸)؛ از طرفی با افزایش سطح کاربرد آهن از ۱۰ به ۲۰ میلی گرم آهن بر کیلوگرم خاک (سطح ۳)، غلظت فسفر اندام هوایی به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد کاربرد اسید هیومیک، در افزایش فراهمی فسفر اولیه خاک، تأثیر مثبتی نداشته است در حالی که در افزایش راندمان جذب فسفر اضافه شده به خاک اثر مثبت معنی‌دار داشته‌است. مواد هیومیکی در تعامل با فسفر ممکن است تثبیت فسفر یا انرژی جذب سطحی آن را کاهش داده و موجب افزایش فراهمی فسفر برای گیاه شوند (Hua et al., 2008). کاربرد اسید هیومیک در خاک می‌تواند با افزایش فعالیت فسفات در محلول خاک، کارایی کود فسفر را در خاک‌های آهکی افزایش دهد (Fixen et al., 1983). نقش اسید هیومیک در افزایش دسترسی فسفر و همچنین به عنوان محرک رشد گیاه، در مطالعات زیادی گزارش شده‌است (Ertani et al., 2013; Jindo et al., 2012).

غلظت فسفر ریشه، تحت تأثیر معنی‌دار فاکتور فسفر، اسید هیومیک و برهم‌کنش دوگانه‌ی فسفر-آهن قرار گرفت (جدول ۲). با کاربرد ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر ریشه از ۰/۰۷۲ درصد به ۰/۱۲ درصد رسید که حدود ۶۷ درصد افزایش معنی‌دار نشان داد. اسید هیومیک بر غلظت فسفر ریشه تأثیر معنی‌دار داشت و کاربرد سطح ۳ اسید هیومیک، موجب افزایش معنی‌دار غلظت فسفر ریشه ذرت نسبت به سطح ۱ آن (عدم کاربرد) شد، اما میانگین غلظت فسفر ریشه در سطح ۲ و سطح ۳ اسید هیومیک، اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۱).

در حالی که با کاربرد فسفر (سطح ۲)، اختلافات معنی‌دار بین میانگین‌ها مشاهده شد به‌طوری که در سطح ۲ آهن، با مصرف اسید هیومیک، وزن خشک ریشه افزایش معنی‌دار نشان داد و بیش‌ترین وزن خشک ریشه نیز با کاربرد فسفر در سطح ۲ اسید هیومیک و سطح ۳ آهن بود که حدود دو برابر شاهد بود؛ از طرفی با کاربرد فسفر و بدون مصرف هیومیک اسید، اختلاف معنی‌داری بین میانگین‌های سه سطح آهن وجود نداشت. افزایش وزن ماده خشک تولیدی با کاربرد مواد هیومیکی می‌تواند به دلیل تولید محرک‌های رشد شبه اکسین باشد که موجب افزایش فعالیت‌های بیوشیمیایی گیاه می‌شوند (Jindo et al., 2012). کاربرد آهن نیز در سطح ۱ و سطح ۳ اسید هیومیک همراه با کاربرد ۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌دار وزن خشک ریشه شد درحالی که در سطح ۲ اسید هیومیک، سطح ۲ آهن افزایش معنی‌دار و سطح ۳ آهن کاهش معنی‌دار وزن خشک ریشه را در پی داشتند (جدول ۶).

غلظت فسفر

با توجه به نتایج تجزیه واریانس، مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی در برهم‌کنش‌های فسفر-آهن و فسفر-اسید هیومیک، انجام شد. افزایش معنی‌دار غلظت فسفر اندام هوایی با مصرف خاکی این عنصر در تمامی سطوح آهن و اسید هیومیک مشاهده شد. در سطح ۱ فسفر (عدم مصرف)، هیچ اختلاف معنی‌داری بین غلظت‌های فسفر در سطوح مختلف اسید هیومیک و همچنین در سطوح مختلف آهن مشاهده نگردید اما در سطح ۲ (۵۰ میلی گرم فسفر بر کیلوگرم خاک)، اثرات معنی‌دار سطوح آهن و اسید هیومیک دیده شد (جداول ۷ و ۸). غلظت فسفر اندام هوایی با کاربرد فسفر، در سطوح مختلف اسید هیومیک افزایش معنی‌دار نشان داد ولی اختلاف معنی‌داری بین سطح ۲ و سطح ۳ آن وجود نداشت (جدول ۷). مقایسه‌ی

جدول ۷- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و اسید هیومیک

Table 7- Mean comparison of P concentration (%) in shoots of corn as affected by the interaction of phosphorus and humic acid levels

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertigation)			میانگین Mean
	0	70	140	
0	0.134 ^c	0.138 ^c	0.126 ^c	0.132 ^B
50	0.191 ^b	0.212 ^{ab}	0.225 ^a	0.208 ^A
میانگین*	0.163	0.173	0.178	
Mean*				

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

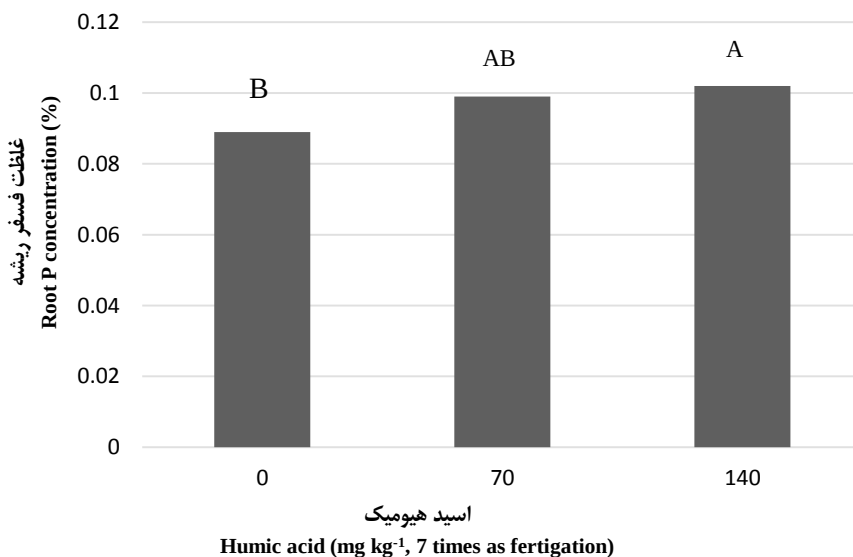
جدول ۸- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر اندام هوایی ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و آهن

Table 8- Mean comparison of P concentration (%) in shoots of corn as affected by the interaction of phosphorus and Fe levels

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soil)			میانگین Mean
	0	10	20	
0	0.126 ^c	0.133 ^c	0.139 ^c	0.132 ^B
50	0.196 ^b	0.227 ^a	0.193 ^b	0.208 ^A
میانگین	0.161 ^B	0.170 ^B	0.183 ^A	
Mean				

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.



شکل ۱- تأثیر اسید هیومیک بر غلظت فسفر ریشه‌ی گیاه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 1- Effect of humic acid on phosphorus concentration of corn root

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level./

جدول ۹- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت فسفر ریشه ذرت (درصد) تحت تأثیر برهم‌کنش فسفر و آهن

Table 9- Mean comparison of P concentration (%) in corn root as affected by interaction of phosphorus and Fe levels

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soi)			میانگین Mean
	0	10	20	
0	0.074 ^{bc}	0.079 ^b	0.063 ^c	0.072 ^B
50	0.115 ^a	0.119 ^a	0.127 ^a	0.120 ^A
میانگین*	0.095	0.100	0.094	
Mean*				

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم هستند، تفاوت معنی‌داری، یا آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters with the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.0 level.

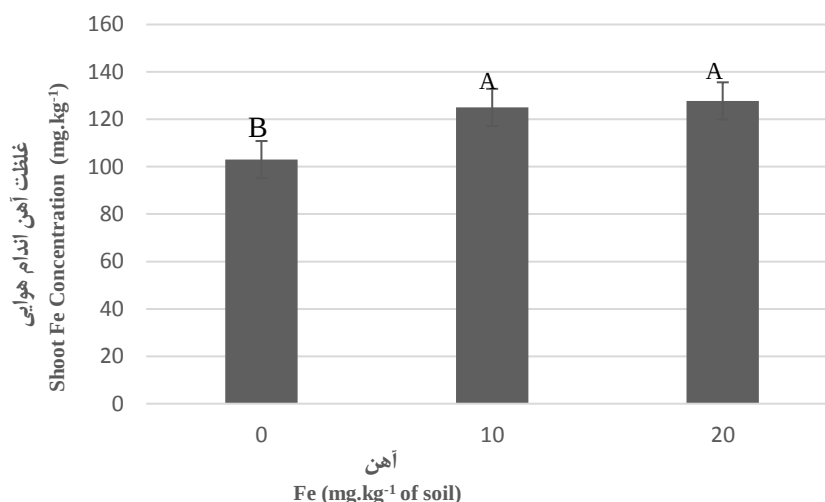
*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

مقایسه‌ی میانگین غلظت فسفر ریشه در برهم‌کنش فسفر-آهن (جدول ۹)، نشان داد که با کاربرد ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک بدون مصرف فسفر، مقدار غلظت فسفر ریشه به‌طور معنی‌داری، نسبت به سطح ۱۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، کاهش یافته است درحالی‌که با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر بر کیلوگرم خاک، غلظت فسفر در تمام سطوح آهن افزایش معنی‌دار نشان داد ولی بین سطوح مختلف آهن کاربردی، اختلاف معنی‌داری دیده نشد. نتایج حاکی از آن است که در شرایط فقر فسفر خاک، افزودن کودهای معدنی آهن به خاک می‌تواند موجب کاهش فراهمی و جذب فسفر شود. این رفتار آنتاگونیستی آهن و فسفر در خاک می‌تواند به دلیل تشکیل و رسوب فسفات‌های آهن باشد.

غلظت آهن

براساس نتایج تجزیه واریانس، غلظت آهن اندام هوایی تنها تحت تأثیر فاکتورهای فسفر و آهن، در سطح یک درصد، قرار گرفت ولی کاربرد اسید هیومیک در آب آبیاری اثر معنی‌داری بر غلظت آهن اندام هوایی نداشت (جدول ۲)؛ همچنین برهم‌کنش‌های دوگانه و سه‌گانه‌ی سه فاکتور نیز بر این ویژگی از نظر آماری معنی‌دار نشد. با کاربرد فسفر، غلظت آهن اندام هوایی از ۱۱۲ به ۱۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم افزایش معنی‌دار یافت که ۱۲ درصد نسبت به تیمارهای بدون فسفر بیش‌تر بود؛ این افزایش می‌تواند نتیجه‌ی بهبود وضعیت تغذیه‌ی گیاه با توجه به فقر فسفر خاک باشد. این درحالی‌ست که در شرایط فراهمی فسفر خاک، انتظار می‌رود مصرف کودهای فسفاتی باعث کاهش فراهمی و جذب آهن شوند. مقایسه‌ی میانگین‌ها نشان داد که کاربرد ۱۰ و ۲۰ میلی‌گرم آهن بر کیلوگرم خاک، موجب افزایش معنی‌دار غلظت آهن اندام هوایی، نسبت به سطح عدم کاربرد آهن، گردیده است اما میانگین‌های این دو سطح اختلاف معنی‌داری نداشتند (شکل ۲).

برهم‌کنش منفی بین فسفر و عناصر غذایی ریزمغذی آهن و روی در پژوهش‌های زیادی گزارش شده‌است که می‌تواند به دلیل کاهش جذب این عناصر و کاهش انتقال آن‌ها درون گیاه باشد (Ronaghi et al., 2002; Sarhadi-Sardoui et al., 2003). در پژوهشی دیگر، بررسی تأثیر کاربرد فسفر و آهن بر غلظت آهن در اندام هوایی ذرت نشان داد که غلظت آهن اندام هوایی با کاربرد آهن افزایش و با کاربرد فسفر کاهش می‌یابد (Chakrol-Hosseini, 1999). نتایج پژوهش حاضر که در شرایط کمبود فسفر خاک (فسفر قابل استفاده‌ی کمتر از چهار میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک؛ جدول ۱) انجام شده، نشان داد که رفع کمبود فسفر و بهبود تغذیه گیاه می‌تواند منجر به افزایش غلظت آهن گیاه گردد؛ تغییرات غلظت آهن ریشه به مصرف فسفر نیز روند مشابهی داشت. غلظت آهن ریشه در مقایسه با اندام هوایی علاوه بر اثرات معنی‌دار دو فاکتور فسفر و آهن، به‌طور معنی‌داری متأثر از فاکتور اسید هیومیک نیز شد. همچنین اثرات متقابل سه فاکتور و بر هم‌کنش دوگانه‌ی فسفر و آهن معنی‌دار شدند (جدول ۳). با توجه به برهم‌کنش سه‌گانه‌ی معنی‌دار فاکتورها، مقایسه‌ی میانگین‌ها با آزمون دانکن (در سطح پنج درصد) انجام گردید (جدول ۱۰). در سطح ۱ فسفر (عدم کاربرد آن) برخلاف افزایش‌های مشاهده شده در غلظت آهن هم‌زمان با افزایش سطوح اسید هیومیک و آهن، هیچ‌کدام از میانگین‌های نه‌گانه، اختلاف معنی‌داری از نظر آماری نداشتند ولی با مصرف کود فسفر (سطح ۲ فسفر)، در تمامی سطوح آهن، با افزایش مقدار مصرف اسید هیومیک، غلظت آهن ریشه افزایش یافت که تنها در سطح ۳ آهن، این افزایش‌ها معنی‌دار بود. بیش‌ترین غلظت آهن ریشه در تیمار بالاترین سطح هرکدام از فاکتورها، مشاهده گردید که حدود ۱۱۰ درصد بیش از شاهد بود. اثر افزایشی مصرف آهن نیز در سطح ۱ اسید هیومیک معنی‌دار نبود ولی با کاربرد فسفر (سطح ۲) و اسید هیومیک (سطح ۲ و سطح ۳) کاربرد ۲۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک موجب افزایش معنی‌دار آهن ریشه نسبت به دو سطح دیگر شد (جدول ۱۰). افزایش غلظت آهن در گیاه در حضور اسید هیومیک ممکن است به دلیل تشکیل کمپلکس‌های آلی آهن در خاک و افزایش فراهمی زیستی آن باشد.



شکل ۲- تأثیر کاربرد آهن بر غلظت آهن اندام هوایی ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 2- Effect of Fe (iron) on Fe concentration of corn shoot

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

جدول ۱۰- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت آهن ریشه (میلی گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف فسفر، اسید هیومیک، آهن

Table 10- Mean comparison of corn roots Fe concentration (mg kg⁻¹), in different levels of phosphorus, humic acid, and Fe (iron)

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertigation)			میانگین Mean
		0	70	140	
0	0	380.25 ^d	411.98 ^d	477.59 ^{cd}	423.3 ^B
	10	391.34 ^d	472.86 ^{cd}	480.15 ^{cd}	444.1 ^B
	20	384.49 ^d	488.16 ^{cd}	406.69 ^d	426.4 ^B
50	0	498.26 ^{cd}	481.31 ^{cd}	508.02 ^{cd}	495.9 ^B
	10	493.76 ^{cd}	499.54 ^{cd}	599.17 ^{bc}	530.8 ^B
	20	458.82 ^{cd}	734.97 ^{ab}	794.16 ^a	653.6 ^A
میانگین Mean		434.5 ^B	501.9 ^A	548.1 ^A	

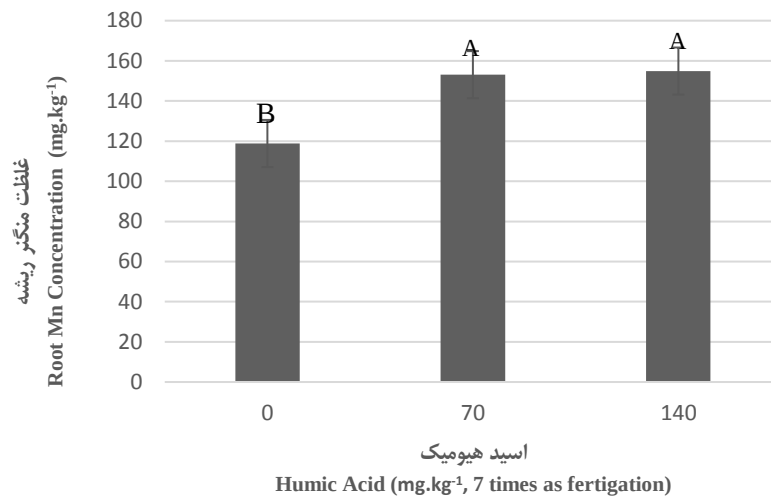
میانگین‌های دارای حروف مشترک هم‌فونت و هم‌قلم، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Means followed by the same letters in the same style, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

غلظت منگنز

هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، غلظت منگنز ریشه نسبت به سطح عدم کاربرد آن، افزایش معنی‌داری پیدا کرد، البته این دو سطح اختلاف معنی‌داری در غلظت منگنز ریشه نداشتند. تأثیر مثبت اسید هیومیک بر جذب و قابلیت دسترسی عناصر ریزمغذی از جمله منگنز در مطالعات بسیاری گزارش شده است. استفاده از اسید هیومیک باعث افزایش رشد رویشی گیاه می‌شود که یکی از دلایل آن افزایش جذب عناصر غذایی است (Harper et al., 2000). اسید هیومیک با وزن مولکولی ۳۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ دالتون، توانایی ایجاد کمپلکس‌های محلول با عناصر ریزمغذی را دارد (Michael, 2001).

براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، اثر فسفر بر غلظت منگنز اندام هوایی ذرت، در سطح یک درصد آماری، معنی‌دار بود؛ غلظت منگنز اندام هوایی با مصرف فسفر از ۸۸ به ۱۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم (۴۲ درصد) افزایش معنی‌دار نشان داد. اثر سایر فاکتورها و نیز برهم‌کنش بین آن‌ها بر منگنز اندام هوایی معنی‌دار نشد. با توجه به نتایج تجزیه‌ی واریانس، غلظت منگنز ریشه نیز تنها تأثیر معنی‌دار اسید هیومیک را در سطح پنج درصد، نشان داد و هیچ‌کدام از دیگر فاکتورها یا برهم‌کنش بین آن‌ها، بر غلظت منگنز ریشه معنی‌دار نبودند (جدول ۳). مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت منگنز ریشه در سطوح مختلف اسید هیومیک (شکل ۳) نشان داد که با کاربرد ۷۰ و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید



شکل ۳- تأثیر اسید هیومیک بر غلظت منگنز ریشه‌ی گیاه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 3- Effect of humic acid on Mn concentration of corn root
Means with the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level

در بافت گیاهی شود، همچنین اثرات متقابل منفی ناشی از روابط آنتاگونیسمی بین فسفر و روی در خاک، همواره مورد تأیید پژوهشگران بوده است (Sumner & Farina, 1986). به نظر می‌رسد که در غلظت بالای فسفر، انتقال دهنده‌های روی در گیاه غیرفعال شده و ساخت آنزیم‌هایی که روی در آن دخالت دارد، متوقف می‌شود (Sekhon, 1994)، درحالی‌که در این پژوهش با کاربرد ۵۰ میلی‌گرم فسفر در کیلوگرم خاک، کاهش در غلظت روی اندام هوایی مشاهده نگردید؛ این نتیجه با توجه به فقر فسفر خاک و عدم مشاهده‌ی غلظت‌های بسیار بالای فسفر در بافت‌های گیاهی در این سطح، قابل توجیه است.

غلظت روی

براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس تأثیر هیچ‌کدام از فاکتورها به‌طور مستقل، بر غلظت روی اندام هوایی معنی‌دار نشد و تنها، برهم‌کنش فسفر و اسید هیومیک در سطح یک درصد آماری بر آن تأثیر معنی‌دار داشت (جدول ۲). براساس نتایج مقایسه میانگین، مقدار غلظت روی اندام هوایی در تیمارهای بدون کاربرد فسفر و ۱۴۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، به‌طور معنی‌داری بیش‌تر از سایرین بود هیچ‌کدام از دیگر میانگین‌ها اختلاف معنی‌داری نشان ندادند (جدول ۱۱). غلظت بالای فسفر در خاک می‌تواند سبب کاهش روی

جدول ۱۱- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت روی اندام هوایی ذرت (میلی‌گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف فسفر و اسید هیومیک

Table 11- Mean comparison of Zn concentration (mg kg⁻¹) in corn shoot as affected by different phosphorus and humic acid levels

فسفر Phosphorus (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertigation)			میانگین* Mean*
	0	70	140	
0	32.49 ^b	33.06 ^b	35.52 ^a	33.7
50	33.54 ^b	32.07 ^b	32.45 ^b	32.7
میانگین* Mean*	33.0	32.6	33.9	

میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means with the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

اثر معنی‌داری نداشت هیچ برهم‌کنش معنی‌داری نیز بر این ویژگی مشاهده نشد (جدول ۲). غلظت مس ریشه نیز تنها تحت تأثیر معنی‌دار فسفر و اسید هیومیک قرار گرفت و اثر آهن و برهم‌کنش‌ها معنی‌دار نبودند (جدول ۳). غلظت مس اندام هوایی در سطح ۲ فسفر نسبت به سطح ۱، عدم کاربرد فسفر، ۱۵ درصد افزایش داشت این افزایش می‌تواند به دلیل بهبود تغذیه گیاه، رفع کمبود فسفر و توسعه‌ی مناسب ریشه در خاک که در این پژوهش نیز افزایش وزن خشک ریشه حاکی از آن بود، باشد. با افزایش مقدار کاربرد آهن، غلظت مس اندام هوایی ذرت کاهش یافت ولی این کاهش فقط در سطح ۲۰ میلی گرم آهن در کیلوگرم خاک، آن هم فقط نسبت به شاهد (سطح ۱)، معنی‌دار بود (شکل ۴). برهم‌کنش منفی آهن و مس در دیگر پژوهش‌ها گزارش شده‌است. فاجریا (Fageriya, 2011) گزارش کرد که غلظت کلسیم، منیزیم و آهن در گیاه برنج، با کاربرد مس کاهش معنی‌داری داشت. همچنین اوزونیدو و همکاران (Ouzounidou et al., 1995)، کاهش معنی‌دار غلظت آهن با کاربرد کود مس را گزارش کرده‌اند.

غلظت مس در ریشه، همانند اندام هوایی، با کاربرد فسفر افزایش معنی‌دار یافت که حدود ۱۲ درصد بود (شکل ۵). کاربرد اسید هیومیک نیز غلظت مس ریشه را افزایش معنی‌دار داد که این افزایش در سطح ۷۰ و ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، به ترتیب ۱۸ و ۱۲ درصد بود، البته بین کاربرد ۷۰ و ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی‌داری از این جهت مشاهده نشد (شکل ۵). در مورد غلظت مس بافت‌های گیاهی (اندام هوایی و ریشه)، هیچ برهم‌کنش معنی‌داری بین سه فاکتور مورد بررسی در این پژوهش، مشاهده نگردید.

اثر فسفر بر غلظت روی ریشه معنی‌دار شد به طوری که میانگین غلظت روی ریشه با کاربرد ۵۰ میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک از ۴۵/۹ به ۴۷/۱ میلی گرم بر کیلوگرم افزایش داشت. برهم‌کنش اسید هیومیک و آهن نیز بر غلظت روی ریشه معنی‌دار شد. بررسی برهم‌کنش آهن و اسید هیومیک نشان داد که افزایش سطح آهن به ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک بدون کاربرد اسید هیومیک، موجب کاهش معنی‌دار غلظت روی ریشه شد (جدول ۱۲)، از آنجایی که این کاهش غلظت در اندام هوایی رخ نداد می‌توان گفت اثر تنازعی آهن و روی در گیاه ذرت و انتقال آن به اندام هوایی، معنی‌دار نبوده و کاهش روی در ریشه، به رقابت این دو عنصر در جذب از خاک و رفتار آنتاگونیستی آن‌ها در تشکیل کمپلکس‌های محلول در خاک و جذب توسط گیاه، برمی‌گردد. با کاربرد اسید هیومیک (سطح ۲ و ۳)، اثر کاهشی آهن بر غلظت روی ریشه، معنی‌دار نگردید این بدان معناست که احتمالاً اسید هیومیک توانسته است با ایجاد کمپلکس‌های محلول، فراهمی هر دو عنصر را افزایش دهد. نظامی و ملکوتی (Nezami & Malakouti, 2016) نیز گزارش کردند که مصرف اسیدهای آلی با غلظت ۱۰ میلی مولار، در خاک‌های آهکی با افزایش جذب فسفر و روی، توانست نیاز گیاه را برطرف کند. اسیدهای آلی با کاهش pH ناحیه ریزوسفرو و ایجاد کمپلکس با عنصر روی، در افزایش فراهمی این عنصر برای گیاه نقش دارند (Hoffland et al., 2006).

غلظت مس

براساس نتایج تجزیه واریانس، غلظت مس در اندام هوایی ذرت تنها تحت تأثیر معنی‌دار فسفر و آهن قرار گرفت و اسید هیومیک بر آن

جدول ۱۲- مقایسه‌ی میانگین‌های غلظت روی ریشه ذرت (میلی گرم بر کیلوگرم) در سطوح مختلف آهن و اسید هیومیک
Table 12- Mean comparison of Zn concentration of corn root (mg kg⁻¹) in different levels of Fe and humic acid

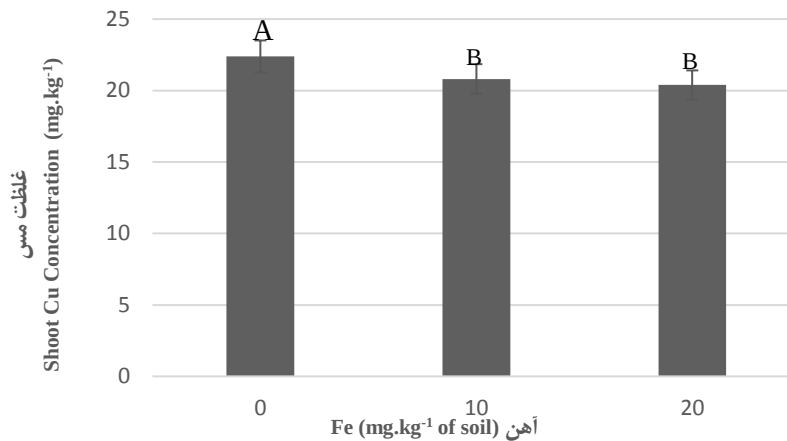
آهن Fe (mg kg ⁻¹ of soil)	اسید هیومیک Humic Acid (mg kg ⁻¹ , 7 times as fertigation)			میانگین* Mean*
	0	70	140	
0	47.1 ^a	45.9 ^{ab}	46.7 ^a	46.6
10	47.2 ^a	47.4 ^a	46.2 ^a	47.0
20	43.7 ^b	46.0 ^{ab}	48.4 ^a	46.0
میانگین* Mean*	46.0	46.4	47.2	

میانگین‌های دارای حروف مشترک، تفاوت معنی‌داری، با آزمون دانکن در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

*: مقایسه‌ی میانگین، به دلیل معنی‌دار نبودن اثر اصلی عامل براساس نتایج تجزیه‌ی واریانس، انجام نشد.

Means followed by the same letters, are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level.

*: Mean comparison was not done since the main effect of the factor was not significant according to the ANOVA results.

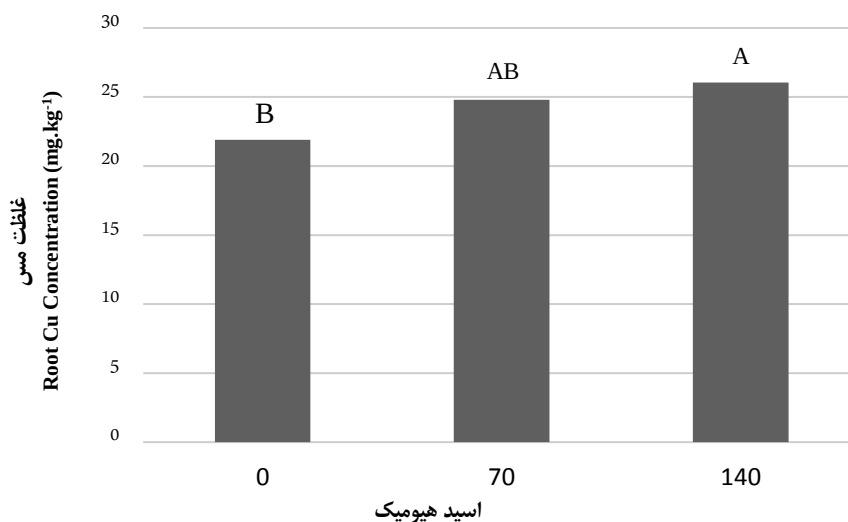


شکل ۴- تأثیر کاربرد آهن بر غلظت مس اندام هوایی ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 4- Effect of Fe on Cu concentration of corn shoot

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level



شکل ۵- تأثیر کاربرد اسید هیومیک بر غلظت مس ریشه ذرت

میانگین‌های دارای حروف مشترک تفاوت معنی‌داری با آزمون دانکن، در سطح پنج درصد آماری، ندارند.

Figure 5- Effect of humic acid on Cu concentration of corn root

Means with the same letters are not significantly different by Duncan's test at the 0.05 level

نتیجه‌گیری

چهار میلی گرم بر کیلوگرم، اسید هیومیک نتوانست باعث افزایش جذب و فراهمی فسفر خاک شود. در حضور اسید هیومیک اثرات تنازعی بین آهن و روی کاهش یافت. با توجه به داده‌های وزن خشک اندام هوایی و کاهش آن با افزایش مصرف اسید هیومیک از ۷۰ به ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم در هفت نوبت با آب آبیاری و نیز عدم افزایش معنی‌دار غلظت اغلب عناصر غذایی مورد مطالعه در این سطح، غلظت ۷۰ میلی گرم بر کیلوگرم اسید هیومیک در هفت نوبت با آب آبیاری، مطلوب بوده است. بر اساس نتایج این پژوهش برهم‌کنش سه‌گانه‌ی اسید

به‌طور کلی کاربرد اسید هیومیک بر رشد گیاه و ماده خشک تولیدی اثر مثبت داشت و با افزایش غلظت عناصر غذایی مورد مطالعه، اثرات مثبت و مطلوبی بر تغذیه‌ی معدنی گیاه ذرت نشان داد. نتایج این پژوهش نشان داد که برخلاف تأثیر مثبت اسید هیومیک بر افزایش جذب و بازدهی کود فسفاتی، در تیمارهایی که کود فسفاتی به کار نرفته و خاک از نظر فسفر فقیر بود (فسفر اولیه قابل استفاده‌ی خاک حدود

هیومیک، منوکلسیم فسفات و سولفات آهن بر غلظت آهن اندام هوایی
 نشد. به نظر می‌رسد برای بررسی این موضوع باید سطوح بیشتری از
 معنی‌دار نبود و در نتیجه تغییرپذیری اثرات تنازعی فسفر و آهن دیده
 فسفر همراه با سطوح آهن، به کار برده شود.

References

- Arjumend, T., Abbasi, M. K., & Rafique, E. (2015). Effects of lignite-derived humic acid on some selected soil properties, growth and nutrient uptake of wheat (*triticum aestivum* L.) grown under greenhouse conditions. *Pakistan Journal of Botany*, 47(6), 2231-2238.
- Aylaj, M., Sisouane, M., Tahiri, S., Mouchrif, Y., & El Krati, M. (2023). Effects of humic acid extracted from organic waste composts on Turnip culture (*Brassica rapa* subsp. *rapa*) in a sandy soil. *Journal of Ecological Engineering*, 24(7), 345-359. <https://doi.org/10.12911/22998993/163510>
- Cavani, L., Ciavatta, C., & Gessa, C. (2003). Identification of organic matter from peat, leonardite and lignite fertilizers using humification parameters and electrofocusing. *Bioresource Technology*, 86, 45-52. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00107-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00107-4)
- Chaji, N., Khorassani, R., Astaraei, A., & Lakzian, A. (2013). Effect of phosphorous and nitrogen on vegetative growth and production of daughter corms of saffron. *Journal of Saffron Research*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.22077/jsr.2013.352>
- Chakerol-hosseini, M. (1999). *Effect of phosphorus and iron on growth and chemical composition of corn and soybean*. M.Sc. Thesis, College of Agriculture, Shiraz University, Iran. (In Persian with English abstract)
- Ertani, A., Pizzeghello, D., Francioso, O., Muscolo, A., & Nardi, S. (2013). Isopentenyladenosine and cytokininlike activity of different humic substances. *Journal of Geochemical Exploration*, 129, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.007>
- Fageria N.K., Baligar, V.C., & Jones, C.A. (2011). *Growth and mineral nutrition of field crops (3rd Ed.)*. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York.
- FAO, IFAD, & WFP. (2015). *The state of food Insecurity in the world 2015*. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Rome, FAO. <https://doi.org/10.3945/an.115.009936>
- Fixen, P.E., Ludwick, A.E., & Olsen, S.R. (1983). Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils: II. Soil phosphorus solubility relationships. *Soil Science Society of American Journal*, 47, 112-117. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700010023x>
- Gerke, J. (2021). The effect of humic substances on phosphate and iron acquisition by higher plants: Qualitative and quantitative aspects. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 184(3), 329-338. <https://doi.org/10.1002/jpln.202000525>
- Ghorbani, S.H., Khazaei, R., Kaafi, M., & Banayan, A. (2010). Effect of humic acid application in irrigation water on yield and yield components of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Agricultural Ecology*, 2, 123-131. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jag.v2i1.7608>
- Harper, S.M., Kerven, G.L., Edwards, D.G., & Ostatek-Boczynski, Z. (2000). Characterisation of fulvic and humic acids from leaves of *Eucalyptus camaldulensis* and from decomposed hay. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(10), 1331-1336. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00021-3)
- Hoffland, E., Wei, C., & Wissuwa, M. (2006). Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency. *Plant and Soil*, 283, 155-162. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3937-1>
- Holford, I.C.R. (1997). Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Soil Australian Journal of Soil Research*, 35(2), 227-240. <https://doi.org/10.1071/S96047>
- Hosseini, S., & Abedi, S. (2007). Assess the role of markets and government policies in determining the price of corn. *Agricultural Economics*, 1, 21-34. (In Persian)
- Hua, Q.X., Li, J.Y., Zhou, J.M., Wang, H.Y., Du, C.W., & Chen, X.Q. (2008). Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. *Pedosphere*, 18, 533-538. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60044-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60044-2)
- Jindo, K., Martim, S.A., Navarro, E.C., Pérez-Alfocea, F., Hernandez, T., Garcia, C., Aguiar, N.O., & Canellas, L.P. (2012). Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes. *Plant and Soil*, 353, 209-220. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-1024-3>
- Jing, J., Zhang, S., Yuan, L., Li, Y., Lin, Z., Xiong, Q., & Zhao, B. (2020). Combining humic acid with phosphate fertilizer affects humic acid structure and its stimulating efficacy on the growth and nutrient uptake of maize seedlings. *Scientific Reports*, 10(1), 17502. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-74349-6>
- Keating, B.A., & Carberry, P.S. (2010). Sustainable production, food security and supply chain implications. *Aspects of Applied Biology*, 102, 7-20.
- Keating, B.A., Herrero, M., Carberry, P.S., Gardner, J., & Cole, M.B. (2014). Food wedges: Framing the global food demand and supply challenge towards 2050. *Global Food Security*, 3(3-4), 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2014.08.004>
- Li, Q., Wu, L., Chen, J., Khan, M. A., Luo, X., & Lin, W. (2016). Biochemical and microbial properties of

- rhizospheres under maize/peanut intercropping. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(1), 101-110. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(15\)61089-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(15)61089-9)
22. Li, X., Geng, H., Zhang, L., Peng, S., Xin, Q., Huang, J., & Wang, Y. (2022). Improving maize yield prediction at the county level from 2002 to 2015 in China using a novel deep learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107356. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107356>
23. Lindsay, W.L. (1979). *Chemical Equilibria in Soils*. Wiley-Interscience, New York.
24. Masood, T., Gul, R., Munsif, F., Jalal, F., Hussain, Z., Noreen, N., & Khan, H. (2021). Effect of different phosphorus levels on the yield and yield components of maize. *Sarhad Journal of Agriculture*, 27(2), 167-170. <https://www.researchgate.net/publication/268011160>
25. Michael, H.B., & Lua, H. (2001). Influence of humic acid on the growth of tomato in hydroponic systems. *Acta Horticulturae*, 548, 451-458. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.548.53>
27. Nezami, S., & Malakouti, M.J. (2016). The role of organic acids on the release of phosphorus and zinc in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 30(3), 805-816. <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i3.40469>
28. Oktem, A.G., & Oktem, A. (2020). Effect of Humic acid application methods on yield and some yield characteristics of corn plant (*Zea mays* L. indentata). *Journal of Applied Life Sciences International*, 23(11), 31-37. <https://doi.org/10.9734/jalsi/2020/v23i1130196>
29. Ouzounidou, G., Čiamporová, M., Moustakas, M., & Karataglis, S. (1995). Responses of maize (*Zea mays* L.) plants to copper stress—I. Growth, mineral content and ultrastructure of roots. *Environmental and Experimental Botany*, 35(2), 167-176. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(94\)00049-B](https://doi.org/10.1016/0098-8472(94)00049-B)
30. Ronaghi, A., Chakrol-hosseini, M., & Karimian, N. (2002). Growth and chemical composition of corn as affected by phosphorus and iron. *Journal of Science and Technology of Agricultural and Natural Resources*, 6, 91-102. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.22518517.1381.6.2.8.2>
31. Sarhadi-Sardoui, J., Ronaghashi, A., Maftoun, M., & Karimian, N. (2003). Growth and chemical composition of corn in three calcareous sandy soil of Iran as affected by applied phosphorus and manure. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 5, 77-84. <https://doi.org/20.1001.1.16807073.2003.5.1.4.1>
32. Sekhon, G.S. (1994). Management of nutrient interactions in agriculture. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 42(1), 167-167.
33. Subhash, C., Malik A., Zargar, M.Y., & Bhat, M.A. (2011). Nitrate pollution: a menace to human, soil, water and plant. *Universal Journal of Environmental Research and Technology*, 1, 22-32.
34. Sumner, M.E., & Farina, M.P. (1986). *Phosphorus Interactions with Other Nutrients and Lime in Field Cropping Systems*. In: Stewart, B. A., Ed., *Advances in Soil Science*, Springer, New York, 201-236. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8660-5_5
35. Yuan, Y., Gai, S., Tang, C., Jin, Y., Cheng, K., Antonietti, M., & Yang, F. (2022). Artificial humic acid improves maize growth and soil phosphorus utilization efficiency. *Applied Soil Ecology*, 179, 104587. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104587>



Impact of Foliar Application of Iron and Zinc Sulfate on Forage Yield and Iron and Zinc Concentration in Corn Fodder (*Zea mays* L.)

K. Asadi¹, M. Barani Motlagh^{2*}, S.A. Movahedi Naeini², T. Nazari³

1, 2 and 3- M.Sc Graduated, Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Soil Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mbarani@gau.ac.ir)

Received: 07-08-2023	How to cite this article:
Revised: 01-11-2023	Asadi, K., Barani Motlagh, M., Movahedi Naeini, S.A., & Nazari, T. (2024). Effect of
Accepted: 12-11-2023	foliar application of iron and zinc sulfate on forage yield and iron and zinc concentration
Available Online: 12-11-2023	in forage corn (<i>Zea mays</i> L.). <i>Journal of Water and Soil</i> , 37(6), 907-922. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83811.1320

Introduction

Forage corn stands as a strategic and vital crop in Iran, assuming a significant role in fulfilling protein demands, particularly for red meat production. Iron and zinc micronutrients play pivotal roles in promoting plant growth and enhancing yield. Corn, in particular, exhibits a moderate need for iron and a high requirement for zinc. The calcareous composition prevalent in agricultural soils across most regions of Iran stands out as a significant factor diminishing the absorption efficiency of iron and zinc from the soil solution, consequently hampering agricultural plant yields. Moreover, in Iran, soil acidity coupled with high bicarbonate levels, sporadic land cultivation practices, overreliance on chemical fertilizers like nitrogen and phosphorus, and the limited use of fertilizers containing essential micronutrients collectively contribute to soil deficiencies in micronutrients, leading to corresponding deficits in crop yields. In various plants, insufficient absorption of micronutrient elements, especially iron and zinc, causes a decrease in the quantity and quality of the product. The present study aims to assess the influence of foliar application of iron and zinc sulfate on forage yield, iron and zinc concentration in forage corn (*Zea mays* L.).

Methods and Materials

This experiment was carried out in a field near the village of Takhshi Mahalle, located 5 km northwest of Gorgan city with geographical coordinates (54° 17' 56 " N) (52° 51' 36 " E) in 2022. The physical and chemical properties of the soil were measured at a depth of 0-30 cm in different parts of the farm and the final composite soil was analyzed in the laboratory. Water was measured using conventional methods of sampling and testing water and wastewater. The experiment was conducted as a randomized complete block design with 3 replications. The treatments included control (with distilled water), foliar spraying of iron sulfate micronutrient elements [FeSO₄.7H₂O (20%Fe)], zinc sulfate [ZnSO₄.7H₂O (22% Zn)], and iron sulfate + zinc sulfate at a concentration of 5 per thousand at the 4-leaf stage, the 8-leaf stage and both stages (4-leaf and 8-leaf). Foliar spraying was done in the early morning and drip irrigation was used. Plants were harvested 120 days after planting, washed with distilled water and dried with tissue paper. The samples were air-dried and then oven dried at 70°C to a constant weight in a forced air-driven oven. Iron and zinc concentrations were determined by an atomic absorption device. In order to determine the protein percentage and yield in different treatments, total nitrogen was measured by the Kjeldahl method. The protein percentage and yield were calculated using the following formula:

$$\text{Protein percentage} = \text{Nitrogen percentage} \times 6.25$$

$$\text{Protein yield} = \text{Nitrogen percentage} \times \text{Dry forage}$$



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83811.1320>

Statistical data were analysed using SAS software (9.4) and the mean values were compared using LSD tests (at 5% level).

Results and Discussion

The obtained results showed that all treatments effects were significant ($P < 0.01$) (fresh forage $P < 0.05$). Among all the treatments and measured traits, the control treatment showed the lowest value. The highest iron concentration with an average of $175.14 \text{ mg kg}^{-1}$ was obtained using iron foliar spraying in both 8 and 4 leaf stages, which increased 22.73 and 34.39% in comparison with only using iron foliar application in 4 and 8 leaf stages, respectively. Zinc foliar spraying at both the 4 and 8 leaf stages resulted in the highest zinc concentration of 71.02 mg kg^{-1} in forage corn, increasing zinc concentration by 89.86% over the control. In both 4 and 8 leaf stages, an iron and zinc foliar application had the highest chlorophyll index with an average of 57.63. The highest nitrogen content, averaging 2.80%, was observed following foliar spraying of iron and zinc during both the 4 and 8 leaf stages. This represents an increase of 5% and 23.92% compared to iron and zinc foliar application treatments during the respective stages. Consequently, the highest yield and protein percentage were also attained, averaging 310.75 grams per square meter and 17.50%, respectively, with simultaneous foliar application of iron and zinc during both the 4 and 8 leaf stages.

Conclusion

The optimal outcomes for measured traits were observed when iron and zinc were concurrently applied at both the 4 and 8 leaf stages. Therefore, it is advisable to administer iron and zinc simultaneously during these growth stages to ensure the attainment of forage with desirable quantitative and qualitative characteristics.

Keywords: Foliar spring, Forage corn, Fe concentration, Protein percentage

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۰۷-۹۲۲

اثر محلول پاشی سولفات آهن و روی بر عملکرد علوفه و غلظت آهن و روی در ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.)

کوثر اسدی^۱ - مجتبی بارانی مطلق^{۱*} - سید علیرضا موحدی نائینی^۲ - طالب نظری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

چکیده

آهکی بودن خاک‌های کشاورزی از عوامل اصلی کاهش کارایی جذب عناصر کم مصرف آهن و روی از محلول خاک و کاهش عملکرد گیاهان زراعی در اکثر مناطق ایران محسوب می‌شوند. بنابراین به منظور ارزیابی اثر محلول پاشی سولفات آهن و روی بر عملکرد و کیفیت علوفه و نیز غلظت آهن در گیاه ذرت علوفه‌ای (هیبرید ۷۰۴ سینگل کراس) آزمایشی به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل شاهد (محلول پاشی با آب مقطر)، محلول پاشی عناصر کم مصرف سولفات آهن ($\text{Fe SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (20% Fe)، سولفات روی ($\text{Zn SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (22% Zn) و سولفات آهن + سولفات روی با غلظت ۵ در هزار در مرحله ۴ برگی، مرحله ۸ برگی و هر دو مرحله (۴ برگی و ۸ برگی) بود. محلول پاشی اوایل صبح و آبیاری به صورت قطره‌ای انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بیشترین مقدار غلظت آهن اندام هوایی با میانگین ۱۷۵/۱۴ میلی گرم بر کیلوگرم از محلول پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد که نسبت به محلول پاشی آهن در مرحله ۸ برگی و مرحله ۴ برگی افزایشی معادل ۲۲/۷۳ و ۳۴/۳۹ درصد را نشان داد. همچنین بیشترین مقدار غلظت روی اندام هوایی با میانگین ۷۱/۰۲ میلی گرم بر کیلوگرم در گیاه ذرت علوفه‌ای در تیمار محلول پاشی روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی دیده شد که نسبت به تیمار شاهد ۸۹/۸۶ درصد غلظت روی را افزایش داد. بیشترین مقدار عملکرد و درصد پروتئین به ترتیب با میانگین ۳۱۰/۷۵ گرم بر متر مربع و ۱۷/۵۰ درصد از محلول پاشی همزمان آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد که نسبت به محلول پاشی آهن و روی در مرحله ۴ و ۸ برگی به ترتیب با میانگین ۱۸۹/۱۰ و ۱۷۱/۶۷ گرم بر متر مربع و ۱۲/۶۰ و ۱۰/۷۹ درصد افزایشی معادل با ۱۹/۵۰، ۳۰/۴۴، ۵/۰۲ و ۱۴ درصد داشت که نشان می‌دهد که محلول پاشی همزمان آهن و روی در هر دو مرحله اثر بیشتری بر صفات مورد مطالعه در مقایسه با محلول پاشی هر یک از عناصر آهن و روی به تنهایی دارد.

واژه‌های کلیدی: پروتئین، ذرت علوفه‌ای، غلظت آهن، محلول پاشی

مقدمه

کشورهای جهان، پژوهش و پیشرفت در مدیریت و تولید این گیاهان، در مقایسه با سایر گیاهان زراعی به نسبت کمتر انجام شده است (Mirlohi et al., 2000). در بین گیاهان علوفه‌ای، ذرت (*Zea mays* L.) یکی از مهمترین غلات دانه‌ای است که در مقیاس بزرگی برای تولید دانه و علوفه در بیش از ۱۹۰ میلیون هکتار از اراضی دنیا کشت می‌شود. و تولید آن بالغ بر ۱۴۳۸ میلیون تن است (FAO, 2019). تا سال ۲۰۵۰ تقاضا برای ذرت در کشورهای در حال توسعه دو برابر تقاضا

زراعت گیاهان علوفه‌ای در اقتصاد ملی کشورها ارزش حیاتی دارد و باعث ایجاد تعادل بین تولیدات گیاهی و تولیدات دامی می‌شود. در کشت گیاهان علوفه‌ای، افزایش عملکرد و کیفیت علوفه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Hashempour Baltourk et al., 2013). گیاهان علوفه‌ای به دلیل نقش مهمی که در تغذیه دام‌ها دارند، از مهم ترین گیاهان زراعی دنیا به شمار می‌آیند. با این حال، در بیشتر

۱، ۲ و ۳- به ترتیب فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشیار و دانشجوی دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mbarani@gau.ac.ir)

فعلی خواهد شد (Von Braun *et al.*, 2010). در گیاهان علوفه‌ای مشابه با سایر گیاهان زراعی، عملکرد به تنهایی تعیین کننده حد مطلوب علوفه نیست و کیفیت علوفه اهمیت بیشتری دارد (Mirlohi *et al.*, 2000). سلامت جامعه با افزایش کمیت و کیفیت علوفه و به دنبال آن افزایش کمیت و کیفیت فرآورده‌های دامی افزایش می‌یابد. امروزه علاوه بر عناصر غذایی پرمصرف استفاده از عناصر ریزمغذی به عنوان ابزاری مهم برای حصول حداکثر عملکرد در واحد سطح مورد توجه است. عناصر غذایی ریزمغذی علاوه بر افزایش کمی و کیفی محصولات کشاورزی در سلامت انسان و دام نیز تأثیر بسزایی دارد (Khalili Mahaleh & Rashidi, 2008). در ایران، به دلیل بالا بودن اسیدیته و درصد بی‌کربنات خاک، کشت متناوب اراضی، مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی مانند نیتروژن و فسفر و عدم کاربرد کودهای دارای عناصر کم‌مصرف کمبود عناصر ریزمغذی در خاک‌ها و در نتیجه در گیاهان زراعی به‌طور گسترده‌ای مشهود است. در گیاهان مختلف، جذب ناکافی عناصر ریز مغذی به‌ویژه آهن و روی، باعث کاهش کمی و کیفی محصول می‌شود. آهن در سوخت و ساز آنزیم‌ها (به عنوان فعال کننده آن‌ها) و در متابولیسم پروتئین‌ها (سیتوکروم اکسیداز، لگ هموگلوبین، پروتئین‌های Fe-S، فردوکسین) و همچنین آنزیم‌های حاوی آهن مانند نیتروژناز و سوپراکسید دسیموتاز، در ساخت کلروفیل، تکامل کلروپلاست، فتوسنتز، تنفس گیاه، واکنش‌های اکسایش و کاهش و سوخت و ساز اسیدهای آلی (مانند اگزالیک، استیک، مالیک) نقش دارد (Fageria, 2010). همچنین عنصر روی نیز از عناصر کم‌مصرف بوده که در سنتز تریپتوفان، پیش ماده اکسین، طول عمر رنگدانه‌های کلروفیل و پیری برگ، متابولیسم کربوهیدرات‌ها و ساخت پروتئین‌های گیاهان اثرگذار است (Hemant Ranjan, 1996). عناصر ریزمغذی آهن و روی نقش مهمی را در رشد و عملکرد گیاهان برعهده دارند. در بین گیاهان زراعی و مقایسه آنها با یکدیگر، گیاه ذرت نیاز حد متوسط به آهن و منگنز و احتیاج زیاد به روی دارد (Pais & Jones, 1997). از طرف دیگر مطالعات نشان داده که گیاهانی از قبیل ذرت و سورگوم توانایی تراوش فیتوسایدروفور را دارند که باعث افزایش قابلیت جذب آهن و روی توسط گیاه می‌شود ولی با وجود بهره‌گیری از چنین توانایی به دلیل داشتن ریشه‌های افشان و سطحی، این توانایی کم‌رنگ شده و علائم کمبود عناصر کم‌مصرف در آنها مشاهده می‌شود (Romheld & Marchner, 1998). تغذیه از طریق برگ (به صورت برگ‌پاشی) یکی از عملیات متداول برای رساندن مواد غذایی از طریق برگ‌پاشی گیاهان با کودهای قابل حل در آب به تمام شاخ و برگ گیاه می‌باشد. گیاهان در شرایط حضور یون‌های بی‌کربنات و قلیایی بودن خاک، تنش‌های دمایی، رطوبت بالا یا پایین خاک، بیماری‌های ریشه، عدم تعادل در مواد مغذی خاک و نمی‌تواند مواد مغذی کافی را از طریق ریشه‌ها جذب کند، در چنین وضعی، استفاده از منابع محلول‌پاشی می‌تواند جذب ریزمغذی‌ها را برای گیاه بالا ببرد. طبق اظهارات

پژوهشگران با توجه به حل‌پذیری کم روی و آهن در محلول‌پاشی آنها روشی مؤثر برای تأمین عناصر غذایی مورد نیاز این گیاهان خواهد بود و می‌تواند تمامی نیاز گیاه را به این کودها در تمامی دوره رشد و نمو گیاه برآورده سازد (Fageria *et al.*, 2009). محققان محلول‌پاشی عناصر را برای گیاه از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه دانسته‌اند. دلایل این نظریه می‌تواند چنین باشد: عدم تثبیت کود در خاک، عدم لزوم آبیاری برای حرکت دادن کود در منطقه ریشه، صرفه‌جویی اقتصادی از لحاظ هزینه، واکنش بهتر و سریع‌تر نسبت به کود (Mortvert *et al.*, 1972). فرهانی و همکاران (Farahani *et al.*, 2015) در بررسی تأثیر محلول‌پاشی آهن، روی و منگنز بر میزان عناصر و خصوصیات کیفی علوفه سورگوم گزارش کردند محلول‌پاشی آهن باعث افزایش غلظت آهن در علوفه نسبت به شاهد گردید به نحوی که بیشترین مقدار آهن با میانگین ۴۴۷/۶ قسمت در میلیون از تیمار محلول‌پاشی آهن بدست آمد. همچنین صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2021) در بررسی اثر محلول‌پاشی آهن و روی بر عملکرد، خواص کیفی و غلظت عناصر غذایی برگ و میوه سیب گزارش کردند اثر آهن در سطح احتمال یک درصد بر میزان آهن برگ‌ها معنی‌دار بود. با افزایش غلظت آهن میزان آهن برگ نیز افزایش پیدا کرد. یوسفی و همکاران (Yousefi *et al.*, 2023) در ارزیابی کاربرد دو سطح کلات آهن (عدم محلول‌پاشی، ۰/۴ درصد) و ۴ سطح کلات روی (عدم محلول‌پاشی، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) نشان دادند در شرایط عدم محلول‌پاشی آهن عملکرد دانه با افزایش روی به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد به‌طوری که بیشترین و کمترین مقدار عملکرد دانه با میانگین ۶۳۲ و ۳۰۹/۲۳ کیلوگرم در هکتار به ترتیب از کاربرد تیمار ۰/۴ درصد و عدم محلول‌پاشی روی بدست آمد. همچنین، مرور منابع متعدد نشان می‌دهد که محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی در دو مرحله شش برگی و ظهور گل تاجی بیش از محلول-پاشی در هر یک از این دو مرحله بر بهبود صفات کمی و کیفی گیاه علوفه‌ای مؤثر است (Khalili Mahalleh & Roshdi, 2008; Bagheri Dehabadi *et al.*, 2017). محققان دیگر نیز گزارش نموده‌اند که محلول‌پاشی کودها تنها در یک مرحله نمی‌تواند از کارایی کافی در افزایش رشد گیاهان برخوردار باشد (Ehsanollah *et al.*, 2015). این نتایج نشان می‌دهد که مرحله رشد رویشی ضروری‌ترین زمان از نظر پاسخ به کودهای کم‌مصرف آهن و روی از نظر رشد بوته و بلال به شمار می‌رود، اما جهت تکمیل اثر محلول‌پاشی مرحله رشد رویشی، نیاز به محلول‌پاشی در آغاز مرحله رشد زایشی نیز است (Yousefpour & Farajzadeh Memari Tabrizi, 2018). از طرفی دیگر افزایش قابل توجه کارایی مصرف کود در روش محلول‌پاشی نشان می‌دهد که انتخاب صحیح روش مصرف کود با توجه به مقدار عملکرد حاصله حائز اهمیت می‌باشد (Khalili Mahalleh & Roshdi, 2008; Bagheri Dehabadi *et al.*, 2017). بنابراین

مطالعه حاضر با هدف ارزیابی اثر محلول پاشی سولفات آهن و سولفات روی و برهمکنش آنها در مراحل مختلف رشد بر عملکرد و کیفیت علوفه و غلظت آهن و روی در ذرت علوفه‌ای (هیبرید ۷۰۴ سینگل کراس) اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت مزرعه‌ای در نزدیکی روستای تخرشی محله واقع در ۵ کیلومتری شمال غربی شهر گرگان با مختصات جغرافیایی (۵۶° ۱۷' N، ۵۴° ۵۱' E) در تابستان ۱۴۰۰ اجرا گردید. برای مشخص شدن ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، پیش از اجرای آزمایش از عمق ۰-۳۰ سانتی متری خاک از نقاط مختلف زمین نمونه برداشت و خاک مرکب نهایی در آزمایشگاه مورد آنالیز قرار گرفت (جدول ۱). ویژگی‌های آب آبیاری از جمله واکنش آب (pH)، هدایت الکتریکی، کل مواد محلول، ذرات معلق، سختی کل، بی‌کربنات، سولفات، کلر، مقادیر کلسیم، منیزیم، سدیم و نسبت جذب سدیم (جدول ۲) با استفاده از روش‌های مرسوم نمونه برداری و آزمایش آب و فاضلاب اندازه‌گیری شدند (APHA, 1992). پیش از کاشت در تاریخ ۱۴۰۰/۰۴/۱۰ زمین زراعی شخم زده شد. سپس برای تسطیح و خرد شدن کلوخه‌ها از دیسک استفاده شد. در هر کرت ۴ ردیف کشت (با فاصله ۷۵ سانتی متر) به طول ۴ متر در نظر گرفته شد. مساحت هر کرت ۱۲ متر مربع، فاصله بین بلوک‌ها از همدیگر ۱/۵ متر و فاصله بین کرت‌ها در یک بلوک، ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. دو ردیف کناری و ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای هر ردیف به عنوان حاشیه در نظر گرفته شد. سپس بذره‌ای ذرت علوفه‌ای رقم هیبرید ۷۰۴ سینگل کراس که به عنوان رایج‌ترین رقم مورد استفاده‌ی کشاورزان منطقه بود با فاصله ۲۰ سانتی متر و در عمق ۵-۳ سانتی متری با ردیف کار کشت شدند. این پژوهش به صورت طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارها شامل شاهد (محلول پاشی با آب مقطر)، محلول پاشی عناصر کم‌مصرف {سولفات آهن (FeSO₄.7H₂O (20%Fe)، سولفات روی (ZnSO₄.7H₂O (22% Zn) و سولفات آهن + سولفات روی با غلظت ۵ در هزار} در مرحله ۴ برگی، مرحله ۸ برگی و هر دو مرحله (۴ برگی و ۸ برگی) بود. بدین ترتیب ۱۰ تیمار در هر بلوک آزمایشی قرار گرفت. همچنین برای کود دهی کل زمین جهت تقویت و تأمین عناصر مورد نیاز، براساس توصیه کودی، مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار کود سوپر فسفات تریپل [Ca(H₂PO₄)₂.H₂O] قبل از کشت به خاک افزوده شد. همچنین کود نیتروژن از منبع اوره (حاوی ۴۶ درصد نیتروژن) به میزان ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار در دو مرحله دو برگی (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) و شش برگی (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای به کار برده شد. محلول پاشی اوایل صبح انجام گرفت تا حد امکان از اثرات نامطلوب نور خورشید جلوگیری به عمل آید. محلول پاشی ترکیبی

به صورت جداگانه انجام شد بدین گونه که یک محلول در صبح زود و دیگری در عصر انجام گردید. آبیاری به صورت قطره‌ای و مطابق با نیاز معمول گیاه، به صورت یکسان و تقریباً هر ۱۵ روز یکبار انجام گرفت. مبارزه و کنترل علف‌های هرز مزرعه به منظور جلوگیری از تداخل علف کش‌ها به صورت وجین دستی در مراحل مختلف رشد و نمو انجام گرفت. جهت تعیین زمان برداشت علوفه از محل قرار گرفتن خط شیری دانه بعنوان شاخص استفاده و برداشت زمانی انجام گرفت که خط شیری بین یک دوم و دو سوم دانه بود (Mirzavand et al., 2020; Bozorgmehr & Nastari Nasrabadi, 2014). در مرحله برداشت جهت بررسی صفات مورد مطالعه، از ۴ ردیف موجود در هر کرت دو ردیف کناری و همچنین ۰/۵ متر از ابتدا و انتهای دو ردیف وسط بعنوان حاشیه حذف شدند و فضای باقی‌مانده جامعه آماری را تشکیل داد. به منظور بررسی صفات مورد مطالعه ۵ بوته در دو ردیف وسط به طور تصادفی علامت‌گذاری شد و صفات مختلف بر روی این ۵ بوته بررسی و ثبت گردید. همچنین شاخص کلروفیل برگ دقیقاً قبل از برداشت در بالاترین برگ کاملاً توسعه یافته و از هر برگ سه نقطه (ابتدا، انتها و وسط برگ) با استفاده از دستگاه کلروفیل سنسج (مدل 200 - ccm، ساخت Opti - sciences آمریکا) اندازه‌گیری و میانگین سه نقطه ثبت شد. آنگاه پس از پایان دوره رشد (به مدت ۱۲۰ روز) گیاهان برداشت شدند، گیاهان به صورت کف‌بر برداشت و ابتدا با آب شهری سپس با آب مقطر شسته و روی تورهای پلاستیکی پخش شد تا آب اضافی موجود در سطح آنها حذف شود. وزن تر علوفه (اندام هوایی + بلال) اندازه‌گیری و سپس نمونه‌ها داخل آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند و بعد از آن وزن خشک علوفه (اندام هوایی + بلال) آن‌ها اندازه‌گیری گردید. هضم نمونه‌های گیاهی با روش خشک سوزانی انجام گرفت (Jones & Case, 1990). غلظت آهن و روی در نمونه‌ها (اندام هوایی + بلال) با دستگاه جذب اتمی (AAS-Unicam-919) تعیین شد. جهت تعیین درصد پروتئین در تیمارهای مختلف با استفاده از روش کج‌لدال میزان ازت کل اندازه‌گیری و سپس مقدار پروتئین خام با استفاده از فرمول زیر محاسبه خواهد گردید: (Dianati et al., 2015; Keshavarz et al., 2013).

درصد پروتئین خام = درصد ازت × ضریب پروتئینی

از آنجایی که پروتئین‌ها حاوی ۱۶ درصد ازت می‌باشند، با ضرب در صد ازت در عدد ۶/۲۵ در صد پروتئین خام نمونه‌ها بدست آمد. از ضرب درصد پروتئین خام در عملکرد ماده خشک، عملکرد پروتئین حاصل خواهد شد (Dianati et al., 2015; Keshavarz et al., 2013).

عملکرد پروتئین = درصد پروتئین خام × عملکرد ماده خشک

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش قبل از کاشت
Table 1- Some physico-chemical properties of soil tested before planting

پ هاش	قابلیت هدایت الکتریکی	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	روی (mg kg ⁻¹)	آهن (mg kg ⁻¹)	نیتروژن کل (%)	وزن مخصوص ظاهری g cm ⁻³	آهک CaCO ₃ (%)	کربن آلی OC (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	بافت خاک Soil texture
7.7	4.01	554	12.53	1.84	7.96	0.1	1.4	11.6	1.3	26	58	16	Silty loam

جدول ۲- ویژگی‌های شیمیایی آب آبیاری مورد استفاده
Table 2- Chemical properties of used irrigation water

سختی کل Total TH (%)	نسبت جذب سدیم SAR (%)	مواد محلول کل T.D.S (mg l ⁻¹)	ذرات معلق T.S.S (mg l ⁻¹)	کلسیم و منیزیم Ca + Mg (meq l ⁻¹)	کلسیم Ca (meq l ⁻¹)	منیزیم Mg (meq l ⁻¹)	سدیم Na (meq l ⁻¹)	بیکربنات HCO ₃ ⁻ (meq l ⁻¹)	کلر Cl (meq l ⁻¹)	سولفات SO ₄ ²⁻ (meq l ⁻¹)	هدایت الکتریکی EC (μS cm ⁻¹)	پ هاش pH
1060	4.18	2272	26	21.2	14.1	7.1	13.6	17	6.1	10.2	3550	7.66

است که نتیجه‌ی آن افزایش نسبی کارتنوئیدها در مقایسه با کلروفیل بوده که در نهایت سبزیگی برگ‌ها و توان فتوسنتزی آنها را کاهش می‌دهد (Briat et al., 2007). بولرینا و همکاران (Borlina et al., 2001) گزارش نمودند که کاربرد عناصر کم‌مصرف از طریق افزایش سطح برگ و فراهم نمودن زمینه مناسب جهت دریافت انرژی و نیز شرکت در ساختار کلروفیل و آنزیم‌های درگیر در متابولیسم کربن فتوسنتزی، موجب افزایش بازده فتوسنتزی می‌شوند. محلول‌پاشی روی و آهن با افزایش فعالیت آنزیم رویسکو سبب افزایش فعالیت فتوسنتزی گیاه می‌شود (Rawashdeh & Florin, 2015). حیدریان و همکاران (Heidarian et al., 2011) گزارش نمودند که آهن و روی نقش مهمی را در فتوسنتز و تخصیص مواد فتوسنتزی به بخش‌های مختلف گیاهان بر عهده دارند. مصرف عنصر روی و آهن میزان کلروفیل و فعالیت فتوسنتزی گیاه را افزایش می‌دهد و سبب توسعه پوشش گیاهی و افزایش سطح برگ و عملکرد می‌گردد. عنصر روی در افزایش غلظت کلروفیل، کاهش غلظت سدیم در بافت‌های گیاهی و افزایش جذب نیتروژن و فسفر نقش داشته و از این طریق هم باعث افزایش عملکرد می‌شود. از طرف دیگر این عنصر در ساختمان فسفوانول پپروات کربوکسیلاز نیز نقش اساسی دارد و به این ترتیب در حضور عنصر روی توان فتوسنتزی و در نتیجه میزان کربوهیدرات‌های گیاه افزایش می‌یابد (Baniabbass et al., 2012). بورنگ و همکاران (Bourang et al., 2019) در بررسی محلول‌پاشی آهن بر خصوصیات بیوشیمیایی گندم بیان کردند که محلول‌پاشی توام روی و آهن در مرحله ساقه دهی موجب افزایش میانگین صفات کلروفیل و کاروتنوئید نسبت به شرایط شاهد شد. همچنین عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2019) در تحقیقی دیگر دریافتند که محلول‌پاشی عنصر روی و آهن می‌تواند

تجزیه و تحلیل آماری مقایسه بین تیمارهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 انجام و و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD (در سطح احتمال ۵ درصد) استفاده شد. همچنین برای ترسیم نمودارها از برنامه Excel 2016 استفاده شد.

نتایج و بحث

خاک مورد استفاده از عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری برداشت شد. با توجه به داده‌های جدول ۱ مقدار عناصر کم‌مصرف آهن و روی به ترتیب برابر با ۷/۹۶ (حد بحرانی ۱۰) و ۱/۸۴ (حد بحرانی ۲) میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که براساس این نتایج در حد کمبود قرار دارد (Havlin et al., 2005). ویژگی‌های آب آبیاری مورد استفاده را نشان می‌دهد. شاخص کلروفیل: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثر تیمارهای محلول‌پاشی آهن و روی بر شاخص کلروفیل در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار شاخص کلروفیل با میانگین ۵۷/۶۳ از محلول‌پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد هر چند با تیمار محلول‌پاشی روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ و آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی و محلول‌پاشی آهن و روی در مرحله ۴ و مرحله ۸ برگی به ترتیب با میانگین ۵۷/۳۶، ۵۲/۸۰، ۵۳/۲۰ و ۵۳/۰۸ از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۴). کمترین مقدار شاخص کلروفیل با میانگین ۳۱/۷۶ از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) بدست آمد (جدول ۴). در بین عناصر ریزمغذی، آهن نقش کلیدی در تشکیل کلروفیل و فتوسنتز داشته و از اهمیت زیادی در سیستم آنزیمی و تنفس گیاهان برخوردار می‌باشد. از مهمترین اثرات کمبود آهن، کاهش محتوای رنگدانه‌های فتوسنتزی

موجب افزایش کلروفیل در گیاه گندم شود که این امر می‌تواند به علت نقش این عناصر در متابولیسم نیتروژن و سنتز پروتئین و ساخت کلروفیل باشد. نتایج این مطالعه با یافته‌های محققین فوق مطابقت دارد. بنابراین بهبود شرایط تغذیه‌ای با کاربرد محلول پاشی آهن و روی می‌تواند در افزایش شاخص کلروفیل در ذرت علوفه‌ای مؤثر باشد. در همین راستا ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) در بررسی پاسخ خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی رقم گندم آسمان به محلول پاشی روی و آهن در شرایط دیم گزارش کردند کاربرد توام روی و آهن در مرحله ساقه‌دهی با متوسط ۲۸/۷ واحد اسپد و مصرف آهن در مرحله ساقه‌دهی با متوسط ۲۶/۴۵ واحد اسپد به ترتیب بیشترین مقدار کلروفیل را نسبت به دیگر تیمارهای آزمایشی داشتند. وقار (Vaghar, 2022) در بررسی اثر تغذیه برگ آهن و روی به صورت نانو کلات بر غلظت آهن و روی و عملکرد دانه سویا گزارش کردند که بیشترین مقدار شاخص اسپد با میانگین ۳۰/۵۸ واحد اسپد مربوط به تیمار اثر متقابل آهن و روی بود که نسبت به تیمار شاهد با میانگین ۲۲/۰۲ واحد اسپد افزایشی معادل با ۲۷/۹۹ درصد داشت.

تغییرات غلظت آهن گیاه: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثر تیمارهای محلول پاشی بر غلظت آهن اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار غلظت آهن اندام هوایی با میانگین ۱۷۵/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم از محلول پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد هر چند با تیمار محلول پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی با میانگین ۱۶۷/۷۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت.

(جدول ۴). همچنین محلول پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی به ترتیب نسبت به محلول پاشی آهن در مرحله ۸ برگی و مرحله ۴ برگی افزایشی معادل ۲۲/۷۳ و ۳۴/۳۹ در غلظت آهن در اندام هوایی را نشان داد (جدول ۴). کمترین مقدار غلظت آهن اندام هوایی با میانگین ۶۴/۷۸ از تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) بدست آمد (جدول ۴). محلول پاشی برگی عناصر کم‌مصرف بهتر از استفاده آن‌ها به صورت خاکی است، زیرا باعث واکنش سریع، اثربخشی و حذف علائم کمبود عناصر کم‌مصرف می‌شود. استفاده از عناصر کم‌مصرف از طریق شاخ و برگ می‌تواند ۱۰ تا ۲۰ برابر کارآمدتر از کاربرد خاکی باشد (Zaman & Schumann, 2014). در شرایط نامناسب خاک از جمله آهکی بودن خاک‌ها، پی‌اچ قلیایی و وجود بی‌کربنات در آب آبیاری، محلول پاشی برگی عناصر یکی از روش‌های معمول تأمین نیاز غذایی گیاهان عالی است که کارایی بیشتری نسبت به مصرف خاکی دارد (Erdal et al., 2008). ایران از جمله کشورهای است که بیشتر قسمت‌های آن به دلیل داشتن آب و هوای خشک و نیمه‌خشک و عدم شستشوی کربنات‌ها دارای خاک‌های آهکی است. خاک‌های آهکی دارای مواد آلی و فسفر کمی بوده و pH بالای این خاک‌ها منجر به دسترسی کم گیاه به فسفر و بعضی عناصر کم‌مصرف مثل روی و آهن می‌شود (FAO, 1972). این عنصر در فرایندهای حیاتی فتوسنتز، تنفس، جذب و ساخت نیتروژن و همچنین در ساخت و تشکیل کلروپلاست‌ها در گیاهان نقش دارد. نقش آهن در فرایند فتوسنتز و تنفس به واسطه شرکت آن در واکنش‌های اکسیداسیون و احیا در کلروپلاست‌ها و میتوکندری‌ها است که آهن در آنها به عنوان گروه نقل و انتقال الکترون شرکت می‌کند (Marschner, 1995).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای محلول پاشی بر شاخص کلروفیل و غلظت نیتروژن، آهن و روی ذرت علوفه‌ای

Table 3- Analysis of variance of the effect of foliar spray treatment on SPAD and N, Fe and Zn concentrations of forage corn

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square			
		شاخص کلروفیل SPAD	آهن اندام هوایی Shoot Fe content	روی اندام هوایی Shoot Zn content	نیتروژن اندام هوایی Shoot N content
بلوک Block	2	0.254 ^{ns}	113.55 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.00001 ^{ns}
تیمار Treatment	9	181.26 ^{**}	4163.21 ^{**}	1051.24 ^{**}	0.884 ^{**}
خطا Error	18	9.15	87.23	12.17	0.006
ضریب تغییرات C.V (%)		6.15	9.33	10.90	4.33

ns, * و ** به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

از طرف دیگر، آهن در ساخت کلروفیل‌ها نقش اساسی دارد. کاهش میزان کلروفیل‌ها در برگ‌های جوان به دلیل نقش آهن در ساخت آنها آشکارترین نشانه کمبود آهن است که به صورت زردی بین رگبری در برگ‌های جوان نمایان می‌گردد (Marschner, 1995). فرج زاده معماری تبریزی و همکاران (Farajzadeh Memari Tabrizi et al., 2011) در بررسی اثر روش‌های مختلف مصرف کودهای کم مصرف بر میزان تجمع کم مصرف در بذر و برگ و عملکرد ذرت نشان دادند که محلول پاشی کود آهن بیشترین تأثیر را در افزایش آهن در بافت‌های برگ داشت که میزان آن ۱۵۷/۹۳ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت و به شدت باعث افزایش مقدار این عنصر غذایی معادل ۶۰۱ میلی گرم بر کیلوگرم گردید و کمترین میزان غلظت آهن در برگ در تیمار شاهد معادل ۲۳۳ میلی گرم بر کیلوگرم اندازه گیری شد. سایر روش‌های مصرف این عنصر غذایی نیز باعث افزایش مقدار این عنصر در بافت‌های برگ نسبت به شاهد گردید. لذا روش توصیه شده برای افزایش میزان این عنصر در بافت گیاهی و در نتیجه بهره‌گیری بهتر از نقش فیزیولوژیکی آن، روش محلول پاشی بود (Farajzadeh Memari Tabrizi et al., 2011). فرهانی و همکاران (Farahani et al., 2015) در بررسی تأثیر محلول پاشی آهن، روی و منگنز بر میزان عناصر و خصوصیات کیفی علوفه سورگوم گزارش کردند محلول پاشی آهن باعث افزایش غلظت آهن در علوفه نسبت به شاهد گردید به نحوی که بیشترین مقدار آهن با میانگین ۴۴۷/۶ قسمت در میلیون از تیمار محلول پاشی آهن بدست آمد. همچنین صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2021) در بررسی اثر محلول پاشی آهن و روی بر عملکرد، خواص کیفی و غلظت عناصر غذایی برگ و میوه سیب گزارش کردند اثر آهن در سطح احتمال یک درصد بر میزان آهن برگ‌ها معنی دار بود. با افزایش غلظت آهن میزان آهن برگ نیز افزایش پیدا کرد. ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) در بررسی محلول پاشی آهن و روی بر خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گندم آسمان در شرایط دیم گزارش کردند محلول پاشی توام روی و آهن در مرحله پر شدن دانه با میانگین ۳۳۴/۶ میلی گرم بر کیلوگرم دارای بیشترین غلظت آهن برگ بود و محلول پاشی آهن در مرحله ساقه دهی با میانگین ۳۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم رتبه دوم را به خود اختصاص داد. آنها همچنین نشان دادند در اثر مصرف روی و آهن به صورت مخلوط و به تنهایی غلظت آهن در برگ در مقایسه با تیمار شاهد افزایش می‌یابد. در همین راستا یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2023) در ارزیابی کاربرد دو سطح کلات آهن (عدم محلول پاشی، ۰/۴ درصد) و ۴ سطح کلات روی (عدم محلول پاشی، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) نشان دادند محلول پاشی روی و آهن و

اثرات متقابل این دو عامل بر میزان آهن اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار شد. در شرایط عدم محلول پاشی آهن بیشترین مقدار آهن با میانگین ۱۱۲/۸۱ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار ۰/۴ درصد محلول پاشی روی بدست آمد این در حالی است که در شرایط محلول پاشی آهن بیشترین مقدار آهن با میانگین ۱۳۸/۱۹ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار ۰/۳ درصد محلول پاشی روی بدست آمد.

روی: با توجه به نتایج تجزیه واریانس (جدول ۳) اثر تیمارهای محلول پاشی بر غلظت روی اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی دار شد (جدول ۳). محلول پاشی روی در مرحله ۴ و ۸ برگی بیشترین مقدار غلظت روی اندام هوایی را با میانگین ۷۱/۰۲ میلی گرم بر کیلوگرم در گیاه ذرت علوفه‌ای را به خود نسبت داد که نسبت به تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) افزایشی معادل ۸۹/۸۶ درصد داشت (جدول ۴). تیمارهای محلول پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی و مرحله ۴ برگی به ترتیب با میانگین ۵۱ و ۴۳/۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم در رده‌های بعدی قرار داشتند. به غیر از تیمارهای مذکور بقیه تیمارها نیز افزایش غلظت روی اندام هوایی را در گیاه ذرت علوفه ای نسبت به شاهد را نشان دادند (جدول ۴). روی به عنوان یکی از اجزای سازنده آنزیم‌ها برای سنتز پروتئین‌ها، تولید انرژی و حفظ ساختار غشای زیستی یک عنصر مهم محسوب می‌شود. روی در تغذیه گیاهان با توجه به نقشی که در سنتز هورمون‌های گیاهی و ایجاد تعادل بین فسفر و پتاسیم در داخل سلول‌های گیاهی دارد، اثرگذار است (Ganesh & Kannan, 2013). فرج زاده معماری تبریزی و همکاران (Farajzadeh Memari Tabrizi et al., 2011) در بررسی اثر روش‌های مختلف مصرف کودهای میکرو بر میزان تجمع عناصر میکرو در بذر و برگ و عملکرد ذرت نشان دادند که محلول پاشی روی بیشترین تأثیر را در افزایش روی در بافت‌های برگ داشت. بهترین نوع کود، سولفات روی بوده و بالاترین غلظت روی ۵۱ پی پی ام از طریق محلول پاشی به دست آمد. همچنین کمترین مقدار روی ۱۶/۸۹ پی پی ام در تیمار شاهد مشاهده شد که کاهشی معادل ۶۶/۸۸٪ را نشان داد. کاظمی و همکاران (Kazemi et al., 2008 Poshtmasari) در تحقیقی بر روی لوبیا نشان دادند که محلول پاشی عناصر نسبت به مصرف کود در خاک بیشترین غلظت آهن، روی و منگنز در برگ‌ها موجب شد. صادقی و همکاران (Sadeghi et al., 2021) در بررسی اثر محلول پاشی آهن و روی بر عملکرد، خواص کیفی و غلظت عناصر غذایی برگ و میوه سیب گزارش کردند روی در سطح احتمال یک درصد باعث افزایش میزان روی برگ‌ها شد.

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای محلول پاشی بر شاخص کلروفیل و غلظت نیتروژن، آهن و روی ذرت علوفه‌ای

Table 4- Mean comparison of the effect of foliar spray treatment on SPAD and N, Fe and Zn concentration of forage corn

تیمارها Treatments	شاخص کلروفیل (SPAD)	غلظت آهن در اندام هوایی Shoot Fe conc. (mg kg ⁻¹)	غلظت روی در اندام هوایی Shoot Zn conc. (mg kg ⁻¹)	غلظت نیتروژن در اندام هوایی Shoot N conc. (%)
عدم محلول پاشی (شاهد) Blank	31.76e	64.78f	7.20j	1.16g
مرحله ۴ برگ 4 leaf stages				
محلول پاشی روی Zinc foliar spraying	48.56bc	72.90ef	31.67d	1.76d
محلول پاشی آهن Iron foliar spraying	42.86d	114.90bd	15.18f	1.78d
محلول پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	53.20ab	139.05b	43.40c	2.01c
مرحله ۸ برگ 8 leaf stages				
محلول پاشی روی Zinc foliar spraying	48.96bc	84.17e	26.94de	1.49e
محلول پاشی آهن Iron foliar spraying	45cd	135.32d	21.01ef	1.30f
محلول پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	53.06ab	128.93ab	30.12d	1.72d
مرحله ۴ و ۸ برگ 4 and 8 leaf stages				
محلول پاشی روی Iron foliar spraying	57.36a	113.49bd	71.02a	2.66b
محلول پاشی آهن Iron foliar spraying	52.80ab	175.14a	22.39e	2.13c
محلول پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	57.63a	167.79a	51b	2.80a

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.
Means followed with the same letters in each column are not significant at $p < 0.05$ by LSD Test.

سطح کلات آهن (عدم محلول پاشی، ۰/۴ درصد) و ۴ سطح کلات روی (عدم محلول پاشی، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ درصد) بر عملکرد و اجزای عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) نشان دادند محلول پاشی روی و آهن و اثرات متقابل این دو عامل بر میزان روی اندام هوایی در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود. در شرایط عدم محلول پاشی آهن بیشترین مقدار روی با میانگین ۹۹/۸ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار ۰/۴ درصد محلول پاشی روی بدست آمد این درحالی است که در شرایط محلول پاشی آهن بیشترین مقدار روی با میانگین ۹۳/۷ میلی گرم بر کیلوگرم از تیمار ۰/۳ درصد محلول پاشی روی بدست آمد. پورصفر و همکاران (Poursafar et al., 2022) در بررسی اثر محلول پاشی آهن و روی و زمان‌های برداشت بر جوانه‌زنی و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی سویا رقم ویلیام بیان کردند اثر متقابل محلول پاشی آهن و روی و زمان برداشت بر مقدار آهن و روی بذر معنی‌دار بود به نحوی که بیشترین مقدار آهن بذر با میانگین ۱۲۱/۶ میلی گرم بر کیلوگرم در کاربرد سولفات آهن و بیشترین مقدار روی با میانگین ۹۱/۱ میلی گرم بر کیلوگرم از

همچنین آنها گزارش کردند آهن و اثر متقابل آهن و روی در سطح احتمال پنج درصد به‌طور معنی‌داری افزایش محتوای روی برگ‌ها را موجب شد. بیشترین میزان روی مربوط به تیمار ۱۰۰ میلی گرم در لیتر آهن و ۱۰ میلی گرم در لیتر روی بود و کمترین میزان روی نیز در نمونه‌های شاهد دیده شد. یوسف پور و همکاران (Yousefpour et al., 2018) در بررسی تأثیر محلول پاشی آهن و روی در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و کیفیت دانه ذرت شیرین گزارش نمودند که بیشترین غلظت عنصر روی در دانه مربوط به تیمار کاربرد روی با غلظت ۵ در هزار بود. در این تیمار غلظت روی ۲۸/۹ میلی گرم در کیلوگرم به دست آمد و کمترین غلظت روی نیز با ۱۴/۸ و ۱۴/۶ میلی گرم در کیلوگرم به ترتیب در تیمارهای کاربرد آهن با غلظت ۲/۵ در هزار و غلظت ۵ در هزار به دست آمد. این پژوهشگران همچنین گزارش کردند محلول پاشی در سه مرحله رشد رویشی، ظهور گل آذین نر و پر شدن دانه، غلظت روی در دانه‌های ذرت را ۴۶ درصد افزایش داد. یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2023) در ارزیابی کاربرد دو

کاربرد سولفات روی، هر دو در زمان برداشت فیزیولوژیک بدست آمد. **نیتروژن:** نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثر تیمارهای محلول‌پاشی بر درصد نیتروژن اندام هوایی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۳). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار نیتروژن با میانگین $2/80$ درصد از محلول‌پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد که نسبت به تیمار محلول‌پاشی آهن و روی در مرحله ۴ و مرحله ۸ برگی به‌ترتیب افزایشی معادل ۵ و $23/92$ را نشان داد (جدول ۴). نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که محلول‌پاشی توام آهن و روی اثر بیشتری بر درصد نیتروژن در مقایسه با محلول‌پاشی هر یک از عناصر آهن و روی به تنهایی دارد (جدول ۴). همچنین کمترین مقدار نیتروژن با میانگین $1/16$ از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) بدست آمد (جدول ۴). روی و آهن از اجزای اصلی آنزیم‌ها در گیاهان هستند و کمبود هر یک باعث کاهش رشد گیاهان می‌شود. کمبود هر یک از عناصر غذایی، عناصر غذایی دیگر را کاهش خواهد داد (Heidarian et al., 2011). بنابراین کودها باعث رشد بهتر گیاهان می‌شود. تداخل مثبت این دو کود در سایر تحقیقات نیز به اثبات رسیده است. فیزیولوژیست‌ها بر این باورند که هر یک از کودهای آهن و روی، با افزایش رشد ریشه‌ها، می‌توانند جذب عنصر دیگر را افزایش دهند که در این شرایط بر میزان تأثیر کودها در رشد گیاهان افزوده می‌شود (Yousefpour et al., 2018). ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) در بررسی پاسخ خصوصیات فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی رقم گندم آسمان به محلول‌پاشی روی و آهن در شرایط دیم گزارش کردند تیمارهای محلول‌پاشی و زمان محلول‌پاشی و اثر متقابل هر دو بر درصد نیتروژن برگ و دانه در سطح احتمال یک درصد معنی‌داری شد. بیشترین درصد نیتروژن برگ در تیمار محلول‌پاشی همزمان آهن و روی در مراحل فنولوژیکی پر شدن دانه ($1/95$ درصد) و ساقه‌دهی ($1/92$ درصد) مشاهده شد. آنها همچنین گزارش کردند که کاربرد آهن و روی در افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز مؤثر است و انجام محلول‌پاشی باعث افزایش درصد نیتروژن می‌گردد.

عملکرد علوفه تر و خشک: نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر محلول‌پاشی آهن و روی در سطح احتمال پنج درصد ($P < 0.05$) بر عملکرد علوفه تر معنی‌دار شدند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد علوفه تر با میانگین 6892 گرم در متر مربع از محلول‌پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد هر چند با محلول‌پاشی آهن در مرحله ۴ و ۸ برگی، محلول‌پاشی آهن و روی در مرحله

۸ برگی و محلول‌پاشی آهن و روی در مرحله ۴ برگی اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار وزن تر با میانگین 4872 گرم در متر مربع از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) بدست آمد (جدول ۶). همچنین نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر محلول‌پاشی آهن و روی در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) بر عملکرد علوفه خشک معنی‌دار شدند (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار علوفه خشک با میانگین $1774/40$ گرم در متر مربع از محلول‌پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد. کمترین مقدار علوفه خشک با میانگین 1218 گرم در متر مربع از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) بدست آمد (جدول ۶). روی در تولید پروتئین، ساخته شدن هورمون اکسین و آنزیم‌های مسئول تولید نشاسته مؤثر است که به بهبود کیفیت دانه و افزایش لقاح کمک می‌کند اما آهن بیشتر در سنتز کلروفیل و افزایش فتوسنتز دخیل است (Ramzan et al., 2020). لیکن محلول‌پاشی آهن بیشتر به رشد رویشی و محلول‌پاشی روی به رشد زایشی کمک خواهد کرد. کاربرد همزمان این دو عنصر با یکدیگر اثر سینرژیستی داشته و منجر به رشد کلی گیاهان چه زایشی و چه رویشی می‌شود (Ziaei et al., 2020). غفاری و همکاران (Ghaffari et al., 2012) با ارزیابی واکنش برخی شاخص‌های فیزیولوژیک رشد ذرت دانه‌ای به کاربرد خاکی و محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی آهن، روی و کود کامل میکرو نتیجه‌گیری کردند که محلول‌پاشی کود کامل میکرو در مرحله ساقه رفتن + مرحله ظهور بلال به‌طور معنی‌داری موجب افزایش وزن خشک کل می‌شود. در همین رابطه ناصری قندعلی و نصیری دهرسخی (Varnaseri et al., 2017) در بررسی تغذیه برگی عناصر روی و آهن به فرم نانو بر رشد و عملکرد لوبیا چشم بلبلی گزارش کردند که محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف بر وزن خشک لوبیا چشم بلبلی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد. همچنین آنها گزارش کردند کلیه تیمارهای محلول‌پاشی عناصر کم‌مصرف باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک برگ نسبت به تیمار شاهد گردید و کمترین وزن خشک برگ با میانگین $143/5$ گرم در متر مربع در تیمار شاهد مشاهده شد. نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد کاربرد ترکیبی آهن و روی در مقایسه با کاربرد کودهای آهن و روی به تنهایی باعث افزایش وزن خشک برگ به‌ترتیب به میزان ۹ و ۱۱ درصد گردید. در همین رابطه خلفی و همکاران (Khalafi et al., 2022) در ارزیابی اثر برگ‌پاشی آهن و روی از منابع کلاتی و سولفات‌های بر ویژگی‌های کیفی و عملکرد ذرت گزارش کردند که بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیک با میانگین $37/61$ تن در هکتار از کاربرد توام محلول‌پاشی آهن و روی بدست آمد.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارهای محلول پاشی بر عملکرد و کیفیت علوفه در ذرت علوفه‌ای

Table 5- Analysis of variance of the effect of foliar spray treatment on yield and quality of forage in forage corn

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square			
		علوفه تر Fresh forage	علوفه خشک Dry forage	درصد پروتئین Protein percentage	عملکرد پروتئین Protein yield
بلوک Block	2	25838.40 ^{ns}	4817.67 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	79.31 ^{ns}
تیمار treatment	9	787997.86*	72724.13**	34.55**	13002.7**
خطا Error	18	226505.07	7019.46	0.259	236.50
ضریب تغییرات C.V (%)		7.91	5.59	4.33	8.59

ns, ** و * به ترتیب غیر معناداری و معناداری در سطح احتمال یک و پنج درصد می‌باشد.

ns, * and ** are non-significant, significant $P \leq 0.05$ and $P \leq 0.01$, respectively.

کردند با افزایش کود آهن تا سطح بهینه کودی براساس آزمون خاک (سطح ۶۰ کیلوگرم) درصد پروتئین نسبت به شاهد افزایش داشته است، ولی از سطح ۶۰ کیلوگرم به بعد میزان پروتئین کاهش می‌یابد. همچنین از لحاظ آماری اختلافی بین سطوح ۳۰ و ۹۰ کیلوگرم دیده نشد. سفیان و همکاران (Safyan et al., 2012) در محلول پاشی عناصر ریزمغذی بر رشد کمی و کیفی ذرت گزارش کردند که درصد پروتئین دانه تحت تأثیر محلول پاشی در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد. نتایج حاصل از پژوهش این محققان نشان داد که بیشترین میزان پروتئین دانه با میانگین ۱۶/۹۱ درصد مربوط به محلول پاشی آهن و روی و کمترین مقدار آن با میانگین ۱۴/۷ درصد در تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) بدست آمد. کمانی و عیسوند (Kamaei & Eisvand, 2020) در بررسی اثر محلول پاشی آهن، روی و منگنز بر صفات فیزیولوژیک، زراعی و پروتئین گندم تحت تنش گرمای انتهای فصل گزارش کردند که برهمکنش تاریخ کاشت و کاربرد عناصر غذایی کم-مصرف بر محتوای پروتئین دانه گندم در سطح احتمال یک درصد معنی دار شد. محلول پاشی آهن، روی و منگنز موجب افزایش محتوای پروتئین دانه در هر دو تاریخ کاشت گردید که با توجه به نقش این عناصر در جذب و متابولیسم نیتروژن (مهمترین عنصر در افزایش محتوای پروتئین دانه) و بیوسنتز پروتئین‌ها از طریق تنظیم فعالیت پپتیدازها و کنترل متابولیسم آنها قابل توجیه است (Hansch & Mendel, 2009). یوسف پور و همکاران (Yousefpour et al., 2018) در بررسی تأثیر محلول پاشی آهن و روی در مراحل مختلف رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و کیفیت دانه ذرت شیرین گزارش نمودند که تیمارهای مصرف حاکی کودها، محلول پاشی آهن و روی در مرحله رشد رویشی، محلول پاشی در دو مرحله رشد رویشی و ظهور گل آذین نر و محلول پاشی در سه مرحله رشد رویشی، ظهور گل آذین نر و پر

درصد پروتئین: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثر تیمارهای محلول پاشی آهن و روی بر درصد پروتئین در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین درصد پروتئین اندام هوایی با میانگین ۱۷/۵۰ درصد از محلول پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد که نسبت به محلول پاشی روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی و محلول پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی به ترتیب افزایشی معادل ۵/۰۲ و ۱۴ درصد را نشان داد (جدول ۶). نتایج حاصل از این پژوهش حاکی از آن است که محلول پاشی توام آهن و روی اثر بیشتری بر درصد پروتئین در مقایسه با محلول پاشی هر یک از عناصر آهن و روی به تنهایی دارد (جدول ۶). همچنین کمترین درصد پروتئین نیز با میانگین ۶/۹۷ از تیمار شاهد (عدم محلول پاشی) بدست آمد (جدول ۶). درصد پروتئین به تغذیه گیاه بستگی دارد و تحت تأثیر تیمارهای کودی قرار می‌گیرد و استفاده از کودهای کم مصرف باعث افزایش پروتئین می‌شود (Whitty & Cham bliss, 2005). تحقیقات نشان می‌دهد مصرف برخی از عناصر ریزمغذی و از همه مهم‌تر عنصر روی باعث افزایش پروتئین خام در اندام‌های هوایی و دانه ذرت می‌شود (Ziaieian & Malakoti, 1998). در همین رابطه نبوی مقدم و همکاران (Nabavi Moghadam, 2013) در بررسی تأثیر کاربرد مقادیر مختلف آهن و منگنز بر صفات کمی و کیفی ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ آزمایشی به صورت فاکتوریل و در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با شانزده تیمار اجرا کردند. تیمارها شامل چهار سطح کود سولفات آهن (عدم مصرف کود به عنوان شاهد و مصرف ۳۰، ۶۰ و ۹۰ کیلوگرم در هکتار) بود که نتایج حاصل از پژوهش آنها نشان داد که اثر کودهای آهن بر درصد پروتئین در سطح احتمال پنج درصد معنی دار شد. آنها همچنین گزارش

کمی بود آهن، تعدادی از پروتئین‌ها تجزیه می‌شوند تا آهن در فتوسنتز گیاهان مورد استفاده قرار گیرد (Ceballos-Laita *et al.*, 2022) این امر نقش آهن در سنتز پروتئین محصول را نشان می‌دهد (Poursafar *et al.*, 2022).

عملکرد پروتئین: نتایج تجزیه واریانس داده‌ها حاکی از آن است که اثر تیمارهای محلول‌پاشی بر عملکرد پروتئین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های تیمارهای مورد بررسی نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد پروتئین با میانگین ۳۱۰/۷۵ گرم در متر مربع از محلول‌پاشی آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی بدست آمد که نسبت به محلول‌پاشی روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی و محلول‌پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگی به ترتیب افزایشی معادل ۱۹/۵۰ و ۳۰/۴۴ درصد را نشان داد (جدول ۶). همچنین محلول‌پاشی آهن و روی در مرحله ۴ و مرحله ۸ برگی به ترتیب نسبت به عدم محلول‌پاشی افزایشی معادل ۵۵/۰۵ و ۵۰/۴۸ را نشان داد (جدول ۶). همچنین کمترین مقدار عملکرد پروتئین با میانگین ۸۵ گرم در متر مربع از تیمار شاهد (عدم محلول‌پاشی) بدست آمد (جدول ۶).

شدن دانه درصد پروتئین دانه‌های ذرت را به ترتیب ۱۱، ۹، ۱۸ و ۱۵ درصد افزایش داد. همچنین نریمانی و همکاران (Narimani *et al.*, 2010) طی بررسی که انجام دادند، مشاهده کردند که کاربرد آهن و روی افزایش معنی‌داری را در درصد پروتئین دانه‌های ذرت باعث می‌شود. این پژوهشگران مشاهده نمودند که کاربرد توام کودهای آهن و روی افزایش بیشتری را در درصد پروتئین باعث می‌گردد. در همین راستا پورصفر و همکاران (Poursafar *et al.*, 2022) در مطالعه اثر محلول‌پاشی آهن و روی و زمان‌های برداشت بر جوانه‌زنی و برخی ویژگی‌های بیوشیمیایی سویا رقم ویلیام بیان کردند بیشترین درصد پروتئین بذر سویا با میانگین ۴۰/۳ درصد از تیمار سولفات آهن در زمان برداشت غلاف خشک و کمترین مقدار آن با میانگین ۲۶/۲ درصد مربوط به تیمار شاهد بود.

افزایش پروتئین دانه در اثر کاربرد آهن در سویا (Jat *et al.*, 2021) گندم (Yasmeen *et al.*, 2016) گزارش شده که مطابق با یافته‌های این پژوهش می‌باشد. در توجیه این امر می‌توان به افزایش میزان نیتروژن در گیاه اشاره نمود (جدول ۴) که آن نیز به نوبه خود تحت تأثیر آنزیم رداکتاز است (El-Habbasha *et al.*, 2015) که در اثر

جدول ۶- نتایج مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای محلول‌پاشی بر عملکرد و کیفیت علوفه در ذرت علوفه‌ای

Table 6- Comparison of the average the effect of foliar spray treatment on yield and quality forage in forage corn

تیمارها Treatments	علوفه تر Fresh forage (g m ⁻²)	علوفه خشک Dry forage (g m ⁻²)	درصد پروتئین اندام هوایی Plant protein content (%)	عملکرد پروتئین اندام هوایی Protein yield (g m ⁻²)
عدم محلول‌پاشی (شاهد) Blank	4872c	1218e	6.79g	85h
مرحله ۴ برگی 4 leaf stages				
محلول‌پاشی روی Zinc foliar spraying	5824b	1318e	11.04d	145.54efg
محلول‌پاشی آهن Iron foliar spraying	5784b	1440d	11.17d	160.77ef
محلول‌پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	6156ab	1500bc	12.60c	189.10d
مرحله ۸ برگی 8 leaf stages				
محلول‌پاشی روی Zinc foliar spraying	5912b	1450cd	9.31e	135.02fg
محلول‌پاشی آهن Iron foliar spraying	6040b	1544bc	8.12f	125.75g
محلول‌پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	6208ab	1592bc	10.79d	171.67de
مرحله ۴ و ۸ برگی 4 and 8 leaf stages				
محلول‌پاشی روی Iron foliar spraying	6068b	1505bc	16.62b	250.13b
محلول‌پاشی آهن Iron foliar spraying	6372ab	1620b	13.30c	216.15c
محلول‌پاشی آهن و روی Iron and zinc foliar spraying	6892a	1774.40a	17.50a	310.75a

ستون‌های دارای حداقل یک حرف لاتین مشترک، به روش آزمون LSD تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

Means followed with the same letters in each column are not significant at $p < 0.05$ by LSD Test.

دانه در گیاه گندم می‌گردد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که بیشترین مقدار غلظت آهن اندام هوایی با میانگین ۱۷۵/۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم از محلول پاشی آهن در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگه بدست آمد که نسبت به محلول پاشی آهن در مرحله ۸ برگه و مرحله ۴ برگه افزایشی معادل ۲۲/۷۳ و ۳۴/۳۹ درصد را نشان داد. همچنین بیشترین مقدار غلظت روی اندام هوایی با میانگین ۷۱/۰۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم در گیاه ذرت علوفه‌ای در تیمار محلول پاشی روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگه دیده شد که نسبت به تیمار شاهد ۸۹/۸۶ درصد غلظت روی را افزایش داد. بیشترین مقدار عملکرد و درصد پروتئین به ترتیب با میانگین ۳۱۰/۷۵ گرم بر متر مربع و ۱۷/۵۰ درصد از محلول پاشی همزمان آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگه بدست آمد که نسبت به محلول پاشی آهن و روی در مرحله ۴ و ۸ برگه به ترتیب با میانگین ۱۸۹/۱۰ و ۱۷۱/۶۷ گرم بر متر مربع و ۱۲/۶۰ و ۱۰/۷۹ درصد افزایشی معادل با ۱۹/۵۰، ۳۰/۴۴، ۵/۰۲ و ۱۴ درصد داشت که نشان می‌دهد که محلول پاشی همزمان آهن و روی در هر دو مرحله اثر بیشتری بر صفات مورد مطالعه در مقایسه با محلول پاشی هر یک از عناصر آهن و روی به تنهایی دارد. از این رو برای داشتن علوفه‌ای با خصوصیات کمی و کیفی مناسب، محلول پاشی همزمان آهن و روی در هر دو مرحله ۴ و ۸ برگه توصیه می‌شود.

کمبود آهن از دیگر اختلالات تغذیه‌ای شایع در بین گیاهان عالی که در خاک‌های آهکی و قلیایی رشد می‌کنند، است (Baybordi, 2006). آهن به مقدار زیاد در کلروپلاست و میتوکندری سلول‌های گیاهی مورد نیاز است و به عنوان کوفاکتور در چندین پروتئین در زنجیره انتقال الکترون نقش دارد (Astolfi et al., 2010). کمبود آهن گرهک‌ها نقش مهمی در احیا آهن فریک دارند و جذب آهن را افزایش می‌دهند. مقدار بالای آهن در گرهک سبب فعالیت نیتروژناز می‌شود، آمونیوم تولید شده برای ساخت اسکلت کربنی و سنتز اسیدهای آمینه استفاده می‌شود که در نهایت باعث افزایش میزان پروتئین می‌شود (Slatni et al., 2011). همچنین کاکمک و همکاران (Cakmak et al., 2010) گزارش کردند که کمبود آهن به دلیل تأثیر مستقیم آهن بر سنتز پروتئین، مقدار کل پروتئین‌ها را کاهش می‌دهد. عنصر روی به عنوان اجزای فلزی آنزیم‌های مختلف عمل می‌کند و همچنین به عنوان یک کوفاکتور عملکردی، ساختاری و تنظیمی در ارتباط با متابولیسم ساکارید، فتوسنتز و ساخت پروتئین نقش دارد از اینرو عنصر روی احتمالاً عملکرد محصول را افزایش می‌دهد (Yassen et al., 2010). اصلاح کمبود آهن در خاک‌های آهکی از طریق محلول پاشی سولفات آهن یا محلول پاشی کلات آهن می‌تواند کارآمدتر از کاربرد خاکی کودهای حاوی آهن باشد (Fageria et al., 2010). در همین راستا ابراهیمی و همکاران (Ebrahimi et al., 2022) گزارش کردند که کاربرد آهن و روی در افزایش میزان کلروفیل و فتوسنتز مؤثر است و انجام محلول پاشی در زمان ساقه‌دهی که بیشترین جذب مواد غذایی در این مرحله صورت می‌گیرد باعث افزایش رشد رویشی گیاه و سبب افزایش نیتروژن برگ و دانه و در نتیجه باعث افزایش عملکرد پروتئین

References

- Abbasi, N., Cherayhi, J., & Hajinia, S. (2019). Effect of iron and zinc micronutrient foliar application as nano and chemical on physiological traits and grain yield of two bread wheat cultivars. *Scientifi Journal of Crop Physiology*, 11(43), 85-104. (In Persian)
- APHA. (1992). *Standard methods for the Examination of water and wast water*. 18th Edition; APHA; AWWA.
- Astolfi, S., Zuchi, S., Hubberten, H.M., Pinton, R., & Hoefgen, R. (2010). Supply of sulphur to S-deficient young barley seedlings restores their capability to cope with iron shortage. *Journal of Experimental Botany*, 61, 799-806.
- Bagheri Dehabadi, M., Moghadam, H., Chaichi, M.R., & Ziloe, N. (2017). The mycorrhiza and iron and zinc foliar application on quantitative and qualitative characteristics of forage sorghum. *Journal of Crops Improvement*, 19(3), 799-815. <https://doi.org/10.22059/jci.2017.60466>
- Baniabbass, Z., Zamani, G., & Sayyari, M. (2012). Effect of drought stress and zinc sulfate on the yield and some physiological characteristics of sunflower (*Helianthus. annuus* L.). *Environmental Biology*, 6, 518-525.
- Baybordi, A. (2006). *Zhich in soils and crop nutrition*. Parivar Press. First Edition. P 179.
- Borlina, M.N., Bovi, O.M., & Granja, N.P. (2001). Essential oil production and quality of *Mentha arvensis* grown in nutrient solution. *Acta Horticultural*, 548, 181-188.
- Bourang, Sh., Jahanbakhsh Gedakahriz, S., & Ebadi, A. (2019). The effect of cadmium chloride and foliar application of iron and zinc on biochemical characteristics wheat under hydroponic conditions. *Journal of Plant Process and Function*, 8(29), 1-13. (In Persian)
- Bozorgmehr, J., & Nastari Nasrabadi, H. (2014). Effect of planting dates and cultivars on corn forage yield and quality. *Applied Field Crops Research*, 27(104), 160-164. <https://doi.org/10.22092/aj.2014.101830>

10. Briat, J.F., Curie, C., & Gaymard, F. (2007). Iron utilization and metabolism in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 10, 276-282.
11. Cakmak, I., Wolfgang, H., Feiffer, P., & McClafferty, B. (2010). Biofortification of Durum wheat with zinc and Iron. *Published by AACCI International, Inc.* 87(1), 10-20.
12. Ceballos-Laita, L., Takahashi, D., Uemura, M., Abadía, J., López-Millán, A.F., & Rodríguez-Celma, J. (2022). Effects of Fe and Mn deficiencies on the root protein profiles of tomato (*Solanum lycopersicum*) using two-dimensional electrophoresis and label-free Shotgun analyses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(7), 3719. <https://doi.org/10.3390/ijms23073719>
13. Dianati, T.G.A., Salehi, S., & Sadati, E. (2015). Effect of salinity stress (Na₂SO₄) on Forage quality of *Medicago polymorpha* and *Medicago scutellata*. *Watershed Management Research Journal*, 28(2), 57-65. <https://doi.org/10.22092/wmej.2015.107085>
14. Ebrahimi Z, Biabani, A., Mohammadi, R., Sabouri, A., Rahemi, H., & Karizaki, A. (2022). Response of physiological and biochemical characteristics of Aseman wheat cultivar to foliar application Zinc and Iron micronutrient in dryland conditions. 14(41), 53-62.
15. Ehsanullah, F., Tariq, A., Randhawa, M.A., Anjum, S.A., & Nadeem, M. (2015). Exploring the role of zinc in maize (*Zea mays* L.) through soil and foliar application. *Universal Journal of Agricultural Research*, 3(3), 69-75. <https://doi.org/10.13189/ujar.2015.030301>
16. El-Habbasha, E.S., Badr, E.A., & Latef, E.A. (2015). Effect of zinc foliar application on growth characteristics and grain yield of some wheat varieties under Zn deficient sandy soil condition. *International Journal Chemtech Research*, 8(6), 452-458.
17. Erdal, I., Kepenek, K., & Kizilgoz, I. (2004). Effect of foliar iron applications at different growth stages on iron and some nutrient concentrations in strawberry cultivars. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28(6), 421-427.
18. Fageria, N.K. (2010). *The use of nutrients in crop plants*, CRC Press.
19. Fageria, N.K., Barbosa, F.M.P., Moreira, A., & Guimaraes, C.M. (2009). Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 32, 1044-1064.
20. FAO, (2014). Statistical Database of the Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAO, Rome.
21. Farahani, I., Tahmasebizadeh, H., & Salehi, M. (2015). 'Effect of Fe, Zn and Mn foliar application on mineral contents and yield quality in sorghum', *New Finding in Agriculture*, 9(4), 275-286.
22. Farajzadeh Memari Tabrizi, E., Yarnia, M., Ahmadzadehv., & Farajzadeh Memari Tabrizi, N. (2011). Effect of micronutrients application methods on concentration of elements in leaf and kernel of *Zea mays* L. cv. Jeta. *Agroecology Journal*, 6(21), 67-74.
23. Ganesh, S., & Kannan, M. (2013). Essentiality of micronutrients in flower crops: A review. *Journal of Agriculture and Allied Sciences*, 2(3), 52-57.
24. Ghaffari Malayeri, M., Akbari, G.A., & Mohammadzadeh, A. (2012). Response of yield and yield components of corn on soil use and foliar application of micronutrients. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 10(2), 368-373. <https://doi.org/10.22067/gsc.v10i2.16239>
25. Hansch, R., & Mendel, R.R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion of Plant Biology*, 12, 259-266.
26. Hashempour Baltourk, F., Majidian, M., Esfahani, M., & Rabiei, B. (2013). Effect of sowing date on yield and quality of six forage maize cultivars in Rasht Region. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 44(4), 657-666. <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2013.50335>
27. Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (2005). Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management (515: 97-141). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
28. Heidarian, A.R., Kord, H.K., Mostafavi, A., Parviz Lak, & Amini Mashhadi, F. (2011). Investigating Fe and Zn foliar application on yield and its components of soybean (*Glycine max* L. Merr.) at different growth stages. *Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development*, 3(9), 189.
29. Hemant Ranjan, A. (1996) Physiology and biochemical significance of zinc in plants. *Advant of Micro Research*, 4, 151-178.
30. Jat, G., Sharma, S.K., Meena, R.H., Choudhary, R., Choudhary, R.S., & Yadav, S.K. (2021). Studies on effect of zinc application on quality and yield of soybean (*Glycine max* L.) under typic haplustepts soil. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, 9(1), 188-193.
31. Jones Jr, J.B., & Case, V.W. (1990). *Sampling, handling and analyzing plant tissue samples*. Sampling, handling and analyzing plant tissue samples., (Ed. 3). 389-427.
32. Kamaei, H., & Eisvand, H.R. (2020). Effect of iron, zinc and manganese foliar application on the physiological, agronomic traits and protein of wheat under late season heat stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(1), 285-295. <https://doi.org/10.22077/escs.2019.1888.1452>
33. Kazemiposhtmasari, H., Bahmanyar, M.A., Pirdasht, H., & Ahmadishad, M.A. (2008) Effects of Zn rates and application forms on protein and some micronutrients accumulation in common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Asian Journal of Biological Science*, 11, 1042-1046.

34. Keshavarz, L., Farahbakhsh, H., & Golkar, P. (2013) Effect of Hydrogel and irrigation regimes on chlorophyll content, nitrogen and some growth indices and yield of forage Millet (*Pennisetum glaucum* L.). *Journal of Crop Production and Processing*, 3(9), 147-161.
35. Khalafi, A., Mohsenifar, K., Gholami, A., & Barzegari, M. (2022). Effect of foliar application of Iron and Zinc from chelate and sulfate sources on growth and yield of maize, at Dezful Province of Khuzestan. *Journal of Crop Ecophysiology*, 16(61(1)), 131-146. <https://doi.org/10.30495/JCEP.2022.1909162.1712>
36. Khalili Mahalleh, J., & Roshdi, M. (2008). Effect of foliar application of micro nutrients on quantitative and qualitative characteristics of 704 Silage corn in Khoy. *Seed and Plant Journal*, 24(2), 281-293. <https://doi.org/10.22092/spij.2017.110804>
37. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd Ed. Academic Press, London, 889 p.
38. Mirlohi, A., Bozorgvar, N., & Basiri, M. (2000). The effect of different amounts of nitrogen fertilizer on growth, yield and quality of three hybrid forage sorghum silage. *Journal of Sciences and Techniques in Natural Resources*, 4(2), 105-115. (In Persian)
39. Mirzavand, J., Chehrengar, M., & Zare, M. (2020). Effect of saline irrigation water and application methods of iron and zinc on yield and quality of corn silage in a calcareous soil. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, 13(3), 953-967. <https://doi.org/10.22077/escs.2020.2250.1573>
40. Mortvert, J., Chairman, J., Giordano, P.M., & Lindsay, W.L. (1972). Micronutrient in agriculture. *Soil Science Society of America Journal*, 666.
41. Nabavi Moghadam, R., Saberi, M.H., & Sayyari, M.H. (2013) Effect of soil application of Iron and Manganese Sulfate on quantitative and qualitative characteristics of forage maize hybrid single cross 704. *Journal of Crop Improvement*, 15(2), 75-86.
42. Narimani, H., Mehdi Rahimi, M., Ahmadikhah, A., & Vaezi, B. (2010). Study on the effects of foliar spray of micronutrient on yield and yield components of durum wheat. *Archives of Applied Science Research*, 2(6), 168-176.
43. Pais, I., & Jones Jr., J.B. (1997). *The handbook of the tract element*. Published by St . Luice Press.
44. Poursafar, A., Sedghi, M., Seyed Sharifi, R., & Hasanzadeh, M. (2022). Effect of iron and zinc spraying and harvesting times on germination and some biochemical characteristics of soybean cultivar Williams 82. *Journal of Plant Ecophysiology*, 13(47), 76-87.
45. Ramzan, Y., Hafeez, M.B., Khan, S., Nadeem, M., Batool, S., & Ahmad, J. (2020). Biofortification with zinc and iron improves the grain quality and yield of wheat crop. *International Journal of Plant Production*, 49, 1-10.
46. Rawashdeh, H.M., & Florin, S. (2015). Foliar application with iron as a vital factor of wheat crop growth, yield quantity and quality: A Review. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 3(9), 368 -376.
47. Romheld, V., & Marchner, H. (1998). Mobilization of iron in the Philosophers of different plant species in advances in plant nutrition. www.springlink.com.
48. Sadeghi, E., Babalar, M., & Talaie, A. (2021). 'Effect of foliar application of iron and zinc on yield, quality and leaf and fruit nutrients concentrations of apple (*Malus domestica* cv. Gala)', *Iranian Journal of Horticultural Science*, 51(4), 965-978. <https://doi.org/10.22059/ijhs.2018.228844.1204>
49. Safyan, N., Reza Naderi darbaghshahi, M., & Bahari., B. (2012). The effect of microelements spraying on growth, qualitative and quantitative grain corn in Iran. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3, 2780-2784.
50. Slatni, T., Vigani, G., Salah, I.B., Kouas, S., Dell'Orto, M., Gouia, H., & Abdelly, C. (2011). Metabolic changes of iron uptake in N2-fixing common bean nodules during iron deficiency. *Plant Science*, 181(2), 151-158.
51. Vaghar, M.S. (2022). The effect of foliar feeding of iron, zinc and manganese nanochelates on chlorophyll fluorescence, iron, zinc and manganese concentration in seeds and soybean yield. *Applied Biology*, 12(46), 105-126.
52. Varnaseri Ghandali, V., & Nasiri Dehsorkhi, A. (2017). Investigation of foliar application of Zinc and Iron elements in nano form on growth and yield of cowpea under water deficit stress, 4(1), 109-136.
53. Von Braun, J., Byerlee, D., Chartres, C., Lumpkin, T., Olembo, N., & Waage, J.J., (2010). *A draft strategy and results framework for the CGIAR*. World Bank, CGIAR, Washington DC, USA.
54. Whitty, E.N., & Chambliss, C.G. (2005). *Fertilization of field and forage crops*. Nevada State University Publication. 240 p.
55. Yassen, A., Abou El-Nour, E.A.A., & Shedeed, S. (2010). Response of wheat to foliar spray with urea and Micronutrients. *Journal of American Science*, 6, 14-22.
56. Yasmeen, F., Raja, N.I., Razzaq, A., & Komatsu, S. (2016). Gel-free/label-free proteomic analysis of wheat shoot in stress tolerant varieties under iron nanoparticles exposure. *Biochim. Biophys. Acta Proteins Proteom*, 1864, 1586-1598.
57. Yousefi, Z., Sharifi, P., & Rabiee, M. (2023). Effect of foliar application of Zinc and Iron on seed yield and yield components of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Journal of Agricultural Science*, 45(1), 154-162.
58. Yousefpour, A., & Farajzadeh Memari Tabrizi, E. (2018). Evaluation of micronutrient application at different growth stages on yield and yield components and grain quality of sweet corn. *Journal of Crop Ecophysiology*, 12(46(2)), 287-302.

59. Zaman, Q., & Schumann, A.W. (2006). Nutrient management zones for citrus based on variation in soil properties and tree performance. *Precision Agriculture*, 7, 45-63.
60. Ziaei, S.M.M., Salimi, K., & Amiri, S.R. (2020). Investigation of quinoa cultivation (*Chenopodium quinoa* Willd.) under different irrigation intervals and foliar application in saravan region. *Crop Physiology Journal*, 12, 113-125. (In Persian)
61. Ziaei, A.H., & Malakoti, M.J. (1998). *Investigating effect of fertilizer with micronutrient and their time of application*. 1 st national congress of fertilizer and pesticides, Karaj, Iran, March 19.



Digital Mapping of Soil Texture Particles with Machine Learning Models and Environmental Covariates

P. Khosravani¹, M. Baghernejad^{2*}, A.A. Moosavi², S.R. FallahShamsi³

1 and 2- Department of Soil Science, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

(* - Corresponding Author Email: majidbaghernejad@yahoo.co.uk)

3- Department of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 12-09-2023
Revised: 13-11-2023
Accepted: 26-11-2023
Available Online: 27-11-2023

How to cite this article:

Khosravani, P., Baghernejad, M., Moosavi, A.A., & FallahShamsi, S.R. (2024). Digital mapping of soil texture particles with machine learning models and environmental covariates. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 923-942. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84413.1331>

Introduction

Understanding the particle size distribution (PSD) is of great importance for plant growth and soil management. In recent years, the science of soil has witnessed a significant increase in digital soil mapping (DSM) activities. In this regard, machine learning models (ML) have emerged as an alternative and tool for DSM, which are mainly used for data mining and pattern recognition purposes, and are now widely used for regression and classification tasks in all fields of science. Hence, this study was undertaken to spatially model sand, silt, and clay particles utilizing machine learning models such as Random Forest (RF), Support Vector Regression (SVR), and the Co-Kriging geostatistical model. Additionally, auxiliary variables with high spatial resolution were incorporated into the analysis. This investigation was conducted in a section of the Marvdasht plain, located in Fars province.

Materials and Methods

The present study was conducted in a part of Marvdasht plain located between 35.82°41'52" to 1.07°57'52" east longitude and 35.02°48'29" to 14.72°2'30" north latitude, and 40 km north of Shiraz with an area of about 50,000 hectares. After determining the study area boundaries, the positions of 200 sampling points were determined using the R software and the conditioned Latin hypercube sampling method. In other words, for soil feature modeling, 200 samples were taken from two depths of zero to 30 and 30 to 60 centimeters in the study area. Then, the samples were transferred to the laboratory, dried, and passed through a 2 mm sieve. Finally, the soil texture components were measured by the hydrometer method. The environmental variables used in this study are a wide range of representatives of soil-forming factors that were prepared as much as possible from sources with minimum cost and high accessibility. In total, 75 environmental variables were prepared, and the raster format related to all environmental variables, including 39 elevation and altitude variables and 36 remote sensing measurement variables, was extracted. Finally, the factor-tuning inflation variance and Boruta algorithm were used to select the optimal variables.

Results

The minimum amount of clay was measured at 10.21% and 10.45%, respectively, and the maximum amount was 32.65% and 36.35% at the surface and subsurface depths. The average amount of clay in all samples was 37.91% and 35.61%. The average amount of sand was measured at 25.65% and 26.02% at the surface and subsurface depths, respectively. The maximum amount of sand was observed in the northern and higher parts of the study area and was



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84413.1331>

equal to 54.68% and the minimum amount was predicted in the low-lying areas of the study area. Low-lying areas and sedimentary plains in the central part of the study area contained high amounts of silt. Four depth variables valley depths (VD), texture (TE), topographic wetness index (TWI), and clay index (CI) related to geomorphometric parameters and the normalized difference vegetation index (NDVI) variable related to remote sensing indices were selected as optimal variables. The RF model with R^2 of 54.0% and 36.0% for predicting sand, 48.0% and 64.0% for predicting silt, and 52.0% and 49.0% for predicting clay at both surface and subsurface depths performed better than the SVR and Co-Kriging models. The most effective variable in predicting the spatial distribution of soil particles was VD with relative importance of 60% and 65% for predicting sand at the surface and subsurface depths, 70% for predicting silt at the surface depth, and 70% and 65% for predicting clay at both surface and subsurface depths, respectively. Only TE and TWI variables were more important than VD for predicting silt at subsurface depth. These results show that topographic variables are effective in the spatial variation of soil particles. Unlike clay, the highest amount of sand in both depths was observed in the northern part and the highest part of the study area, and the lowest amount was predicted in the low-lying areas of the study area.

Conclusion

In general, with the aim of this research, maps of the spatial distribution of soil texture components were prepared at both surface and subsurface depths using machine learning and geostatistical approaches along with environmental covariates in a part of Marvdasht plain. Among the selected environmental covariates, topographic attributes, especially the valley depth (VD), had the highest effect in justifying the spatial prediction of soil texture components. Also, the results of comparing the performance of machine learning models supported the higher efficiency of the RF model than other models. Therefore, the approach used in this study to prepare a map of soil texture components can be useful as a guide for mapping useful soil features in areas with similar climatic and topographic conditions.

Keywords: Co-Kriging, Digital soil mapping, Machine learning, Random Forest, Soil particle size distribution

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۴۲-۹۲۳

نقشه برداری رقومی اجزای بافت خاک با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین و متغیرهای محیطی

پگاه خسروانی^۱ - مجید باقرنژاد^{۱*} - سید علی اکبر موسوی^۲ - سید رشید فلاح شمسی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۵

چکیده

بافت به عنوان یکی از ویژگی‌های موثر بر وضعیت هیدرولوژیکی و مکانیکی خاک از اهمیت ویژه‌ای برای رشد گیاهان برخوردار است. بنابراین، مطالعه حاضر با هدف مدل‌سازی مکانی ذرات خاک شامل شن، سیلت و رس با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و مدل زمین‌اماری کوکریجینگ (Co-Kriging) و نقشه مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای با وضوح مکانی بالا در دشت مرودشت استان فارس انجام گرفت. مطالعات میدانی شامل حفر ۲۰۰ پروفیل مشاهداتی براساس روش نمونه‌برداری ابر مکعب لاتین (cLHS) و نمونه‌برداری از دو عمق، سطحی (۳۰ سانتی‌متر) و زیرسطحی (۶۰-۳۰ سانتی‌متر) بود. طیف وسیعی از متغیرهای کمکی با دسترسی آسان شامل پارامترهای توپوگرافی و شاخص‌های سنجش از دور به عنوان پیش‌بینی کننده‌های محیطی با وضوح مکانی ۳۰ متر تهیه گردید. مناسب‌ترین متغیرهای کمکی با استفاده از آزمون هم‌خطی توسط شاخص تورم واریانس (VIF) و سپس رویکرد انتخاب متغیر باروتا انتخاب شد. نتایج نشان داد که مدل RF نسبت به مدل‌های SVR و Co-Kriging دارای عملکرد بهتر و دقت بیشتر برای پیش‌بینی هر سه ذره شن، سیلت و رس است. ضریب تبیین (R^2) پیش‌بینی شده برای رس در عمق سطحی و زیر سطحی به ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۴۹، برای سیلت ۰/۴۸ و ۰/۶۴ و برای شن ۰/۵۴ و ۰/۳۶ درصد محاسبه شد. همچنین متغیر عمق دره مهمترین متغیر در پیش‌بینی توزیع مکانی شن، سیلت و رس شناسائی شد. تهیه نقشه توزیع مکانی اندازه ذرات خاک حاصل می‌تواند منبع مهمی از اطلاعات برای مدیریت کارآمد منابع زمین و نظارت بر محیط‌زیست باشد. به‌طور کلی رویکرد مورد استفاده در این تحقیق به دلیل استفاده از منابع اطلاعاتی با دسترسی آسان و ارزان می‌تواند به عنوان راهنمایی برای تهیه نقشه‌های مدیریت‌پذیر خاک در دشت‌های کشاورزی کشور با قابلیت به‌روزرسانی در حداقل زمان ممکن مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه ذرات خاک، جنگل تصادفی، کوکریجینگ، نقشه‌برداری رقومی، یادگیری ماشین

مقدمه

بالایی برخوردار است (Parent et al., 2021). بنابراین، به‌طور مستقیم کیفیت خاک را کنترل کرده و برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی بسیار پرکاربرد می‌باشد (de Jesus Duarte et al., 2019). PSD همچنین نقش کلیدی برای درک پیدایش و توزیع خاک ایفا کرده و با استفاده از آن می‌توان درجه پدوژنتیک و نرخ هوازدگی را تخمین زد (Lucas et al., 2019). تغییرپذیری عمودی و افقی بافت خاک توسط بسیاری از

بافت خاک به عنوان یکی از شاخص‌های مهم کیفیت خاک بر روی بسیاری از خصوصیات فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، هیدرولوژیکی و مکانیکی خاک مؤثر است (Hossain et al., 2018). آگاهی از توزیع اندازه ذرات خاک^۳ (PSD) برای رشد گیاه و مدیریت خاک از اهمیت

۱ و ۲- گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: majidbaghernejad@yahoo.co.uk)

۳- گروه مهندسی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

متقابل متعدد ساده نیست و چالش‌های بیشتری دارد. در مناطق ناهمگن، مدل تغییرات مکانی (یعنی واریوگرام) نیز نمی‌تواند تغییرات تدریجی و ناگهانی در تغییرات خاک را ثبت کند. در نهایت، اگر حجم نمونه و یا تعداد مکان‌های پیش‌بینی زیاد باشد، مدل‌های زمین‌آماري از لحاظ محاسباتی ضعیف هستند (Paramasivam, 2019). بنابراین در اغلب موارد داده‌های خاک و تقاضای کاربر، انطباق با این مفروضات را به یک کار چالش برانگیز تبدیل می‌کند.

رویکردهای یادگیری ماشین^۴ (ML)، به‌عنوان ابزاری مفید برای DSM می‌باشند (Padarian et al., 2019)، و تکنیک‌های ML به دسته بزرگی از الگوریتم‌های مبتنی بر داده‌های غیرخطی اشاره می‌کنند که عمدتاً برای اهداف داده‌کاوی و تشخیص الگو به کار می‌روند، و اکنون اغلب برای کارهای رگرسیون و طبقه‌بندی در همه زمینه‌های علم استفاده می‌شوند (Wang et al., 2020). بر خلاف روش‌های زمین‌آماري که معمولاً برای برآورده کردن مفروضات تغییر مشاهدات اصلی لازم است، الگوریتم‌های ML فرضی را از توزیع مشاهدات ایجاد نمی‌کنند. الگوریتم‌های ML همچنین می‌توانند تعداد زیادی متغیرهای همبسته متقابل را به‌عنوان پیش‌نمایش اداره کنند (Wadoux et al., 2020). با ظهور الگوریتم‌های ML مبتنی بر داده در علم خاک پیش‌بینی ویژگی‌های خاک مانند مدل‌سازی طبقات خاک (Poppiel et al., 2019)، ذخایر کربن خاک (Gomes et al., 2019) و بافت خاک (Malone & Searle, 2021) افزایش یافته است. در همین راستا مطالعاتی توسط محققین داخلی برای توسعه‌ی کاربرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در نقشه‌برداری خاک‌ها صورت پذیرفت که در آن صحرایی و همکاران (Sahraei et al., 2022) با استفاده از مدل‌های ماشین‌بردار پشتیبان و جنگل تصادفی اقدام به تهیه‌ی نقشه‌های رقومی اجزای بافت خاک در بخشی از اراضی دشت خوزستان نمودند و نتایج ایشان بیانگر کارایی بالاتر مدل جنگل تصادفی نسبت به ماشین‌بردار پشتیبان بود. همچنین در مطالعه دیگری که موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2021) در ارزیابی کارایی مدل‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی وضعیت شوری خاک در اعماق سطحی و زیرسطحی پرداختند و نتیجه گرفتند که دو مدل کیوبیست و جنگل تصادفی نسبت به سایر مدل‌های یادگیری ماشین مورد استفاده از کارایی بالاتری برخوردار بودند بنابراین با توجه به پتانسیل بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مدل‌سازی و تفسیر روابط خاک-زمین‌نما به‌عنوان ابزاری کارا در سایر دشت‌های کشاورزی کشور نیز نیاز به ارزیابی کارایی آن‌ها احساس می‌شود (Mousavi et al., 2021).

از آنجایی که محصولات زراعی گندم، جو، کلزا و یونجه به‌عنوان

فرآورده‌ها و عوامل مرتبط با پدوژنز مانند جابه‌جایی عمودی ذرات^۱ در پروفیل خاک، حذف سطحی، تجمع و مواد مادری کنترل می‌شود (Zhang et al., 2023).

علی‌رغم اهمیت ویژگی‌های خاک مرتبط با PSD، کمبود اطلاعات مکانی درمورد آن‌ها در بسیاری از کاربری‌های اراضی وجود دارد (Chen et al., 2021). بنابراین، به‌روز رسانی و گسترش پایگاه‌های داده PSD خاک که به‌طور خاص برای برنامه‌های مدل‌سازی طراحی شده‌اند، حیاتی است. در سال‌های اخیر، علم خاک شاهد افزایش قابل توجهی در فعالیت‌های نقشه‌برداری رقومی خاک^۲ (DSM) بوده است. این امر ناشی از همگرایی چندین عامل همزمان از جمله، تقاضای زیادی برای اطلاعات کمی و مکانی خاک، انباشتگی پایگاه‌های اطلاعاتی ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده همراه با متغیرهای محیطی کاملاً شناخته‌شده، و توسعه مدل‌های عددی ترکیبی با استفاده از منابع کامپیوتری برای استخراج این ذخایر داده‌های خاک است (Arrouays et al., 2020).

چارچوب DSM با توسعه‌ی مدل فاکتوریل ینی (Jenny, 1941) توسط مک براتنی و همکاران (McBratney et al., 2003) با عنوان مدل اسکورپین^۳ رسمیت یافت، که در آن با استفاده از روش‌های آماری و ریاضیاتی مختلف و کمی‌سازی متغیرهای محیطی (نمایندگان فاکتورهای خاک‌سازی) اقدام به پیش‌بینی مکانی خصوصیات یا کلاس‌های خاک می‌شود.

به‌طور متعارف، پیش‌بینی مکانی خاک در چارچوب مدل‌های زمین‌آماري تعبیه شده است (Ma et al., 2019) که در آن نمونه‌ای از یک ویژگی خاک به‌عنوان مجموع ترکیب خطی متغیرهای محیطی و یک باقیمانده هم‌بسته (تصادفی) مدل‌سازی می‌شود. مدل‌های زمین‌آماري اغلب در نقشه‌برداری خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند زیرا دارای مزایای متعددی هستند (Radočaj et al., 2022). اول، امکان تفسیر فرآورده‌های فیزیکی زیربنایی ارائه شده توسط مدل را فراهم می‌کند. ثانیاً، مدل‌سازی با توجه به همبستگی مکانی داده‌ها انجام می‌شود. این ویژگی برای متغیرهایی مانند خاک که از مکانی به مکان دیگر متفاوت است اما بین مکان‌ها همبستگی نشان می‌دهد، بسیار حائز اهمیت می‌باشد. سوم امکان اندازه‌گیری عدم قطعیت مدل‌سازی وجود دارد. در بسیاری از شرایط مانند یک تصمیم‌گیری پیش‌بینی تنها معیار نیست و نیاز به نقشه‌های عدم قطعیت می‌باشد. نقشه‌برداری زمین‌آماري خاک، همچنین، دارای محدودیت‌های متعددی است. به‌عنوان مثال داده‌ها باید دارای توزیع نرمال، ثابت (میانگین و واریانس با واحد ثابت) و همسانگرد^۴ باشند (Paramasivam, 2019). همچنین مدل‌سازی رابطه غیرخطی بین یک ویژگی یا کلاس خاک و متغیرهای کمکی

4- isotropic
5- Machine Learning

1- Lessivage
2- Digital Soil Mapping
3- scorpan

نمونه‌برداری و مطالعات آزمایشگاهی

پس از تعیین منطقه مورد مطالعه، موقعیت ۲۰۰ نقطه نمونه‌برداری در منطقه توسط نرم‌افزار R نسخه‌ی ۴٫۱٫۳ با استفاده از روش ابرمکعب لاتین مشروط و دسته‌ای از متغیرهای محیطی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و داده‌های سنجش از دور (عمق دره، شاخص بافت پستی و بلندی، شاخص خیزی توپوگرافی، شاخص رس و شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده) تعیین گردید (Minasny et al., 2006). به عبارت بهتر، برای مدلسازی ویژگی‌های خاک، ۲۰۰ نمونه از دو عمق صفر تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر در منطقه مطالعاتی برداشته شدند. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده، هوا خشک گردیده و از الک دو میلی‌متر عبور داده شدند. در نهایت، اجزای بافت خاک به روش هیدرومتر، اندازه‌گیری گردید.

مراحل تحقیق

روند تهیه نقشه اجزای بافت خاک در منطقه مطالعاتی در پنج گام اصلی طراحی شد که شامل: ۱- نمونه‌برداری و جمع‌آوری اطلاعات خاک و متغیرهای محیطی از منطقه مطالعاتی، ۲- مدلسازی اجزای بافت خاک با استفاده از متغیرهای محیطی، روش‌های یادگیری ماشین و زمین آماری، ۳- اعتبارسنجی کارایی مدل‌ها در منطقه مطالعاتی، ۴- تهیه نقشه پیش‌بینی اجزای بافت خاک براساس بهترین مدل مکان مبنا، ۵- تعیین مهمترین فاکتورهای محیطی در پیش‌بینی اجزای بافت خاک.

متغیرهای محیطی و انتخاب آن‌ها

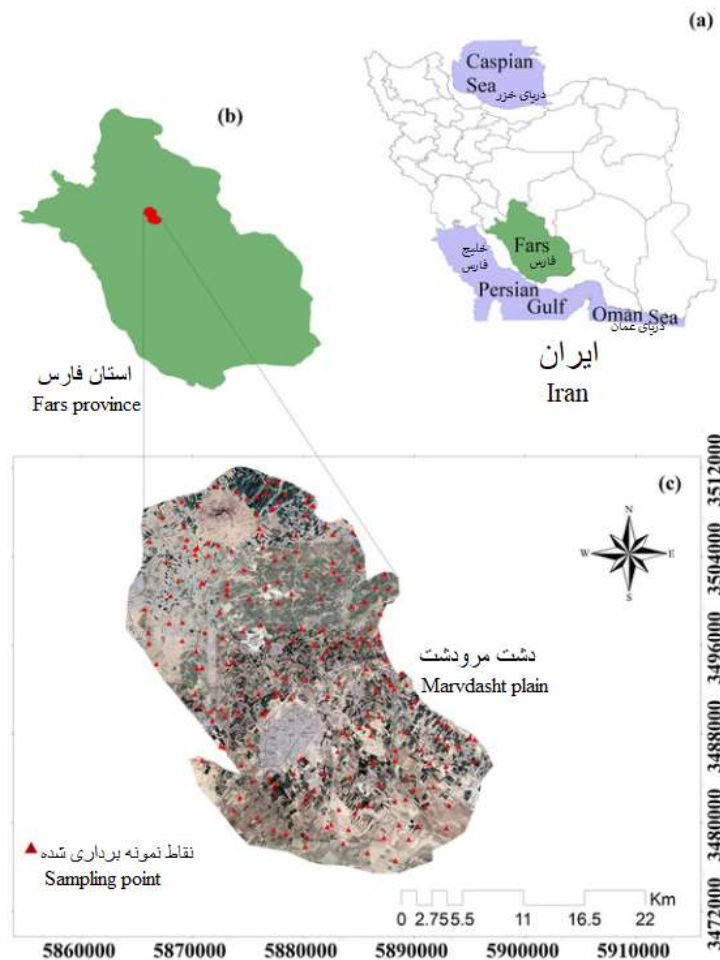
به منظور شناسایی عوامل کنترل‌کننده اجزای بافت خاک در هر لایه، متغیرهای مختلفی براساس مدل اسکورین (خاک، اقلیم، موجودات زنده، مواد مادری، پستی و بلندی، سن و موقعیت مکانی) انتخاب شدند (Mc Bratney et al., 2003). متغیرهای محیطی استفاده شده در این پژوهش شامل مجموعه گسترده‌ای از نمایندگان فاکتورهای خاکساز هستند که تا حد ممکن از منابع با حداقل هزینه و با دسترسی بالا تهیه گردیدند. این متغیرها برحسب فراوانی و امکان تهیه آن‌ها شامل مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع، شاخص‌های سنجش از دور بودند. متغیرهای محیطی پستی و بلندی از مدل رقومی ارتفاع با استفاده از نرم‌افزار SAGA GIS نسخه ۴٫۷ استخراج شدند. جهت بررسی تغییرپذیری مکانی اجزای بافت خاک از تصویر ماهواره لندست ۸ مربوط به بازه‌ی زمانی مطالعات میدانی مرداد ماه ۱۴۰۰ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده گردید همچنین قبل از استخراج شاخص‌های مورد نظر تصحیحات رادیومتری بر روی تصاویر انجام گردید. در نهایت شاخص‌های سنجش از دور نیز در محیط نرم‌افزار ENVI نسخه ۵٫۳ تهیه گردیدند.

اصلی‌ترین محصولات در الگوی کشت این دشت می‌باشند، بنابراین به عنوان یک منطقه استراتژیک در تولید محصولات کشاورزی لحاظ می‌شود و سالانه به صورت پیوسته تحت کشت می‌باشد دریافت اطلاعات دقیق از وضعیت پراکنش مکانی ویژگی‌های کلیدی و تأثیرگذار بر روی کیفیت و مدیریت خاک به ویژه بافت خاک بسیار مهم و ضروری می‌باشد. همچنین به دلیل نبود نقشه‌های خاک که بیانگر وضعیت تغییرات اجزای بافت خاک در منطقه می‌باشند بنابراین پژوهش حاضر با هدف افزایش اطلاعات در مورد ۱. تهیه نقشه‌های پیش‌بینی مکانی PSD خاک ۲. مقایسه مدل‌های یادگیری ماشین RF و SVR با مدل زمین آماری کوکریجینگ و ۳. شناسایی مهمترین متغیرهای پیش‌ران PSD در دو عمق سطحی (۳۰ سانتی‌متر) و زیر سطحی (۶۰-۳۰ سانتی‌متر) در بخشی از اراضی دشت مروودشت استان فارس انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر منطقه مورد مطالعه واقع در شهرستان مروودشت در فاصله‌ی ۴۰ کیلومتری شمال شهر شیراز مرکز استان فارس قرار دارد، که دارای مساحت حدود ۵۰ هزار هکتار بخشی از منطقه دشت مروودشت می‌باشد و در موقعیت طول‌های جغرافیایی $35^{\circ} 41' 52''$ تا $35^{\circ} 48' 29''$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $29^{\circ} 14' 17''$ تا $29^{\circ} 14' 17''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱-۱). متوسط ارتفاع از سطح دریای آزاد نیز ۱۶۰۰ متر می‌باشد. براساس طبقه‌بندی ماهر^۱ (Mahler, 1970) منطقه مطالعاتی دارای سه واحد فیزیوگرافی اصلی شامل کوهستان، دشت‌های دامنه‌ای و دشت‌های رسوبی بوده که براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط زینک (Zinck et al., 2015) از نظر ژئومورفولوژی در سه واحد زمین‌نمای اصلی شامل کوهستان، دشت‌های دامنه‌ای و دشت قرار می‌گیرد. برای تعیین اقلیم منطقه مطالعاتی از داده‌های دوره آماری ۳۰ ساله هواشناسی (۱۳۷۱-۱۴۰۰) توسط ایستگاه سد درودزن (سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۸) استفاده شد. میانگین بارندگی سالانه برای این منطقه $287/63$ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه نیز $17/80$ درجه سلسیوس می‌باشد. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی خاک‌های منطقه مطالعاتی به ترتیب زیریک و ترمیک است و این خاک‌ها در دوره رده اصلی انتی‌سول و اینسپتی‌سول قرار دارند. مواد مادری اصلی خاک در منطقه مورد مطالعه رسوبات آبرفتی، سنگ آهک، شیل و مارن خاکستری است که قدمت آن‌ها به دوره کواترنر می‌رسد. اطلاعات زمین‌شناسی از نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰۰ رقومی شده ایران جمع‌آوری شده است (Geology, 2010).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعاتی و محل‌های نقاط نمونه‌برداری

Figure 1- The location of study area and sampling points

جدول ۱- متغیرهای محیطی قابل استفاده برای پیش‌بینی اجزای بافت خاک

Table 1- The applied environmental covariates for predicting soil texture particles

References منابع	Covariates متغیرهای محیطی	Abbreviation علامت اختصاری	Formula فرمول	Source منشاء
U.S. Geology Survey 2014	Normalized different vegetation index شاخص نرمال‌شده گونه‌های مختلف گیاهی	NDVI	$(NIR+Red)/(NIR-Red)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Renormalized difference vegetation index شاخص مجدد نرمال‌شده گونه‌های مختلف گیاهی	RDVI	$(NIR+Red+L)/(NIR-Red)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Band 2 of Landsat 8 باند ۲ لندست ۸	Blue آبی	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Band 3 of Landsat 8 باند ۳ لندست ۸	Green سبز	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Band 4 of Landsat 8 باند ۴ لندست ۸	Red قرمز	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور

U.S. Geology Survey 2014	Band 5 of Landsat 8 باند ۵ لندست ۸	Near infrared نزدیک به فروسرخ	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Band 6 of Landsat 8 باند ۶ لندست ۸	Short-wave infrared-1 فروسرخ کوتاه موج - ۱	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Band 7 of Landsat 8 باند ۷ لندست ۸	Short-wave infrared-2 فروسرخ کوتاه موج - ۲	Landsat 8 image individual band تصویر لندست ۸ باند فردی	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Wetness brightness difference index شاخص تفاوت روشنایی رطوبت	WBDI	$(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Normalized difference salinity index شاخص نرمال شده تفاوت شوری	NDSI	$(Green-SWIR)/(Green+SWIR)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Normalized difference moisture index شاخص نرمال شده تفاوت رطوبت	NDMI	$(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Brightness Index شاخص روشنایی	BI	$(Red+Green+Blue)/3$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Gypsum Index شاخص گچ	GI	$(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Clay Index شاخص خاک رس	CI	$(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Carbonate Index شاخص کربنات	CI	$(SWIR1-SWIR2)/(SWIR1+SWIR2)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Ratio Vegetation Index شاخص نسبت گیاهی	RVI	Red / NIR	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Enhanced Vegetation Index شاخص گیاهی تقویت شده	EVI	$G \times (NIR-Red) / (NIR+C1 \times Red-C2 \times Blue+L)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Green-Red Vegetation Index شاخص گیاهی سبز-قرمز	GVI	$(Green-Red)/(Green+Red)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Differenced Vegetation Index شاخص تفاوت گیاهی	DVI	NIR-Red	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Infrared Percentage Vegetation Index شاخص درصد گیاهی مادون قرمز	IPVI	$(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Iron Oxide Ratio نسبت اکسید آهن	IOR		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Soil Adjusted Vegetation Index شاخص گیاهی تنظیم شده برای خاک	SVI	$(NIR-Red)/(NIR+Red+L)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Modified Soil Adjusted Vegetation Index شاخص گیاهی تنظیم شده تغییر یافته برای خاک	MSAVI	$(2 \times NIR+1)-(2 \times NIR+1)^2-8 \times (NIR-Red)/(($	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Perpendicular Vegetation Index شاخص گیاهی عمودی	PVI	$(Green-Red)/(Green+Red)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Structure Insensitive Pigment Index شاخص حساس به ساختار پیگمان	SIPI		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Modified Normalized Difference Water Index شاخص آب تفاوت نرمال شده تغییر یافته	MNDVI	$(Green-SWIR)/(Green+SWIR)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Enhanced Vegetation Index شاخص گیاهی تقویت شده	EVI	$G \times (NIR-Red) / ((NIR+C1 \times Red-C2 \times Blue+L)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Soil Adjusted Vegetation Index شاخص گیاهی تنظیم شده برای خاک	SAVI		RS سنجش از دور

U.S. Geology Survey 2014	Bare Soil Index شاخص خاک بی پوشان	BSI		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Index-Based built-up Index شاخص ساخت‌های مبتنی بر ایندکس	IBI		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Enhanced Vegetation Index 2 شاخص گیاهی تقویت شده ۲	EVI 2	$(NIR-Red)/(NIR+2.4 \times Red+1) \times 2.5$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Visible Atmospherically Resistance Index Green شاخص مقاومت اتمسفری قابل رؤیت - سبز	VARIGreen	$(Green-Red)/(Green+Red-Blue)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Green Normalized Difference Vegetation Index شاخص گیاهی نرمال شده تفاوت سبز	GNDVI	$(NIR-Green)/(NIR+Green)$	RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Tasseled cap wetness رطوبت تسلد کپ	TCW		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Tasseled cap greenness سبزی تسلد کپ	TCG		RS سنجش از دور
U.S. Geology Survey 2014	Normalized Ratio Vegetation Index شاخص نرمال شده نسبت گیاهی	NRVI	NIR/Red	RS سنجش از دور
Olaya (2004)	Wind Effect تاثیر باد	WE		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Analytical Hillshading تظلیل تحلیلی	AH		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Aspect جهت	Aspect		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Catchment Area منطقه‌ی آبگیر	CA		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Catchment Slope شیب حوضه	CS		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Channel Direction جهت رودخانه یا راهروی آبی	CD		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Channel Network Base Level سطح پایه شبکه رودخانه	CNBL		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Channel Network Distance فاصله شبکه رودخانه	CND		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Channel Network شبکه رودخانه	CN		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Closed Depressions تسلیمات بسته یا تسلیمات بسته شونده	CD		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Convergence Index شاخص همگرایی	CI		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Diffuse Insolation تشعشع پراکنده	Diffuse		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Direct Insolation تشعشع مستقیم	DI		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Flow Directions جهت جریان	FD		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Geomorphons ژئومورفونز	Geomorphons		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Landforms زمین شکل‌ها	Landforms		DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	LS Factor فاکتور طول و شیب	LS Factor		DEM نقشه رقومی ارتفاع

Olaya (2004)	Mass Balance Index شاخص تعادل جرم	MBI	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Modified Catchment Area ناحیه آبگیر تغییر یافته	MCA	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	MRRTF	MRRTF	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Plan Curvature انحنای مسطح	PC	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Relative Slope Position موقعیت نسبی شیب	RSP	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Slope Height ارتفاع شیب	SH	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Slope شیب	Slope	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Standardized Height ارتفاع استاندارد	SH	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Stream Power Index شاخص توان جریان	SPI	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Surface Area مساحت سطح	SA	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Watershed Basins حوضه آبخیز	WB	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Wind Exposition جهت باد	WE	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Valley depth (m) عمق دره	VD	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Multiresolution index of valley bottom flatness شاخص همواری دره با درجه وضوح بالا	MRVBF	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Normalized Height ارتفاع نرمال شده	NH	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Midslope position موقعیت میانی انحدار	MS	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Terrain surface texture بافت سطح زمین	TE	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Slope gradient شیب افقی	SG	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Vertical Distance to Channel Network فاصله عمودی تا شبکه رودخانه	VDCN	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Solar radiation or insolation تابش خورشیدی	SROI	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Convexity خمیدگی	Convexity	DEM نقشه رقومی ارتفاع
Olaya (2004)	Topographic Wetness Index شاخص توپوگرافیک رطوبت	TWI	DEM نقشه رقومی ارتفاع

S= soil properties ویژگی خاک، O=organism موجودات زنده، R=relief پستی و بلندی، LAB=laboratory analysis آنالیزهای آزمایشگاهی
DEM=Digital elevation model نقشه رقومی ارتفاع، RS=Remote sensing سنجش از دور.

متناسب با اندازه سلولی متغیرهای به‌دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای یکسان شد. تعداد بالای متغیرهای محیطی باعث ایجاد هم‌بستگی زیاد

در مجموع، ۷۵ متغیر محیطی تهیه شد **جدول ۱** که در نهایت فرمت رستری مربوط به تمام متغیرهای محیطی با اندازه سلول ۳۰ متر،

منزله نرمال بودن توزیع داده‌ها به‌عنوان مبنا قرار گرفت.

مدل‌سازی یادگیری ماشین (سناریو ۲)

براساس فراوانی مدل‌های یادگیری ماشین که در مدل‌سازی ویژگی‌های خاک قابل استفاده می‌باشند، در تحقیق حاضر تلاش شده است تا کارایی این مدل‌ها در مدل‌سازی اجزای بافت خاک در دو عمق مورد نظر در منطقه مطالعاتی، مورد ارزیابی قرار گیرد و در نهایت از بین مدل‌های پیش‌بینی کننده و متغیرهای محیطی بهینه انتخاب‌شده، بهترین مدل پیش‌بینی کننده اجزای بافت خاک به همراه متغیرهای محیطی بهینه انتخاب‌شده برای به‌دست آوردن ویژگی مورد پژوهش در منطقه مطالعاتی نیز استفاده گردید. مدل جنگل تصادفی (Bi *et al.*, 2004) یکی از مدل‌های یادگیری ماشین مبتنی بر سامانه‌های درختی است که امروزه به‌عنوان یکی از پرکارترین الگوریتم‌ها در نقشه برداری رقومی خاک محسوب می‌شود (Beriman, 2001)، نحوه آموزش مدل جنگل تصادفی، به‌گونه‌ای است که در آن هر درخت به‌وسیله روش جایگزینی با تکرار از میان مجموعه‌ای از درختان به‌صورت تصادفی انتخاب و آموزش می‌بیند و زیرمجموعه‌های پیش‌بینی کننده نیز بر اساس قوانین تقسیم گره به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردند.

بین آن‌ها می‌شود که نتیجه آن، کاهش سرعت محاسبات و کاهش صحت و اعتبار مدل‌های پیش‌بینی کننده می‌باشد. برای مدل‌سازی تغییرات اجزای بافت خاک در نقشه‌برداری رقومی، علاوه بر داده‌های مشاهداتی نیاز به داده‌های کمکی مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره‌ای نیز می‌باشد. بدین منظور ۳۹ متغیر پستی و بلندی و ۳۶ متغیر سنجش از دور استخراج گردید. با توجه به حجم زیاد داده‌های موجود برای استفاده در فرآیند مدل‌سازی، به‌عنوان متغیرهای پیش‌بینی کننده از روش فاکتور تورم واریانس و الگوریتم باروتا در نرم افزار SPSS (V.20) برای انتخاب مناسب‌ترین مجموعه داده از میان کل متغیرهای محیطی تهیه شده و انتخاب متغیرهای محیطی بهینه برای اجرای مدل با ارائه کمترین خطا ضروری می‌باشد.

مدل‌سازی مکانی

مدل‌سازی زمین‌آمار (سناریو ۱)

سناریو اول صورت پذیرفته در پژوهش حاضر به بررسی روش زمین‌آمار برای برآورد اطلاعات اجزای بافت خاک در اعماق سطحی (۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ cm) و زیر سطحی (۶۰-۳۰۰ cm) در منطقه مورد مطالعه پرداخته شد. تمامی آنالیزهای مورد استفاده در این بخش توسط نرم‌افزار Arc GIS نسخه 10.8 بخش Geostatistical Analyst براساس روش کو-کریجینگ (Co-Kriging) صورت پذیرفت و متغیرهای محیطی منتخب برای پیش‌بینی PSD با این روش در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین متغیرهای محیطی یا کمکی (Covariates) برای استفاده در روش کوکریجینگ به روش همبستگی پیرسون انتخاب گردیدند. قابل اشاره است که قبل از انجام برازش روش‌های زمین‌آماري بهتر است که از نرمال بودن توزیع داده‌ها اطمینان حاصل شود که در این پژوهش مقادیر چولگی بین ۱+ تا ۱- و افراستگی بین ۳+ تا ۳- به

جدول ۲- متغیرهای منتخب برای روش زمین‌آماري کوکریجینگ

Table 2- The selected covariates for Co-Kriging geostatistics method

Soil properties ویژگی‌های مورد مطالعاتی	Depths اعماق	Covariates 1 متغیر محیطی ۱	Covariates 2 متغیر محیطی ۲	Covariates 3 متغیر محیطی ۳
Sand شن	0-30	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	MRRTF	Valley depth عمق دره
	30-60	Valley depth عمق دره	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	
Silt سیلت	0-30	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	Valley depth عمق دره	MRRTF
	30-60	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	Slope شیب	Valley depth عمق دره
Clay رس	0-30	Convergence index شاخص همگرایی	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	Valley depth عمق دره
	30-60	Valley depth عمق دره	Watershed Basins حوضه‌های آبخیز	Slope شیب

متوسط، میزان $2 \leq RPD < 3$ دارای دقت رضایت بخش، میزان ۳ $RPD \geq 4$ دارای دقت خوب و میزان $4 \leq RPD$ دارای دقت عالی می‌باشد (Sørensen et al., 2004).

نتایج و بحث

خلاصه آماری اجزای بافت خاک

خلاصه آماری اجزای بافت خاک اندازه‌گیری شده در دو عمق سطحی و زیر سطحی منطقه مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است. کمترین میزان رس به ترتیب ۱۰/۲۱ و ۱۰/۴۵ و بیشترین میزان آن ۶۵/۳۲ و ۶۳/۳۶ درصد در عمق سطحی و زیر سطحی اندازه‌گیری شد. میانگین رس در تمام نمونه‌ها ۳۷/۹۱ و ۳۵/۶۱ درصد است. میانگین شن در عمق سطحی ۲۵/۶۵ و در عمق زیر سطحی ۲۶/۰۲ درصد اندازه‌گیری شد. به طوری که بیشترین میزان آن در عمق سطحی و برابر با ۶۸/۵۴ درصد و کمترین مقدار آن در عمق زیرسطحی و برابر با ۳/۷۶ درصد است. بیشترین و کمترین مقدار سیلت در عمق زیرسطحی و به ترتیب برابر با ۷۶/۱۳ و ۴/۹۱ با میانگین ۳۸/۳۷ درصد است. براساس طبقه‌بندی (Wilding, 1985) تغییرپذیری شن در منطقه مورد مطالعه زیاد (بیش از ۳۵ درصد) بوده و رس و سیلت دارای تغییرپذیری متوسط (۱۳-۳۵ درصد) می‌باشند. زراعت پیشه و همکاران (Zeraatpisheh et al., 2020) نیز میانگین رس در استان فارس را ۳۷/۹ درصد و تغییرپذیری آن را متوسط (۲۰/۱ درصد) گزارش کردند. تشیع و همکاران (Tashayo et al., 2020) نیز گزارش کردند که میانگین شن در مرودشت استان فارس بیشتر از رس و سیلت است.

انتخاب متغیرهای کمکی محیطی

مناسب‌ترین متغیرهای کمکی با استفاده از آزمون هم خطی توسط شاخص تورم واریانس (VIF) و سپس رویکرد انتخاب متغیر باروتا انتخاب شدند و در جدول ۴ و شکل ۲ ارائه شده است. چهار متغیر عمق دره (VD)، بافت (TE)، شاخص رطوبت پستی و بلندی (TWI) و شاخص رس (CM) مربوط به پارامترهای ژئومرفومتری و متغیر شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) مربوط به شاخص‌های سنجش از دور می‌باشند (جدول ۴). جابجایی ذرات ریز خاک ارتباط نزدیکی با توپوگرافی منطقه مورد مطالعه دارد (Swain et al., 2021). مصلح و همکاران (Mosleh et al., 2016) و موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2019) بیان نمودند که پارامترهای استخراج‌شده از مدل رقومی ارتفاع می‌تواند به عنوان متغیرهای محیطی مناسب در مدل‌سازی کلاس و خصوصیات خاک محسوب شوند.

در حین فرآیند اجرای مدل RF، تعداد درختان در هر جنگل (ntree) و تعداد متغیرهای مورد استفاده برای رشد هر درخت (mtry)، به عنوان مهم‌ترین پارامترهای تنظیمی مدل RF می‌باشند. در این تحقیق جهت بهینه‌سازی فاکتورهای اصلی و تنظیم‌کننده کارکرد مدل RF به ترتیب تعداد درختان (ntree) با فاصله هر ۵۰ عدد در دامنه ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ درخت با فاصله ۱۰۰ عدد درخت و تعداد متغیرهای محیطی قابل استفاده برای رشد هر درخت بر اساس حداقل مقدار خطا RMSE بر اساس بسته تخصصی "random forest" در محیط نرم افزار R تعیین گردیدند (Friedman & Meulman, 2003). مدل دیگر مورد استفاده در این پژوهش رگرسیون ماشین‌بردار پشتیبان می‌باشد، این روش الگوریتمی است که رابطه میزان ورودی و خروجی یک سیستم را از روی نمونه‌های موجود و یا داده‌های آموزش، تخمین می‌زند (Bi et al., 2004). تمامی فرآیندهای مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار Rstudio 1.0.136 صورت پذیرفت.

اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی

فرایند اعتبارسنجی مدل‌های یادگیری ماشین و زمین آماری مورد استفاده با استفاده از ۲۰ درصد کل داده‌ها صورت پذیرفت و صحت مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، ریشه نرمال شده میانگین مربعات خطا (nRMSE) و درصد اختلاف نسبی (RPD) محاسبه شد (روابط ۱، ۲ و ۳) (Rossel & McBratney, 2008).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\bar{O}} \quad (2)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \times 100 \quad (3)$$

که در روابط بالا، n تعداد نقاط نمونه‌برداری، O_i مقدار مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهداتی و P_i مقدار تخمین زده شده متغیر، SD انحراف استاندارد مقادیر مشاهداتی RMSE ریشه دوم میانگین مربعات خطا.

RPD پایین‌تر نشان دهنده تطابق بهتر بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده است. مقادیر RPD را می‌توان برای طبقه‌بندی دقت یک روش پیش‌بینی به صورت زیر استفاده کرد:

میزان $RPD > 1$ دقت ضعیف، میزان $1 \leq RPD < 2$ دقت

جدول ۳- خلاصه آماری اجزای بافت خاک در منطقه مطالعاتی در دو عمق سطحی و زیرسطحی

Table 3- Statistical summary of Soil Texture Particles in study area at surface and subsurface depths

اجزای بافت خاک	اعماق	میانگین	حداقل	حداکثر	انحراف معیار	ضریب تغییرات %
Soil texture	Depths	Mean	Min	Max	SD	CV
Sand	0-30	25.6	8.50	68.54	11.2	0.45
شن	30-60	26.0	3.76	66.06	12.58	0.48
Silt	0-30	36.4	10.13	70.66	10.7	0.29
سیلت	30-60	38.3	4.91	76.13	10.69	0.30
Clay	0-30	37.9	10.21	65.32	9.78	0.25
رس	30-60	35.6	10.45	63.36	9.90	0.25

CV: Coefficient of variation, SD: Standard deviation, Max: Maximum, Min: Minimum

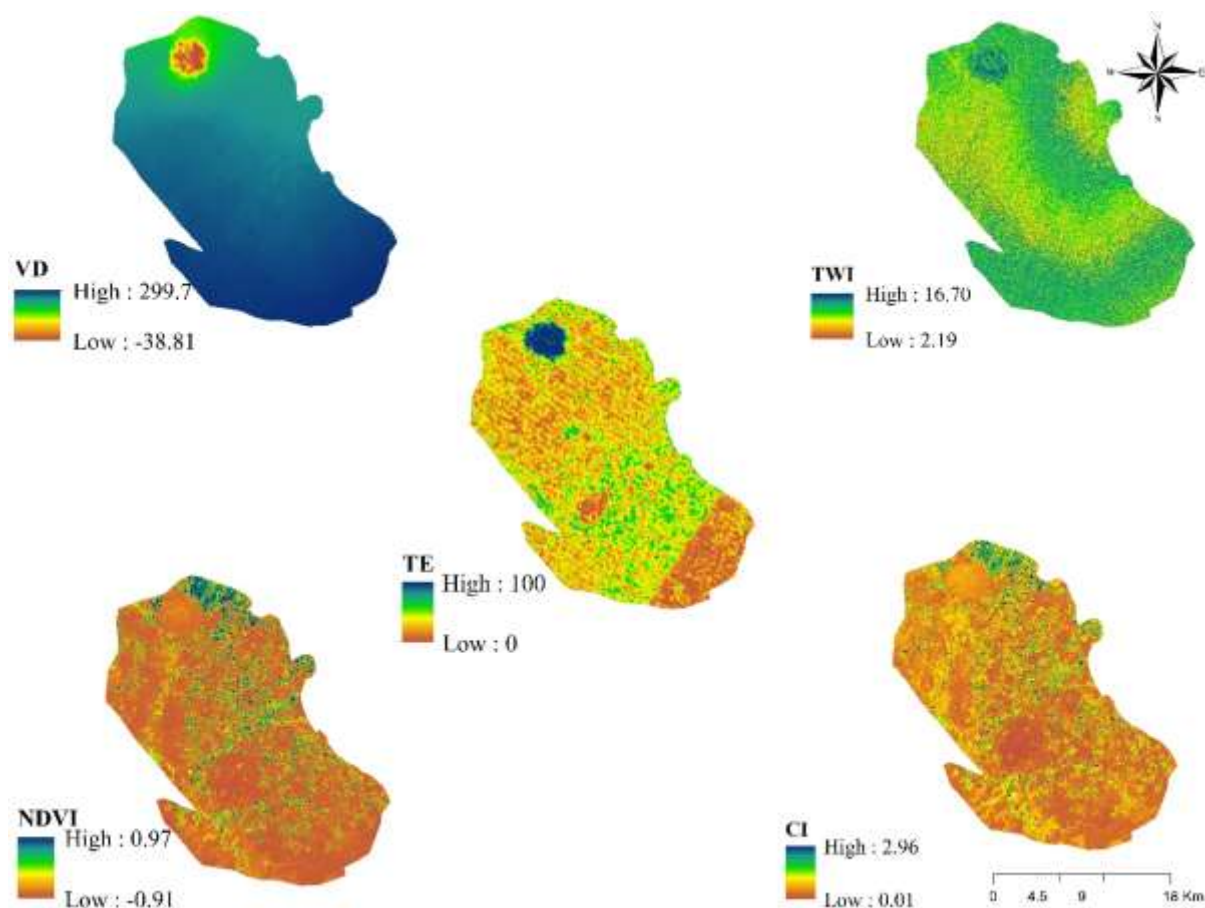
جدول ۴- متغیرهای کمکی محیطی مورد استفاده در پیش‌بینی مکانی اجزای بافت خاک

Table 4- Environmental covariates used in Soil Texture Particles spatial prediction

فاکتور خاک‌ساز (scorpan)	نماد	متغیر کمکی محیطی	منبع
Soil Forming Factor	Symbol	Environmental variable	Source
پستی و بلندی	VD	عمق دره	مدل رقومی ارتفاع Digital elevation model
Topography (r)		Valley depth	
پستی و بلندی	TE	شاخص بافت پستی و بلندی	
Topography (r)		Terrain surface texture	
پستی و بلندی	TWI	شاخص خیس‌پستی و بلندی	
Topography (r)		Topographic wetness Index	داده های سنجش از دور Remote sensing
پستی و بلندی	CI	شاخص رس	
Topography (r)		Clay Index	
زیستی	NDVI	شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده	داده های سنجش از دور Remote sensing
Organism (O)		Normalized differences vegetation index	

r و O به ترتیب نشانگر فاکتورهای پستی و بلندی و زیستی در مدل scorpan هستند.

r, p represents topography and organism factors in the scorpan model, respectively.



شکل ۲- متغیرهای کمکی محیطی مورد استفاده در پیش‌بینی مکانی اجزای بافت خاک
Figure 2- Environmental covariates used in Soil Texture Particles spatial prediction

و ۰/۶۴، برای SVR به‌ترتیب برابر با ۰/۱۰ و ۰/۰۶، و برای Co-Kriging به‌ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۱ در دو عمق سطحی و زیر سطحی به دست آمد. برای پیش‌بینی رس نیز مدل RF با R^2 ۰/۵۲ و ۰/۴۹ بهترین عملکرد را دارد. مقایسه نتایج nRMSE و RPD نشان داد که مدل RF برای پیش‌بینی رس (nRMSE به‌ترتیب برابر با ۰/۱۶ و ۰/۲۷ و $RPD \geq 1$ و $RPD < 2$) دارای عملکرد متوسط و دقت متوسط مشابه با پیش‌بینی سیلت (nRMSE به‌ترتیب برابر با ۰/۱۹ و ۰/۲۴ و $RPD \geq 1$ و $RPD < 2$) بود و دقت رضایت بخش و شن (nRMSE به‌ترتیب ۰/۳۲ و ۰/۴۲ و $RPD \geq 1$ و $RPD < 2$) نیز عملکردی شبیه دو ویژگی دیگر از خود نشان داد (Wallach et al., 2006; Sørensen et al., 2004) که می‌تواند به علت تغییرپذیری کمتر رس نسبت به سیلت و شن باشد (جدول ۵). به‌طور کلی پیش‌بینی شن و رس در عمق سطحی دارای دقت بالاتر نسبت به عمق زیرسطحی است که با نتایج لوئیزو و همکاران (Loiseau et al., 2019) مطابقت داشت.

همچنین مطالعات مختلف گزارش نمودند که داده‌های سنجش از دور در سطح جهانی و محلی در مطالعات نقشه‌برداری رقومی خاک موفق بوده است (Hengl et al., 2017). چن و همکاران (Chen et al., 2022) نشان دادند که استفاده از مدل باروتا برای انتخاب متغیرهای محیطی کمکی نسبت به سایر مدل‌های انتخاب متغیر منجر به خطا (RMSE) کمتر برای پیش‌بینی کربن آلی خاک شد.

مقایسه ارزیابی عملکرد مدل‌ها

عملکرد مدل‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و مدل زمین‌آماري کوکریجینگ (Co-kriging) با استفاده از سه شاخص آماری R^2 ، nRMSE و RPD محاسبه شد (جدول ۵). مقادیر R^2 برای پیش‌بینی شن در عمق سطحی توسط مدل RF، SVR و Co-Kriging به‌ترتیب ۰/۵۴، ۰/۱۶ و ۰/۱۶ و برای عمق زیرسطحی به‌ترتیب ۰/۳۶، ۰/۱۵ و ۰/۰۶ درصد محاسبه شد. برای پیش‌بینی سیلت میزان R^2 برای RF به‌ترتیب برابر با ۰/۴۸

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل زمین آماری و مدل های یادگیری ماشین برای اجزای بافت خاک در عمق سطحی و زیرسطحی در منطقه مورد مطالعه

Table 5- Validation results of the geostatistics model and machine learning models for Soil Texture Particles at surface and subsurface depth in the study areas

ویژگی Property	بهترین مدل پیش بینی کننده The best predictive model	عمق Depth (cm)	R ²	nRMSE	PRD
نتایج اعتبارسنجی در منطقه مطالعاتی					
شن Sand	RF	0-30	0.54	0.32	1.35
		30-60	0.36	0.42	1.15
	SVR	0-30	0.16	0.62	0.70
		30-60	0.15	0.86	0.56
	Co-kriging	0-30	0.16	0.97	0.45
		30-60	0.06	0.87	0.55
سیلت Silt	RF	0-30	0.48	0.19	1.47
		30-60	0.64	0.24	1.21
	SVR	0-30	0.10	0.32	0.90
		30-60	0.06	0.34	0.83
	Co-kriging	0-30	0.002	0.86	0.34
		30-60	0.01	0.90	0.31
رس Clay	RF	0-30	0.52	0.16	1.67
		30-60	0.49	0.27	1.01
	SVR	0-30	0.08	0.27	0.95
		30-60	0.11	0.27	1.03
	Co-kriging	0-30	0.04	0.46	0.56
		30-60	0.07	0.66	0.42

تعیین (R^2) و ضریب همبستگی تطابق لین^۳ (CCC) به ترتیب از ۶/۹۵ تا ۸/۷۴، ۸/۹ تا ۱۱/۳، ۴۲ تا ۴۶ و ۵۶ تا ۵۹ درصد متغیر بود. همچنین تومساواش و همکاران (Tu^۴msavas et al., 2019) RPD ۳/۲۵ و ۳/۵۱ را برای پیش بینی شن و سیلت گزارش کردند.

اهمیت متغیرهای محیطی

تجزیه و تحلیل متغیرهای مهم در پیش بینی مدل های ML می تواند بینش هایی در مورد ماهیت مجموعه داده مورد استفاده ارائه دهد و در عین حال به افزایش کارایی پیش بینی های ML نیز کمک کند. بررسی ویژگی ها همچنین امکان تخصیص امتیازها به چندین ورودی را فراهم می کند تا مهم ترین تغییرات در مدل سازی را شناسایی کند. اهمیت متغیرهای محیطی استفاده شده برای پیش بینی تغییرات مکانی ذرات خاک در اعماق سطحی و زیرسطحی توسط مدل RF در شکل ۳ نشان داده شده است. بر این اساس VD با ۶۰ و ۶۵ درصد برای پیش بینی شن در عمق سطحی و زیر سطحی، ۷۰ درصد برای پیش بینی سیلت در عمق سطحی و ۷۰ و ۶۵ درصد برای پیش بینی رس در هر دو عمق سطحی و زیر سطحی دارای بیشترین اهمیت است. تنها برای پیش بینی سیلت در عمق زیرسطحی متغیرهای TE و TWI دارای اهمیت بیشتری نسبت به VD می باشند (شکل ۳).

شهریاری و همکاران (Shahriari et al., 2019) نیز اعلام کردند که مدل RF نسبت به مدل های زمین آماری دارای عملکرد بهتری برای پیش بینی شن، سیلت و رس است. مدل جنگل تصادفی می تواند روابط غیرخطی بین متغیرهای محیطی و ویژگی های خاک را به خوبی در حین فرآیند مدلسازی و پیش بینی لحاظ نماید همچنین قادر است تا با مدیریت داده های پرت از بروز بیش برآزش و کم برآزش جلوگیری نماید (Azizi et al., 2023; Khosravani et al., 2023a). نتایج موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2020) نیز بیانگر دقت بالای مدل RF برای پیش بینی ویژگی های سطحی خاک شامل کربن آلی، کربنات کلسیم معادل، رس و سیلت نسبت به روش کربجینگ معمولی است. نتایج صحرائی و همکاران (Sahraei et al., 2022) نیز نشان داد که مدل RF نسبت به مدل ماشین بردار پشتیبان^۱ (SVM) دارای عملکرد بهتر برای پیش بینی اجزای بافت خاک است. آنها اعلام کردند که مدل SVM به لحاظ تغییرپذیری نسبت به مدل های پیچیده تر مانند RF، عدم قطعیت بیشتری را نشان می دهند، بنابراین مدل RF نسبت به مدل SVM دقت بالاتری را برای پیش بینی ذرات خاک دارا می باشد. نتایج ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2023) نیز نشان داد که میزان رس خاک و تنوع آن با عمق خاک افزایش می یابد. به طوری که میانگین خطای مطلق^۲ (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب

3- Lin's Concordance Correlation Coefficient

1- Support Vector Machine

2- Mean Absolute Error

مقدار رس در مناطق شمالی و افزایش آن در مناطق جنوبی شده است. مشاهده‌ی این الگوی پراکنش برای رس با نمودارهای اهمیت نسبی آن (شکل ۳ ب و شکل ۲) همراستا هست به‌طوری‌که شاخص VD بالاترین میزان اهمیت بیشترین نقش را در تعیین الگوی پراکنش مکانی رس ایفا نموده است، نتایج مشابهی نیز توسط (Ließ et al., 2012) گزارش شد و بیان نمودند که مقدار رس در زمین نما با افزایش ارتفاع و شیب کاهش و با انحنای شیب افزایش می‌یابد.

الگوی تغییرات مکانی شن (عمق سطحی و زیرسطحی) و سیلت (عمق سطحی) براساس شکل ۴ روند مشابهی را نشان داد. بیشترین کمترین مقدار شن پیش‌بینی شده در عمق سطحی ۱۵/۱۴ و ۵۴/۲۴ و زیر سطحی به‌ترتیب برابر با ۱۴/۴۶ و ۵۵/۱۷ (شکل ۴ ب و ث) و برای سیلت در عمق سطحی برابر ۱۷/۲۳ و ۷۳/۶۰ (شکل ۴ الف) درصد مشاهده گردید. برخلاف رس بیشترین مقدار شن در هر دو عمق در قسمت شمالی و مرتفع‌ترین قسمت منطقه مورد مطالعه مشاهده گردید و کمترین مقدار آن در نواحی پست منطقه مورد مطالعه مشاهده گردید. این نتایج در حالی است که طبق (شکل ۴ ت) روند تغییرات سیلت در عمق زیرسطحی به الگوی رس مشابه‌تر می‌باشد. مناطق پست و همچنین دشت‌های رسوبی در قسمت مرکزی منطقه مورد مطالعه حاوی مقادیر زیادی سیلت بودند. بنابراین می‌توان بیان نمود که این تغییرات در دو عمق سطحی و زیرسطحی برای اجزای بافت خاک تا حد زیادی متاثر از توالی فرآیندهای فرسایش و رسوب بوده که توزیع نامنظمی از اجزای بافت را از سطح به عمق نشان می‌دهد. در همین راستا ویلکی و همکاران (Wilcke et al., 2008) ارتباط قوی بین اجزای بافت خاک و ارتفاع در منطقه‌ی مطالعاتی خود توصیف نمود و بیان نمود که یک همبستگی مثبت بین پارامترهای وابسته به ارتفاع با شن و متعاقباً همبستگی منفی با مقدار رس وجود دارد. همچنین نتایج مشابهی توسط سایر محققین (Gessler et al., 2000; Ziadat, 2005; Riza et al., 2021; Mousavi et al., 2023) در مورد ارتباط بین اجزای بافت خاک و تغییرات ارتفاع مشاهده شده است. فرآیندهای توپوگرافی، با کنترل فرآیندهای فرسایش و رسوب بر روی مقادیر پراکنش مکانی اجزای بافت خاک مؤثر هستند و همچنین در مناطق مرتفع (قله و شانه شیب) بیشترین مقدار شن و در مناطق پای شیب بیشترین مقدار رس وجود دارد.

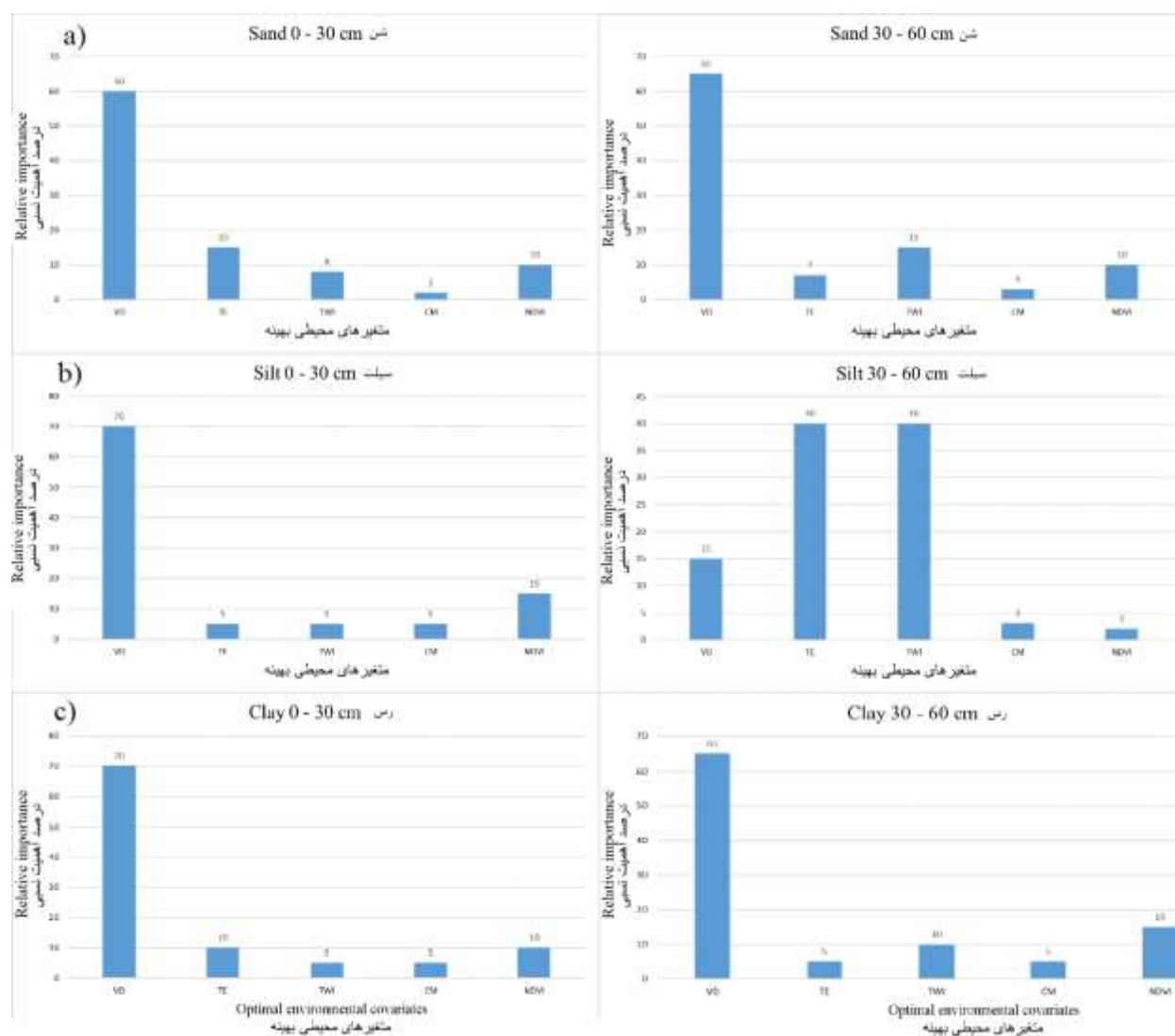
این نقشه‌ها می‌توانند به‌عنوان متغیرهای کمکی در سایر برنامه ریزی‌های مربوط به مدیریت اراضی از قبیل تعیین آب قابل استفاده و حاصلخیزی خاک مورد استفاده قرار گیرند (Ostovari et al., 2021).

می‌دهد که متغیرهای توپوگرافی بر تغییرات مکانی ذرات خاک مؤثر می‌باشند. این یافته با نتایج تقی زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2016; Maleki et al., 2023;) (Khosravani et al., 2023b) و پهلوان راد و اکبری مقدم، (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018) منطبق می‌باشد. توپوگرافی بر توزیع اندازه ذرات خاک عمدتاً با کنترل جریان آب و حمل و نقل ذرات خاک تأثیر می‌گذارد (Mahmoudzadeh et al., 2020). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2019) دریافتند که خاک سطحی به شدت در معرض کنترل‌های توپوگرافی قرار دارد. در مطالعه حاضر VD مهمترین عامل توپوگرافی است که توزیع ذرات خاک را تحت تأثیر قرار داده است. VD بیانگر فاصله عمودی در سطح پایه شبکه کانال است، بنابراین عامل مهمی برای تعیین کمیت کنترل توپوگرافی در فرایندهای هیدرولوژیکی است (Lee et al., 2020). پهلوان راد و اکبری مقدم، (Pahlavan-Rad & Akbarimoghaddam, 2018) فاصله تا شبکه آبراهه^۱ را مهمترین متغیر در پیش‌بینی رس شناسایی کردند. جان و همکاران (John et al., 2020) متغیرهای محیطی TWI و حوزه آبریز را مهمترین متغیرهای برای پیش‌بینی ویژگی‌های خاک معرفی کردند. دهروماراجان و هگده (Dharumarajan & Hegde, 2022) نیز شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا^۲ (MrVBF) را به‌عنوان مهمترین متغیر در پیش‌بینی توزیع مکانی ذرات خاک معرفی کردند. کایا و باشاقیت (Kaya & Başayigit, 2021) بیان کردند که مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن مهمترین متغیرهای محیطی در پیش‌بینی توزیع ذرات خاک است.

توزیع مکانی ذرات خاک

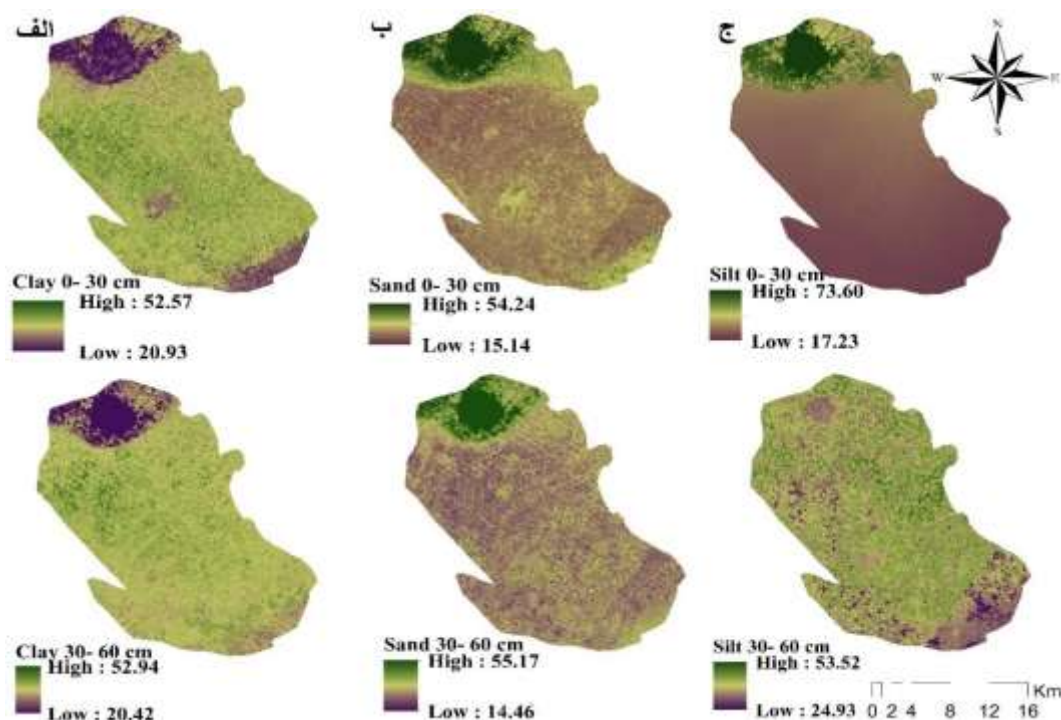
با توجه به اینکه مدل RF نسبت به دو مدل SVM و Cokriging از دقت بالاتری برای پیش‌بینی اجزای بافت خاک برخوردار بود بنابراین نقشه‌های توزیع مکانی ذرات خاک توسط مدل RF در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس شکل ۴ حداقل و حداکثر رس در عمق سطحی به ترتیب ۲۰/۹۳ و ۵۲/۵۷ و در عمق زیر سطحی به‌ترتیب ۲۰/۴۲ و ۵۴/۹۴ (شکل ۴ پ و ج) درصد مشاهده گردید. کمترین مقدار رس در هر دو عمق سطحی و زیر سطحی در قسمت شمال منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی شد. در حالی‌که بیشترین مقدار آن در بخش غرب، مرکز تا جنوب وجود دارد.

چنین به‌نظر می‌رسد که پایین بودن مقدار رس در بخش‌های شمالی وابسته به تأثیر فرآیندهای فرسایش و رسوب به‌همراه اثر توپوگرافی می‌باشد، به‌طوری‌که مناطق مرتفع و با ارتفاع بیشتر در بخش شمالی بوده که تلفیق اثر توپوگرافی و انتقال املاح منجر به کاهش



شکل ۳- نمودار اهمیت متغیرهای محیطی برای پیش‌بینی الف. شن، ب. سیلت و پ. رس در عمق سطحی و زیر سطحی

Figure 3- Diagram of importance of environmental variables for predicting a. sand, b. silt and c. clay at surface and subsurface depth



شکل ۴- نقشه توزیع الف) سیلت سطحی، ب) شن سطحی، پ) رس سطحی، ت) سیلت زیرسطحی (ث) شن زیرسطحی، ج) رس زیرسطحی پیش‌بینی شده توسط مدل RF

Figure 4- The distribution map of Sand, Silt and Clay predicted in the surface and subsurface depth by the RF model (From top right to bottom left).

نتیجه‌گیری

خاک و پوشش رویشی کنترل می‌شود، داده‌های مشتق شده از مدل رقومی ارتفاع همراه با داده‌های سنجش از دور در عملکرد مدل برای پیش‌بینی با دقت و صحت بیشتر مؤثر بود. به‌طوری‌که متغیر VD به عنوان مهمترین متغیر در پیش‌بینی توزیع مکانی ذرات خاک در منطقه مورد مطالعه شناسایی شد. برای افزایش دقت پیش‌بینی، می‌توان در مطالعات آتی از سایر منابع متغیرهای کمکی مانند متغیرهای آب و هوایی و داده‌های راداری استفاده کرد. همچنین رویکرد مورد استفاده در این تحقیق می‌تواند به‌عنوان راهنمایی برای تهیه نقشه‌های مدیریت پذیر خاک مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر با هدف کلی تهیه نقشه‌های اجزای بافت خاک (رس، سیلت و شن) و شناسایی مهمترین فاکتورهای پیش‌ران آن‌ها در بخشی از اراضی دشت مروست با کمک مدل‌های یادگیری ماشین و زمین آماری انجام گردید. مدل RF نسبت به مدل SVR و Co-Kriging در پیش‌بینی شن، سیلت و رس در هر دو عمق سطحی (۳۰ سانتی‌متر) و زیر سطحی (۶۰-۳۰ سانتی‌متر) عملکرد بهتری داشت. با توجه به پاسخ طیفی خاک که توسط عوامل متعددی (مانند رطوبت خاک، مواد آلی، زبری سطح، اثرات جوی، اثرات ساختاری، مدیریت

منابع

1. Arrouays, D., McBratney, A., Bouma, J., Libohova, Z., Richer-de-Forges, A.C., Morgan, C.L., & Mulder, V.L. (2020). Impressions of digital soil maps: The good, the not so good, and making them ever better. *Geoderma Regional*, 20, e00255. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00255>
2. Azizi, K., Garosi, Y., Ayoubi, S., & Tajik, S. (2023). Integration of Sentinel-1/2 and topographic attributes to predict the spatial distribution of soil texture fractions in some agricultural soils of western Iran. *Soil and Tillage Research*, 229, 105681. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105681>
3. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
4. Bi, D., Li, Y.F., Tso, S.K., & Wang, G.L. (2004). Friction modeling and compensation for haptic display based on support vector machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(2), 491-500. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825277>

5. Dharumarajan, S., & Hegde, R. (2022). Digital mapping of soil texture classes using Random Forest classification algorithm. *Soil Use and Management*, 38(1), 135-149. <https://doi.org/10.1111/sum.12668>
6. de Jesus Duarte, S., Glaser, B., & Pellegrino Cerri, C.E. (2019). Effect of biochar particle size on physical, hydrological and chemical properties of loamy and sandy tropical soils. *Agronomy*, 9(4), 165. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040165>
7. Chen, T.L., Shi, Z.L., Wen, A.B., Yan, D.C., Guo, J., Chen, J.C., & Chen, R.Y. (2021). Multifractal characteristics and spatial variability of soil particle-size distribution in different land use patterns in a small catchment of the Three Gorges Reservoir Region, China. *Journal of Mountain Science*, 18(1), 111-125. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6112-5>
8. Chen, Y., Ma, L., Yu, D., Zhang, H., Feng, K., Wang, X., & Song, J. (2022). Comparison of feature selection methods for mapping soil organic matter in subtropical restored forests. *Ecological Indicators*, 135, 108545. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108545>
9. Faé, G.S., Montes, F., Bazilevskaya, E., Añó, R.M., & Kemanian, A.R. (2019). Making soil particle size analysis by laser diffraction compatible with standard soil texture determination methods. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 1244-1252. <http://doi.org/10.2136/sssaj2018.10.0385>
10. Friedman, J.H., & Meulman, J.J. (2003). Multiple additive regression trees with application in epidemiology. *Statistics in Medicine*, 22(9), 1365-1381. <https://doi.org/10.1002/sim.1501>
11. Gessler, P.E., Chadwick, O.A., Chamran, F., Althouse, L., & Holmes, K. (2000). Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes. *Soil Science Society of America Journal*, 64(6), 2046-2056. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462046x>
12. Geology.com/news/2010/freelansatimages-from-USGS-2. <http://glovis.usgs.gov>
13. 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>
14. Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G.B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One*, 12(2), e0169748. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
15. Hossain, M.S., Rahman, G.M., Alam, M.S., Rahman, M.M., Solaiman, A.R.M., & Mia, M.B. (2018). Modelling of soil texture and its verification with related soil properties. *Soil Research*, 56(4), 421-428. <https://doi.org/10.1071/sr17252>
16. Jenny, H. (1994). *Factors of soil formation: a system of quantitative pedology*. Courier Corporation.
17. John, K., Abraham Isong, I., Michael Kebonye, N., Okon Ayito, E., Chapman Agyeman, P., & Marcus Afu, S. (2020). Using machine learning algorithms to estimate soil organic carbon variability with environmental variables and soil nutrient indicators in an alluvial soil. *Land*, 9(12), 487. <https://doi.org/10.3390/land9120487>
18. Kaya, F., & Başayığit, L. (2022). Spatial prediction and digital mapping of soil texture classes in a Floodplain using multinomial Logistic regression. In *Intelligent and Fuzzy Techniques for Emerging Conditions and Digital Transformation: Proceedings of the INFUS 2021 Conference, held August 24-26, 2021. Volume 2* (pp. 463-473). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85577-2_55
19. Khosravani, P., Baghernejad, M., Moosavi, A.A., & FallahShamsi, S.R. (2023). Digital mapping to extrapolate the selected soil fertility attributes in calcareous soils of a semiarid region in Iran. *Journal of Soils and Sediments*, 23(11), 4032-4054. <https://doi.org/10.1007/s11368-023-03548-1>
20. Khosravani, P., Baghernejad, M., Moosavi, A.A., & Rezaei, M. (2023). Digital mapping and spatial modeling of some soil physical and mechanical properties in a semi-arid region of Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11), 1367. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11980-6>
21. Lee, S., Baek, W.K., Jung, H.S., & Lee, S. (2020). Susceptibility mapping on urban landslides using deep learning approaches in Mt. Umyeon. *Applied Sciences*, 10(22), 8189. <https://doi.org/10.3390/app10228189>
22. Loiseau, T., Chen, S., Mulder, V.L., Dobarco, M.R., Richer-de-Forges, A.C., Lehmann, S., ... & Arrouays, D. (2019). Satellite data integration for soil clay content modelling at a national scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101905. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101905>
23. Lucas, M., Schlüter, S., Vogel, H.J., & Vetterlein, D. (2019). Soil structure formation along an agricultural chronosequence. *Geoderma*, 350, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.041>
24. Ma, Y., Minasny, B., Malone, B.P., & Mcbratney, A.B. (2019). Pedology and digital soil mapping (DSM). *European Journal of Soil Science*, 70(2), 216-235. <https://doi.org/10.1111/ejss.12790>
25. Mahler, P.J. (1970). Manual of Multipurpose Land Classification. Report no. 212. *Soil and Water Research Institute*, Tehran. Iran. (In Persian)
26. 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>

27. Maleki, S., Karimi, A., Mousavi, A., Kerry, R., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2023). Delineation of soil management zone maps at the regional scale using machine learning. *Agronomy*, 13(2), 445. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020445>
28. Malone, B., & Searle, R. (2021). Updating the Australian digital soil texture mapping (Part 1*): re-calibration of field soil texture class centroids and description of a field soil texture conversion algorithm. *Soil Research*, 59(5), 419-434. <https://doi.org/10.1071/SR20283>
29. McBratney, A.B., Santos, M.M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
30. Minasny, B., & McBratney, A.B. (2006). A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & geosciences*, 32(9), 1378-1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>
31. Mosleh, Z., Salehi, M. H., Jafari, A., Borujeni, I.E., & Mehnatkesh, A. (2016). The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5204-8>
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. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.323030.668957>
33. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Angelini, M.E., Bogaert, P., & Omid, M. (2023). Cause-effect relationships using structural equation modeling for soil properties in arid and semi-arid regions. *Catena*, 232, 107392. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107392>
34. Mousavi, S.R., Parsayi, F., Rahmani, A., Sedri, M.H., & Kohsar Bostani, M. (2020). Spatial prediction some of the surface soil properties using interpolation and machine learning models. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 10(3), 27-49. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/EJSMS.2021.17251.1916>
35. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Rahmani, A., & Khamoshi, S.E. (2019). Digital soil mapping with regression tree classification approaches by RS and geomorphometry covariate in the Qazvin Plain, Iran. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 773-777.
36. Ließ, M., Glaser, B., & Huwe, B. (2012). Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, 170, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.10.010>
37. Organization of Geology and Mineral Explorations of Ira, (1995). Geology map (1:100000) scale. Marvdasht, Fars, Iran.
38. Ostovari, Y., Moosavi, A.A., Mozaffari, H., & Pourghasemi, H.R. (2021). RUSLE model coupled with RS-GIS for soil erosion evaluation compared with T value in Southwest Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06405-4>
39. Olaya, V. I. C. T. O. R. . A gentle introduction to SAGA GIS. The SAGA User Group eV, Gottingen, Germany, 208.
40. Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A.B. (2019). Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. *SOIL*, 6, 35-52. <https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020>.
41. Pahlavan-Rad, M.R., & Akbarimoghaddam, A. (2018). Spatial variability of soil texture fractions and pH in a flood plain (case study from eastern Iran). *Catena*, 160, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.002>
42. Paramasivam, C.R. (2019). Merits and demerits of GIS and geostatistical techniques. *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*, 17-21.
43. Poppiel, R.R., Lacerda, M.P., Demattê, J.A., Oliveira Jr, M.P., Gallo, B.C., & Safanelli, J.L. (2019). Pedology and soil class mapping from proximal and remote sensed data. *Geoderma*, 348, 189-206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.028>
44. Parent, E.J., Parent, S.É., & Parent, L.E. (2021). Determining soil particle-size distribution from infrared spectra using machine learning predictions: Methodology and modeling. *Plos One*, 16(7), e0233242. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0233242>
45. Radočaj, D., Jurišić, M., AntoniĆ, O., Šiljeg, A., Cukrov, N., Rapčan, I., Plaščak, I., & Gašparović, M. (2022). A multiscale cost-benefit analysis of digital soil mapping methods for sustainable land management. *Sustainability*, 14(19), 12170. <https://doi.org/10.3390/su141912170>
46. Riza, S., Sekine, M., Kanno, A., Yamamoto, K., Imai, T., & Higuchi, T. (2021). Modeling soil landscapes and soil textures using hyperscale terrain attributes. *Geoderma*, 402, 115177.
47. Rossel, R.V., & McBratney, A.B. (2008). Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In *Digital soil mapping with limited data* (pp. 165-172). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_13.
48. Sahraei, N., Landi, A., & Hojati, S. (2022). Digital mapping of soil texture components in part of Khuzestan plain lands using machine learning models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(10), 2261-2276. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348442.669360>

49. Shahriari, M., Delbari, M., Afrasiab, P., & Pahlavan-Rad, M.R. (2019). Predicting regional spatial distribution of soil texture in floodplains using remote sensing data: A case of southeastern Iran. *Catena*, 182, 104149. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104149>
50. Sahraei, N., Landi, A., & Hojati, S. (2022). Digital mapping of soil texture components in part of Khuzestan plain lands using machine learning models. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(10), 2261-2276. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348442.669360>
51. Sørensen, H. (2004). RPD revisited – a mean to distinguish between poor and good predictions. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 12(6), 321-327.
52. Swain, S.R., Chakraborty, P., Panigrahi, N., Vasava, H.B., Reddy, N.N., Roy, S., Majeed, I., & Das, B.S. (2021). Estimation of soil texture using Sentinel-2 multispectral imaging data: An ensemble modeling approach. *Soil and Tillage Research*, 213, 105134. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105134>
53. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Toomanian, N., Khavaninzadeh, A. R., Jafari, A., & Triantafilis, J. (2016). Predicting and mapping of soil particle-size fractions with adaptive neuro-fuzzy inference and ant colony optimization in central Iran. *European Journal of Soil Science*, 67(6), 707-725. <https://doi.org/10.1111/ejss.12382>
54. Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Akbari, M. & Eftekhari, M. (2020). Land suitability assessment for maize farming using a GIS-AHP method for a semi-arid region, Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 19(5), 332-338. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.03.003>
55. Tümsavaş, Z., Tekin, Y., Ulusoy, Y., & Mouazen, A.M. (2019). Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, 177, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.008>
56. Wadoux, A.M.C., Minasny, B., & McBratney, A.B. (2020). Machine learning for digital soil mapping: Applications, challenges and suggested solutions. *Earth-Science Reviews*, 210, 103359. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103359>
57. Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W., & Brun, F. (2006). *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications*. Elsevier.
58. Wang, Z., Shi, W., Zhou, W., Li, X., & Yue, T. (2020). Comparison of additive and isometric log-ratio transformations combined with machine learning and regression kriging models for mapping soil particle size fractions. *Geoderma*, 365, 114214. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114214>
59. Wilding, L.P. (1985). *Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys*. In: Soil Spatial Variability, Las Vegas NV, pp. 166–194.
60. Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S., & Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma*, 338, 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.006>
61. Ziadat, F.M., 2005. Analyzing digital terrain attributes to predict soil attributes for a relatively large area. *Soil Science Society of America Journal*, 69, 1590–1599. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0264>
62. Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., & Del Valle, H.F. (2015). *Geopedology: An integration of geomorphology and pedology for soil and landscape studies*. Springer.
63. Zhang, Y.Y., Wu, W., & Liu, H. (2019). Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions. *Plos One*, 14(6), e0218563. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218563>
64. Zhang, X., Zhang, W.C., Wu, W., & Liu, H.B. (2023). Horizontal and vertical variation of soil clay content and its controlling factors in China. *Science of The Total Environment*, 864, 161141.



Research Article

Vol. 37, No. 6, Feb.-Mar., 2024, p. 943-955

Cold Plasma Treatment Effects on Corn (*Zea mays* L.) Yield and Iron and Zinc Concentration

B. Atarodi ^{1*}, M. Zangiabadi ¹

1- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, Khorasan-Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

(* - Corresponding Author Email: B.atarodi@areeo.ac.ir)

Received: 13-09-2023	How to cite this article:
Revised: 28-10-2023	Atarodi, B., & Zangiabadi, M. (2024). Cold plasma treatment effects on corn (<i>Zea mays</i>
Accepted: 11-11-2023	L.) yield and iron and zinc concentration. <i>Journal of Water and Soil</i> , 37(6), 943-955.
Available Online: 11.11.2023	(In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84422.1333

Introduction

Today, it is an inevitable necessity to make use of advanced and efficient technologies in order to increase productivity and gain a better economic status. Among different methods attracted the attention of researchers for enhancement in quantity and quality yield, cold plasma technique as a modern procedure has shown a promising prospects. Despite the importance of using cold plasma in agriculture, studies have focused more on the effect of this technique on reducing microbial load in agricultural products, less on absorption of nutrients in plants. Therefore, the objectives of this experiment were to evaluate the impacts of plasma treatment of corn seeds and plasma activated water (PAW) on growth and concentration of zinc and iron in the shoots of corn.

Materials and Methods

This research was conducted as a factorial experiment based on completely randomized design (CRD) with 3 replications in a research greenhouse in agricultural and natural resources research and education center of Khorasan Razavi. The factors of experiment were three types of seed (control seeds, seeds treated with dry plasma and wet plasma), two kinds of irrigation water (distilled water and PAW) and two levels of foliar spray (without foliar spray and foliar spray with iron and zinc). Required mass of soil, was gathered, air-dried, sieved from 5 mm mesh and weighted in 6 packs. Based on the soil test values the required macro, micronutrients (except for iron and zinc) was calculated and added to the soil, and then the soil samples were moved to the pot. PLASMA BIOTEC Company located in Khorasan Razavi Park of Sciences and Technology, Mashhad, Iran performed plasma treatment of seeds and water. Plasma treated corn seeds were planted on May 18th with a density of 6 seeds in each pot. Plantlets were reduced to 2 plants after germination and establishment and irrigation was continued with desired treatments. Shoots of each pot was cut 8 weeks after sowing, 1 cm above the ground and delivered to the laboratory, where the samples were washed, dried, grounded and the concentration of zinc and iron were measured using the atomic absorption device (Perkin Elmer, 2380) in dry ash digested in 2 N HCl acid. Data were statistically analyzed by SAS statistical software (version 9.4). Comparison of means for the main effects and interactions was performed by Tukey's test at 5 percent confidence interval.

Results and Discussion

Comparison of means for the interaction effects of water × seed × foliar spray showed that the minimum concentration of iron (147.67 mg/kg) was observed in plants grown from non-treated seeds, not foliar sprayed and irrigated with non-PAW (treatment 1 in Table 7). On the other hand, plants grown from wet plasma treated seeds and received foliar spray showed the highest concentration of iron regardless of irrigation water type (treatments 10 and 12 in Table 7). Comparison of means also shows that iron concentration in plants grown from dry plasma treated seeds had no significant difference with that of non-treated seeds (treatments 1 and 5 or 2 and 6). The mean



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84422.1333>

comparison results for zinc concentrations showed that the minimum value was related to plants grown from non-treated seeds, not foliar sprayed and irrigated with non-PAW (treatment 1 in Table 8). The comparison of the simple effects of the type of seed on the concentration of zinc in shoots (Table 6) showed that wet plasma seeds caused a significant increase in the concentration of zinc. However, comparison of means for the interaction effects of water $\times$ seed $\times$ foliar spray showed that the effect of plasma treatment on zinc concentration was effective only in treatments that received foliar spray (comparison of treatment 2 with 10 in table 8). Based on these results the highest zinc concentration was observed in plants grown from wet plasma seeds and received foliar spray at the same time (treatment 12 in Table 8). In addition, the comparison of treatment 1 with treatment 4 and treatment 9 with treatment 2 indicates that in order to increase the concentration of zinc in plant, plasma treatment of seeds cannot replace the foliar spray method. Comparison of means for the interaction effects of water $\times$ seed $\times$ Foliar spray showed that the minimum yield was observed in plants grown from non- treated seeds, irrigated with non-activated water and not sprayed with iron and zinc solution (treatment 1 in Table 9). However, the similar treatment which grown from wet plasma treated seeds (treatment 9), showed significantly higher yield. Dry plasma, without foliar spray and without PAW (treatment 5) had no significant priority over the control. Plants grown from seeds treated with wet plasma and without foliar spray could not significantly show more iron and zinc content over the control, while their shoot yield was higher.

Conclusion

Based on the findings of this study, it can be inferred that irrigation with PAW and utilizing seeds treated with dry plasma exhibited no significant impact on augmenting zinc and iron content, as well as shoot yield. Conversely, wet plasma treatment, while not yielding significant enhancements in the concentration of iron and zinc within the plant, did result in increased yield. It is crucial to note that the extent of influence exerted by factors such as frequency and duration of seed exposure to plasma conditions on the observed outcomes may vary significantly. Therefore, optimizing methodology and conducting further research in this domain are imperative for a comprehensive understanding of these processes.

Keywords: Concentration, Dry plasma, Nutrition, Plant, Wet Plasma

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۴۳-۹۵۵

تأثیر پلاسمای سرد بر عملکرد و غلظت آهن و روی در ذرت (*Zea mays* L.)

بصیر عطاردی^{۱*} - مهدی زنگی آبادی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

چکیده

امروزه در بخش کشاورزی، استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته و کارآمد به‌منظور افزایش بهره‌وری و کسب موقعیت اقتصادی بهتر، ضرورتی اجتناب ناپذیر به شمار می‌آید. در میان روش‌های متعددی که در جهت بهبود، افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته‌اند، پلاسمای سرد، تکنیکی جدید، دوست‌دار محیط‌زیست و اقتصادی است که افق‌های امیدبخشی را در این حوزه ایجاد کرده است. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی تأثیر پلاسمای سرد بر عملکرد و جذب عناصر آهن و روی در ذرت انجام گردید. فاکتورهای آزمایشی شامل سه نوع بذر (غیر پلاسمائی، پلاسمائی خشک و پلاسمائی مرطوب)، دو نوع آب آبیاری (آب مقطر و آب پلاسمائی) و دو سطح محلول‌پاشی (عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی دو عنصر آهن و روی) بود که به‌صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار، در گلخانه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی اجرا شد. هشت هفته پس از کشت، اندام هوایی گیاهان مربوط به هر گلدان به‌طور مجزا از یک سانتی‌متری سطح خاک برداشت، به آزمایشگاه منتقل، عملیات شستشو، خشک کردن، اندازه‌گیری وزن خشک و اندازه‌گیری غلظت آهن و روی نمونه‌ها، توسط دستگاه جذب اتمی انجام گردید. نتایج نشان داد که مصرف آب پلاسمائی تأثیر معنی‌داری بر غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوایی ذرت نداشت ولی پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب تأثیر معنی‌داری بر غلظت عنصر روی و میزان عملکرد داشت به‌طوری‌که بالاترین غلظت روی و مقدار عملکرد در گیاهانی مشاهده شد که بذور آنها پلاسمائی مرطوب بوده، و همزمان محلول‌پاشی شده بودند. با این وجود برای افزایش غلظت روی و آهن، پلاسمائی نمودن بذور نتوانست جایگزین روش محلول‌پاشی گردد. در مجموع و براساس نتایج حاصل، پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، به طریقی - غیر از افزایش غلظت دو عنصر آهن و روی - می‌تواند سبب بهبود عملکرد گیاه گردد.

واژه‌های کلیدی: پلاسمای خشک، پلاسمای مرطوب، تغذیه، غلظت، گیاه

مقدمه

عناصر می‌باشد. با این وجود، در ایران به دلیل pH بالا و آهکی بودن خاک‌ها، عناصر روی و آهن در خاک رسوب کرده، از دسترس گیاه خارج شده، که این موضوع از طرفی سبب کاهش آهن و روی قابل جذب خاک‌های کشور شده و از طرف دیگر باعث کاهش کارایی کودهای مصرفی می‌گردد (Moreno-Jiménez et al., 2019; Shahsavand & Eshghi, 2021). همچنین، طبق گزارش FAO حدود ۳۰ درصد از خاک‌های تحت کشت دنیا دچار کمبود روی بوده، کمبود این عنصر در حدود ۴۰ درصد از خاک‌های ایران و ۷۵ درصد از خاک‌های استان

دو عنصر آهن و روی جزء عناصر ضروری برای رشد و نمو گیاهان از جمله ذرت (*Zea mays*) محسوب می‌شوند که نقش مهمی در افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارند. این دو عنصر، علاوه بر کشاورزی در حوزه پزشکی و سلامت نیز مورد توجه بوده به‌طوری‌که در برخی کشورها، محصولات نظیر گندم با آهن غنی‌سازی می‌شوند. مصرف کودهای شیمیائی حاوی روی و آهن در اراضی کشاورزی، از جمله روش‌های معمول برای رفع نیاز گیاهان به این

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: B.atarodi@areeo.ac.ir)

خراسان تخمین زده می‌شود (Moshiri et al., 2010; Najafi et al., 2013). کمبود آهن نیز در بسیاری از خاک‌های ایران و استان خراسان مشاهده شده به‌عنوان مثال، در حالی که حد بحرانی آهن در خاک ۵ تا ۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته می‌شود غلظت آن در برخی خاک‌های تحت کشت ذرت در استان خراسان ۴ میلی گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (Nabavi moghadam et al., 2013). علاوه بر این، کودهای حاوی عناصر آهن و روی که اثربخشی بیشتری دارند- مثل کلات‌های^۱ آهن و روی - قیمت بالائی داشته و مصرف آن برای تمام محصولات مقرون به‌صرفه نیست. از این‌رو، یافتن روش‌های جایگزین برای رفع نیازهای گیاهان به دو عنصر مذکور می‌تواند اهمیت داشته باشد.

امروزه در بخش کشاورزی، استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته و کارآمد به‌منظور افزایش بهره‌وری و کسب موقعیت اقتصادی بهتر، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید. در میان روش‌های متعددی که در جهت بهبود، افزایش کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی مورد توجه قرار گرفته‌اند، پلاسمای سرد، تکنیکی جدید و اقتصادی است که افق‌های امیدبخشی را در این حوزه ایجاد کرده است.

با وجود اهمیت کاربرد پلاسمای سرد در کشاورزی، مطالعات بیشتر به تأثیر این تکنیک بر کاهش آلودگی و بار میکروبی محصولات کشاورزی معطوف بوده، تأثیر آن بر بهبود جذب و افزایش غلظت عناصر غذایی در بافت‌های گیاه، به‌خصوص در شرایطی نظیر خاک‌های کشور ما (که به دلیل آهکی بودن جذب عناصر غذایی مانند آهن و روی با محدودیت مواجه می‌باشد) کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. برخی محققان از جمله راندنیا و همکاران (Randeniya et al., 2015) و هاشیزوم و همکاران (Hashizume et al., 2020) گزارش کردند که با استفاده از پلاسمای سرد می‌توان بسته به هدف مورد نظر، در اطراف بذر، لایه نازک^۲ هیدروفیل یا هیدروفوب (آب‌دوست یا آب‌گریز) تشکیل داد. در دو مطالعه ذکر شده، به‌ترتیب از گازهای اکسیژن و آرگون استفاده شده بود. تشکیل لایه آب‌دوست در اطراف بذر، سبب افزایش جذب آب توسط بذر و متعاقب آن بهبود جذب عناصر غذایی و میزان عملکرد می‌گردد. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2018) در ارزیابی تأثیر پلاسمای با استفاده از گاز هلیوم، بر وضعیت عناصر غذایی در بافت‌های گیاه گوجه فرنگی مشاهده کردند که تیمار کردن قبل از کشت بذور گوجه فرنگی با پلاسمای ۸۰ W، باعث افزایش غلظت عناصر نیتروژن و فسفر در ریشه و ساقه گیاه گردیده، ولی بر میزان پتاسیم گیاه تأثیری معنی‌داری ندارد. ایران‌بخش و همکاران (Iranbakhsh et al., 2017) در بررسی تأثیر پلاسمای نمودن بذور گندم (با دو گاز هلیوم

و نیتروژن در زمان‌های ۱۵ تا ۱۲۰ ثانیه) گزارش کردند که استفاده از هر دو نوع گاز ذکر شده توانست طول ریشه، ارتفاع ساقه و میزان پروتئین گندم را نسبت به شرایط شاهد به‌طور معنی‌داری افزایش دهد. در پژوهش دیگری، لامیچهان و همکاران (Lamichhane et al., 2021) اثر پلاسمادهی (با استفاده از گاز نیتروژن) بر عملکرد ذرت را مطالعه نموده، نتایج آنان نشان داد که پلاسمادهی توانست محتوی کلروفیل، عملکرد وزن خشک و میزان پروتئین محلول گیاه ذرت را افزایش دهد. در خصوص بررسی مکانیسم تأثیر پلاسمای بر عملکرد گیاهان مطالعات مختلفی انجام گردیده است. ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در سطح بذر در نتیجه پلاسمائی نمودن بذر، باعث افزایش جذب آب و املاح معدنی توسط بذر و در نتیجه افزایش عملکرد می‌گردد. از طرفی منافذ ایجاد شده در اثر پلاسمادهی، پوسته بذر را شکننده‌تر نموده، بنابراین جوانه بذر، با صرف انرژی کمتری قادر خواهد بود پوسته بذر را بشکافد و رشد نماید (Goudarzi et al., 2021). از این طریق، پلاسمادهی بذر سبب افزایش سرعت جوانه‌زنی بذر می‌گردد که این عمل باعث استقرار سریع‌تر گیاه گردیده، لذا گیاه از نظر رشدی در وضعیت مطلوب‌تری قرار می‌گیرد و متعاقب آن عملکرد گیاه افزایش می‌یابد. علاوه بر تأثیر مثبت پلاسمادهی بذر بر افزایش عملکرد گیاه، برخی مطالعات نشان داده‌اند پلاسمائی نمودن آب مصرفی برای گیاه نیز منجر به بهبود عملکرد کمی و کیفی گیاه می‌شود. در واقع، پلاسمادهی آب سبب تشکیل گروه‌های فعال اکسیژن نیتروژن (RONS)^۳ در آب می‌گردد و با توجه به اینکه نیتروژن جزء اساسی ساختار کلروفیل و پروتئین‌های گیاهی به شمار می‌رود لذا افزایش میزان فتوسنتز و پروتئین در گیاه و متعاقب آن افزایش عملکرد کمی از نتایج مصرف آب پلاسمائی^۴ می‌باشد (Lamichhane et al., 2021). به عنوان یک نمونه، مطالعات لامیچهان و همکاران (Lamichhane et al., 2021) نشان داد که مصرف آب پلاسمائی (که با گاز نیتروژن فعال شده بود) در مقایسه با آب معمولی، غلظت نیتروژن نیتراتی گیاه ذرت را به‌طور معنی‌داری افزایش داد که در نتیجه آن، افزایش سنتز پروتئین و عملکرد بیشتر گیاه مشهود بود.

شاینسکی و همکاران (Shainsky et al., 2012) نشان دادند که با روش پلاسمائی می‌توان pH آب را از ۷/۵ به ۲/۵ کاهش داد. این محققان دلیل کاهش pH آب پلاسمائی را تشکیل اسیدهای نیتریک و نیترو و نیز گونه آنیونی سوپراکسید (O_2^-) در طی فرآیند پلاسمائی شدن دانسته و گزارش کردند ماندگاری کاهش pH آب پلاسمائی به نوع گاز مورد استفاده در تیمار پلاسمای بستگی داشته، به‌طوری که اگر پلاسمائی شدن با گاز اکسیژن انجام شود کاهش pH تنها تا ۳ ساعت پس از

4- Plasma activated water (PAW)

1- Chelates
2- Thin film
3- Reactive oxygen- nitrogen species

(آب مقطر و آب پلاسمائی) و دو سطح محلول پاشی (عدم محلول پاشی و محلول پاشی دو عنصر آهن و روی) بود (جدول ۱) که به صورت فاکتوریل در قالب یک طرح کاملاً تصادفی و با ۳ تکرار، در گلخانه تحقیقاتی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی اجرا شد.

آماده سازی خاک

حجم کافی از نمونه خاکی که دارای میزان روی و آهن کمتر از حد بحرانی بود جمع آوری شده، پس از هوا خشک شدن و عبور از الک ۵ میلی متری در دسته جات ۶ کیلوگرمی توزین شد. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در جدول ۲ آمده است. عناصر پرمصرف و کم مصرف مورد نیاز (به جز آهن و روی) براساس نتایج آزمون خاک و از منبع اوره، سوپر فسفات تریپل، سولفات پتاسیم، کلات منگنز (Flourish Mn 9 % EDTA) به خاکها افزوده شد. به این منظور، ۰/۶۵ گرم اوره، ۰/۶۵ گرم سوپر فسفات تریپل، ۱/۲ گرم سولفات پتاسیم و ۰/۳۳ گرم کلات منگنز به نمونه های ۶ کیلوگرمی خاک اضافه شد. برای اختلاط کامل و یکنواخت، کودها آسیاب و ابتدا به حجم کمتری از نمونه اضافه و سپس با کل خاک مخلوط شد. ضمناً ۰/۶۵ گرم اوره نیز در طی دو تقسیط در طی دوره رشد به هر گلدان اضافه گردید.

آماده سازی گلدانها

به منظور ایجاد زه کش مناسب و نیز جلوگیری از خروج خاک از ته گلدانها در حین آبیاری، در ته هر گلدان یک عدد کاغذ صافی گذاشته شد و سپس بر روی آن ۴۰۰ گرم شن درشت و ۱۰۰ گرم شن شسته شده ریخته شد، به طوری که وزن گلدان خالی و سنگریزه برای تمام گلدانها مساوی گردید. به هر گلدان، ۶ کیلوگرم خاک که طبق مرحله قبلی آماده شده بود اختصاص داده شد.

تیمار پلاسما ماندگار است و مجدداً pH آب روند افزایشی خواهد گرفت ولی چنانچه پلاسمائی شدن با هوا انجام شود ماندگاری pH آب تا حدود ۷۰ ساعت پس از پلاسمائی شدن نیز ادامه خواهد داشت. در مطالعه مشابهی، پارک و همکاران (Park et al., 2013) گزارش کردند با در معرض قرار دادن دو نمونه آب با pH های ۷/۵ و ۸/۵ در شرایط پلاسمائی (به مدت ۱۲۰ ثانیه)، مقادیر pH یک واحد کاهش یافت. با این وجود، این محققان در خصوص اینکه کاهش pH آب، چه میزان پایدار است اظهار نظر نکرده اند ولی در خصوص پایداری گروه های فعال نیتروژن، گزارش کردند که این خاصیت در آب پلاسمائی بعد از گذشت دو روز از بین می رود. در مطالعه دیگری، میلدازن و همکاران (Mildažiene et al., 2020) بیان کرده اند که آب پلاسمائی تولید شده با هوا دارای امواج الکترومغناطیس می باشد که از طریق افزایش سرعت فتوسنتز و افزایش فعالیت برخی از هورمون های گیاهی تأثیر مثبتی بر رشد گیاه می گذارد. یودپیتاک و همکاران (Yodpitak et al., 2019) شش رقم برنج را تحت تأثیر پلاسمای سرد با استفاده از گاز آرگون قرار دادند و مشاهده کردند که درصد جوانه زنی، طول ریشه و ارتفاع گیاهچه در بذور تیمار شده (با زمان ۷۵ ثانیه و توان ۱۳۵ وات) نسبت به شرایط شاهد افزایش معنی داری نشان داد.

با عنایت به کمبود مطالعات در زمینه تأثیر پلاسما بر جذب عناصر غذایی در شرایط خاک های کشور ما، پژوهش حاضر، به منظور بررسی تأثیر تیمار بذور ذرت با پلاسمای سرد، همچنین تأثیر مصرف آب پلاسمائی بر رشد و غلظت عناصر آهن و روی در اندام هوایی ذرت انجام گردید. هدف دیگر این مطالعه، بررسی امکان جایگزینی تأمین عناصر آهن و روی مورد نیاز ذرت به روش محلول پاشی با روش پلاسمائی بود.

مواد و روش ها

در این پروژه، فاکتورهای آزمایشی شامل سه نوع بذر (غیر پلاسمائی، پلاسمائی خشک و پلاسمائی مرطوب)، دو نوع آب آبیاری

جدول ۱- فاکتورهای آزمایشی و سطوح مربوط به آن

Table 1- Experimental factors and their levels

سطح Level	فاکتور Factor		
	محلول پاشی Foliar spray	آب آبیاری Irrigation water	بذر Seed
	عدم محلول پاشی Without foliar spray	آب مقطر Distilled water (Non-activated water)	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)
	محلول پاشی With foliar spray	آب پلاسمائی PAW	پلاسمائی خشک Treated with dry plasma
			پلاسمائی مرطوب Treated with wet plasma

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 2- Physico-chemical properties of soil

ویژگی خاک	واحد	مقدار
Soil properties	Unit	Value
pH	--	8.1
رس Clay	%	13
شن Sand	%	33
کربن آلی Organic carbon	%	0.63
درصد اشباع Saturation percent	%	37
هدایت الکتریکی Electrical conductivity	dS/m	0.95
فسفر قابل دسترس Available P	mg/kg	8.4
پتاسیم قابل دسترس Available K	mg/kg	219
روی قابل دسترس Available Zn	mg/kg	0.58
منگنز قابل دسترس Available Mn	mg/kg	8.28
آهن قابل دسترس Available Fe	mg/kg	3.43

کاشت و برداشت

قبل از کشت، بذور ذرت با محلول هیپوکلریت سدیم ۳ درصد به مدت ۳۰ ثانیه ضدعفونی، بعد از آب کشی با آب مقطر مجدداً ۳۰ ثانیه با قارچ کش بنومیل ۲ در هزار ضدعفونی گردید. در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۰، تعداد ۶ عدد بذر ذرت، رقم سینگل کراس ۷۰۴ (پلاسمائی شده یا غیر پلاسمائی؛ بسته به تیمار) در هر گلدان (۳۷ سانتی متر ارتفاع، ۳۰ سانتی متر قطر)، کشت گردید. پلاسمائی نمودن بذور به دو روش خشک و مرطوب توسط مرکز خدمات و تحقیقات پلاسما (مؤسسه پژوهشی علوم و صنایع غذایی، مستقر در پارک علم و فناوری مشهد) انجام شد. به طور خلاصه، برای پلاسمائی نمودن به روش خشک، بذور در دستگاه پلاسمای سرد^۱ (Plasma Supply, BK 9401) قرار داده شد و پلاسمادهی به مدت ۴۰ ثانیه در مجاورت گاز اکسیژن و ۴۵ ثانیه در مجاورت هوا (در مجموع ۸۵ ثانیه) در ولتاژ ۱۰ کیلوولت و توان ۶۰ وات انجام گردید. برای پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب، بذور پلاسمائی خشک به مدت ۱۲ ساعت در آب پلاسمائی نگهداری شد. آب پلاسمائی مورد استفاده در پروژه نیز توسط مرکز خدمات و تحقیقات پلاسما تهیه شد. به منظور پلاسمائی نمودن آب، آب معمولی (غیرپلاسمائی) در دستگاه پلاسما در تماس با لایه دی الکتریک و در مجاورت گاز نیتروژن قرار گرفت و پلاسمادهی تا زمانی که pH آن از ۷/۱ به ۶/۲ کاهش یافت ادامه یافت. استفاده از نیتروژن (به عنوان گاز در پلاسمادهی آب) در مقایسه با هوا، شرایط مطلوب تری برای تولید ترکیباتی مانند NH_3 به وجود می آورد که این ترکیب برای کاهش pH

آب و متعاقب آن جذب بهتر عناصر غذایی مؤثرتر خواهد بود (Lamichhane et al., 2021). جزئیات روش پلاسمائی نمودن بذور و تولید آب پلاسمائی، توسط محققان مختلفی از جمله لینگ و همکاران (Ling et al., 2016)، پورتو و همکاران (Porto et al., 2018)، لامیچهان و همکاران (Lamichhane et al., 2021) و همچنین توسط راسور و نما (Rathore & Nema., 2021) توضیح داده شده است.

بعد از جوانه زنی و استقرار گیاهچه ها، تعداد بوته های هر گلدان به ۲ عدد کاهش یافت. آبیاری گلدان ها، با آب مقطر یا آب پلاسمائی (بسته به تیمار) صورت گرفت. ضمناً در تیمارهای واجد آب پلاسمائی، سه نوبت آبیاری در طی فصل رشد با آب پلاسمائی صورت گرفت و سایر نوبت های آبیاری با آب مقطر انجام شد. رطوبت گلدان ها در طول دوره کشت با روش توزین، در حد ۸۵ درصد ظرفیت زراعی تأمین شد. در صورت خروج آب از گلدان ها، آب اضافی به ظروف پلاستیکی زیر گلدان ها وارد شده که مجدداً برای آبیاری همان گلدان مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیه کودهای مورد استفاده در محلول پاشی، از سولفات آهن و سولفات روی استفاده شد. به این منظور ۱/۵ گرم کود سولفات آهن (حاوی ۱۹٪ آهن) و ۱/۵ گرم کود سولفات روی (حاوی ۳۴٪ روی) به طور جداگانه در ۱/۵ لیتر آب مقطر حل گردید. کودهای مذکور از شرکت Fruitimax خریداری گردید. محلول پاشی عناصر آهن و روی در طی فصل رشد سه بار (در زمان ۴ برگی شدن و سپس به فواصل یک هفته ای) انجام شد. هشت هفته پس از کشت، اندام هوایی

1- Cold plasma generator

نتایج و بحث

اثرات اصلی نوع آب مصرفی بر غلظت آهن و روی و عملکرد اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوایی به طور معنی داری ($P > 0.05$) تحت تأثیر نوع آب مصرفی قرار نگرفت (جدول ۳، ۴ و ۵). غلظت آهن اندام هوایی از ۱۶۴/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم در گیاهان آبیاری شده با آب غیرپلاسمائی (آب مقطر) به ۱۶۶/۲۲ میلی گرم بر کیلوگرم در گیاهان آبیاری شده با آب پلاسمائی، افزایش یافت (جدول ۶). ولی این میزان تغییر، از نظر آماری معنی دار نبود. غلظت روی در گیاهان شاهد ۶۵/۰۵ میلی گرم بر کیلوگرم بود که با مصرف آب پلاسمائی، به ۶۴/۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم رسید (جدول ۶). همچنین با مصرف آب پلاسمائی، عملکرد از ۲۴/۰۳ گرم در هر گلدان در گیاهان شاهد، به ۲۴/۱۰ گرم در هر گلدان در گیاهان تیمار شده با آب پلاسمائی افزایش یافت که از نظر آماری تغییر معنی داری محسوب نمی شود (جدول ۶). در مطالعه مشابهی، پورتو و همکاران (Porto et al., 2018) گزارش کردند مصرف آبی که به مدت ۵ دقیقه در شرایط پلاسمائی قرار گرفته، باعث کاهش رشد گیاه سویا گردید. برخی گزارشات نیز بیان می کنند که انتخاب یون نامناسب و یا پتانسیل اکسایش و احیای نامناسب در زمان تهیه آب پلاسمائی می تواند باعث کیفیت نامناسب آب پلاسمائی گردیده و مصرف این آب، رشد گیاه را کاهش دهد (Rathore et al., 2022).

گیاهان مربوط به هر گلدان به طور مجزا از یک سانتی متری سطح خاک برداشت، به آزمایشگاه منتقل، عملیات شستشو، خشک کردن، اندازه گیری وزن خشک و اندازه گیری غلظت آهن و روی نمونه ها توسط دستگاه جذب اتمی انجام گردید. انتخاب دو عنصر آهن و روی در این مطالعه، به دلیل محدودیت جذب این دو عنصر در خاک های استان و کشور، و انتخاب ذرت به عنوان محصول مورد بررسی، به دلیل پاسخ بارز این گیاه به کمبود آهن صورت گرفت.

نمونه های گیاه پس از انتقال به آزمایشگاه و شستشو، به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد در آون خشک گردید، پس از آن، وزن خشک نمونه ها با ترازوی دیجیتالی اندازه گیری، نمونه ها کاملاً آسیاب شد. برای اندازه گیری عناصر آهن و روی در نمونه ها، پس از تهیه خاکستراز نمونه (در کوره در دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد و ۴ ساعت، با استفاده از اسید کلریدریک ۲ نرمال هضم انجام گردید و غلظت عناصر مذکور در عصاره ها توسط دستگاه جذب اتمی (مدل پرکین المر، ۲۳۸۰) قرائت شد (Emami, 1996).

محاسبات آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده های حاصل از آزمایش با استفاده از نرم افزار آماری SAS PC (version 9.4) انجام شد. مقایسه میانگین های اثرات اصلی و متقابل در سطح احتمال ۵ درصد با آزمون توکی صورت گرفت.

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت آهن اندام هوایی ذرت

Table 3- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on iron concentration in shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	44.44	1.63	0.21
بذر Seed	2	502.78	18.47	< 0.0001
محلول پاشی Foliar spray	1	8341.78	306.43	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	10.77	0.4	0.68
آب × محلول پاشی Water* Foliar spray	1	1.78	0.07	0.80
بذر × محلول پاشی Seed* Foliar spray	2	104.11	3.82	0.04
آب × بذر × محلول پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	45.44	1.67	0.21
خطا Error	24	27.22	-	-
ضریب تغییرات (%) (%) CV	-	3.16	-	-

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت روی اندام هوایی ذرت

Table 4- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on zinc concentration in shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M.S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	10.03	2.09	0.16
بذر Seed	2	1356.03	282.18	< 0.0001
محلول پاشی Foliar spray	1	24388.01	5074.97	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	15.53	3.23	0.06
آب × محلول پاشی Water* Foliar spray	1	476.69	99.20	< 0.0001
بذر × محلول پاشی Seed* Foliar spray	2	496.70	103.36	< 0.0001
آب × بذر × محلول پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	7.19	1.50	0.24
خطا Error	24	4.80	-	-
ضریب تغییرات (%) (%) CV	-	3.40	-	-

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر عملکرد خشک اندام هوایی ذرت

Table 5- The results of analysis of variance of the effects of experimental treatments on dry yield of shoot of corn

منابع تغییر Source of change	درجه آزادی df	میانگین مربعات M. S	مقدار F F Value	P-Value
آب Water	1	0.045	0.12	0.73
بذر Seed	2	51.39	67.59	< 0.0001
محلول پاشی Foliar spray	1	35.10	93.46	< 0.0001
آب × بذر Water*Seed	2	0.01	0.04	0.96
آب × محلول پاشی Water* Foliar spray	1	0.098	0.02	0.89
بذر × محلول پاشی Seed* Foliar spray	2	0.47	1.26	0.30
آب × بذر × محلول پاشی Water*Seed* Foliar spray	2	0.005	0.01	0.99
خطا Error	24	0.37	-	-
ضریب تغییرات (%) (%) CV	-	2.54	-	-

اثرات اصلی نوع بذر بر غلظت آهن، روی و عملکرد خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که نوع بذر مصرفی، تأثیر معنی داری ($P < 0.05$) بر هر سه صفت مورد بررسی یعنی غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد اندام هوایی گیاهان داشت (جدول ۳، ۴ و ۵). غلظت آهن اندام هوایی در گیاهان حاصل از بذر معمولی (غیرپلاسمائی) از ۱۶۳/۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم به ۱۷۲/۳۴ میلی گرم بر کیلوگرم در

گیاهان حاصل از بذر پلاسمائی مرطوب افزایش نشان داد (جدول ۶). با این وجود، غلظت آهن در گیاهان حاصل از بذور غیرپلاسمائی و پلاسمائی خشک اختلاف معنی داری نداشت. غلظت روی و میزان عملکرد نیز روند مشابهی داشتند به طوری که مقدار این دو صفت، در گیاهان حاصل از بذر پلاسمائی مرطوب در مقایسه با گیاهان حاصل از بذر غیرپلاسمائی به طور معنی داری بیشتر بود (جدول ۶).

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات ساده فاکتورها بر غلظت آهن و روی و عملکرد خشک اندام هوایی ذرت

Table 6- Comparison of means for direct effects of factors on iron and zinc concentration at corn shoots

فاکتور Factor	سطح فاکتور Factor level	غلظت آهن Fe Concentration (mg kg ⁻¹)	غلظت روی Zn Concentration (mg kg ⁻¹)	عملکرد Shoot yield (g pot ⁻¹)
آب آبیاری Irrigation Water	آب مقطر Distilled water (Non- activated water)	164.00 ^a	65.05 ^a	24.03 ^a
	آب پلاسمائی PAW	166.22 ^a	64.00 ^a	24.10 ^a
	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	163.17 ^b	56.50 ^c	23.19 ^b
بذر Seed	پلاسمائی خشک Treated with dry plasma	159.83 ^b	60.51 ^b	23.27 ^b
	پلاسمائی مرطوب Treated with wet plasma	172.34 ^a	76.58 ^a	25.75 ^a
	عدم محلول پاشی Without foliar spray	149.89 ^b	38.50 ^b	23.08 ^b
محلول پاشی Foliar spray	محلول پاشی With foliar spray	180.33 ^a	90.55 ^a	25.06 ^a

Means followed by different letters are significantly different ($P < 0.05$) according to Tukey's LSD test.

معنی دار غلظت آهن، روی و میزان عملکرد در مقایسه با گیاهان شاهد گردید (جدول ۳، ۴ و ۵). بر اساس نتایج مقایسات میانگین (جدول ۶) اعمال محلول پاشی، غلظت آهن، روی و مقدار عملکرد را به ترتیب ۲۰، ۱۳۵ و ۹ درصد نسبت به گیاهان شاهد افزایش داد. آرمجو و همکاران (Arazmjoo *et al.* 2018) تأثیر محلول پاشی عناصر آهن و روی (از منبع سولفات این دو عنصر) را بر برخی خصوصیات سه رقم گندم روشن، یک کراس روشن، بم و افق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که محلول پاشی عناصر مذکور از طریق افزایش طول سنبله و تعداد دانه در سنبله باعث افزایش عملکرد ارقام مورد بررسی گردید. تأثیر مثبت محلول پاشی آهن و روی با غلظت های به ترتیب ۲/۵ و ۵ در هزار، در افزایش عملکرد ذرت نیز گزارش شده است (Yousefpour & Farajzadeh Memari Tabrizi, 2018).

اثر متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر غلظت آهن در اندام هوایی

مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلول پاشی نشان داد کمترین غلظت آهن (۱۴۷/۶۷ میلی گرم بر کیلوگرم) در شرایط عدم محلول پاشی و در گیاهان حاصل از بذور غیرپلاسمائی که با آب غیرپلاسمائی آبیاری شده بودند مشاهده گردید (تیمار شماره ۱، جدول ۷). در مقابل گیاهان حاصل از بذور پلاسمائی مرطوب و در شرایط محلول پاشی - صرف نظر از اینکه با کدام نوع آب آبیاری شده باشند -

تأثیر مثبت پلاسمائی نمودن بذور (در مجاورت هوا، توان ۶۰ وات و مدت زمان ۱۸۰ ثانیه) بر افزایش عملکرد گندم توسط صابری و همکاران (Saberi *et al.*, 2022) گزارش شده است. این محققان دریافتند که پلاسمائی نمودن بذور از طریق بهبود برخی خصوصیات بیوشیمیائی و فیزیولوژیکی نظیر افزایش میزان فتوسنتز سبب بهبود جذب عناصر غذائی و افزایش عملکرد می گردد. در مطالعه مشابهی در خصوص تأثیر پلاسمای بر جذب عناصر غذائی، جیانگ و همکاران (Jiang *et al.*, 2018) افزایش عملکرد گوجه فرنگی تحت تأثیر پلاسمای را به افزایش جذب عناصر نیتروژن و فسفر مرتبط دانستند. آنان دریافتند که افزایش جذب این دو عنصر در شرایط پلاسمائی، بر اثر افزایش حجم ریشه و سطح برگ صورت گرفت. صفری و همکاران (Safari *et al.*, 2017) گزارش کردند که قرار دادن یک دقیقه ای بذور فلفل در معرض پلاسمای سرد (با ولتاژ ۱۵ کیلوولت، فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۱۰۰ وات)، سبب افزایش معنی دار سطح برگ گیاهان تیمار شده نسبت به شاهد گردیده ولی زمان های بیش از یک دقیقه نه تنها خصوصیات رشدی را بهبود نداد، بلکه برخی از صفات مورد بررسی نظیر طول ریشه و ساقه را نیز کاهش داد.

اثرات اصلی محلول پاشی بر غلظت آهن و روی و عملکرد خشک اندام هوایی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تیمار محلول پاشی باعث افزایش

اثر متقابل آب × بذر × محلولپاشی بر غلظت روی در اندام هوایی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلولپاشی بر غلظت روی اندام هوایی نشان داد که کمترین غلظت روی مربوط به تیمار بذر غیرپلاسمائی، آب غیر پلاسمائی و عدم محلولپاشی بود (تیمار شماره ۱، جدول ۸).

اگرچه مقایسه میانگین اثرات ساده نوع بذر مصرفی بر غلظت روی در اندام هوایی (جدول ۶) نشان داد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، باعث افزایش معنی‌دار غلظت روی گردید با این وجود، مقایسات میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلولپاشی بر غلظت روی اندام هوایی نشان داد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور، تنها در تیمارهایی که محلولپاشی انجام گرفته باعث افزایش معنی‌دار غلظت روی در اندام هوایی می‌گردد (مقایسه تیمار شماره ۲ با شماره ۱۰، جدول ۸) و در تیمارهایی که محلولپاشی صورت نگرفته پلاسمائی نمودن مرطوب بذور تاثیر معنی‌داری بر افزایش غلظت روی در اندام هوایی نداشت (مقایسه تیمار شماره ۱ با شماره ۹، جدول ۸).

بیشترین غلظت آهن و بیشترین عملکرد را داشتند (تیمارهای شماره ۱۰ و ۱۲، جدول ۷). این نتایج بیانگر آن است که آب پلاسمائی در مقایسه با آب غیرپلاسمائی، تأثیری بر افزایش عملکرد ندارد.

نتایج مقایسات میانگین نشان می‌دهند که غلظت آهن در گیاهان حاصل از بذور پلاسمائی خشک و بذور معمولی (غیرپلاسمائی) تفاوت معنی‌داری ندارد. به عبارتی، بذور پلاسمائی شده به روش خشک در مقایسه با بذور غیر پلاسمائی، نتوانست بر افزایش غلظت آهن گیاه تأثیر معنی‌داری داشته باشد (تیمار شماره ۱ و ۵ یا ۲ و ۶).

رسولی و همکاران (Rasooli et al., 2021) گزارش کردند بسته به مدت زمان قرار گرفتن بذور در شرایط پلاسمائی، تیمار پلاسمائی می‌تواند اثرات متفاوتی بر جذب عناصر غذایی توسط گیاه داشته باشد. آنان در مطالعه خود مشاهده کردند که قرار گرفتن بذور زیره سبز (*Cuminum cyminum*) به مدت ۵ دقیقه در شرایط پلاسمائی، توانست مقدار جذب عناصر کلسیم و آهن توسط این گیاه را افزایش دهد در صورتی که قرارگیری ۱۰ دقیقه‌ای بذور در شرایط پلاسمائی، بر جذب آهن تأثیر معنی‌داری نداشته، حتی جذب عناصر کلسیم و منیزیم را کاهش داد.

جدول ۷- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلولپاشی بر غلظت آهن در اندام هوایی

Table 7- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on iron concentration in shoots (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلولپاشی Foliar Spray	غلظت آهن Fe Conc. (mg kg ⁻¹)
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلولپاشی Without foliar spray	147.67 ^c
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلولپاشی With foliar spray	174.33 ^b
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلولپاشی Without foliar spray	155.00 ^c
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلولپاشی With foliar spray	175.67 ^b
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلولپاشی Without foliar spray	142.68 ^c
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلولپاشی With foliar spray	176.33 ^b
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلولپاشی Without foliar spray	143.67 ^c
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلولپاشی With foliar spray	176.66 ^b
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلولپاشی Without foliar spray	156.68 ^c
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلولپاشی With foliar spray	186.33 ^a
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلولپاشی Without foliar spray	153.67 ^c
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلولپاشی With foliar spray	192.67 ^a

Means followed by different letters are significantly different (P<0.05) according to Tukey's LSD test.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر غلظت روی در اندام هوایی

Table 8- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on zinc concentration in shoots (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلول پاشی Foliar Spray	غلظت روی Zn Conc. (mg kg ⁻¹)
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	40.60 ^d
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	76.11 ^c
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	29.00 ^e
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	80.33 ^c
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	41.68 ^d
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	79.30 ^c
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	33.33 ^e
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	87.56 ^b
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	45.67 ^d
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	107.11 ^a
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	40.67 ^d
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	113.00 ^a

Means followed by different letters are significantly different (P<0.05) according to Tukey's LSD test.

مشابهی که به جای بذر غیر پلاسمائی، بذر پلاسمائی خشک یا مرطوب داشته (تیمار شماره ۵ با تیمار شماره ۹) مقایسه شود مشخص می گردد که پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب می تواند باعث افزایش معنی دار عملکرد گیاه گردد در صورتی که پلاسمائی نمودن بذور به روش خشک تأثیر معنی داری بر عملکرد ندارد.

به نظر می رسد که پلاسمائی نمودن بذور به روش مرطوب نتوانست به تنهایی (بدون انجام محلول پاشی) غلظت های دو عنصر آهن و روی را به طور معنی داری افزایش دهد ولی مقدار عملکرد خشک اندام هوایی گیاه را افزایش داد. از این رو، می توان استنباط کرد که پلاسمائی نمودن مرطوب بذور به طریقی - غیر از بهبود جذب دو عنصر آهن و روی - سبب افزایش عملکرد گردیده است. در تحقیقات مشابهی توسط لینگ و همکاران (Ling et al., 2016) افزایش عملکرد بادام زمینی در اثر تیمار بذور آن با پلاسما، گزارش شده است. این محققان، افزایش وزن ریشه، قطر ساقه و سطح برگ بادام زمینی تحت تأثیر تیمار پلاسمائی را در مقایسه با گیاهان شاهد گزارش کردند. آنان مشاهده کردند که در گیاهان تیمار شده با پلاسما، غلظت نیتروژن برگ و میزان کلروفیل افزایش معنی داری داشته، افزایش عملکرد را به افزایش غلظت نیتروژن و کلروفیل نسبت دادند.

بر همین اساس، بالاترین غلظت روی در گیاهانی مشاهده شد که بذور آنها پلاسمائی مرطوب بوده، و همزمان محلول پاشی نیز شده بودند (تیمار شماره ۱۲، جدول ۸). این نتایج مشخص می نماید که تأثیر محلول پاشی در افزایش غلظت روی در حضور بذر پلاسمائی مرطوب در مقایسه با بذر غیر پلاسمائی به طور معنی داری بیشتر است (مقایسه تیمار ۱۲ با تیمار ۴).

همچنین، مقایسه تیمار ۱ با تیمار ۴ و تیمار ۹ با تیمار ۲ بیانگر آن است که پلاسمائی نمودن بذور، نمی تواند به منظور افزایش غلظت روی در گیاه، جایگزین روش محلول پاشی گردد.

اثر متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر عملکرد خشک اندام هوایی

نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثرات متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر عملکرد اندام هوایی نشان داد که کمترین عملکرد به میزان ۲۲/۶۷۱۸ گرم بر گلدان در شرایط عدم محلول پاشی و در گیاهان حاصل از بذور غیر پلاسمائی که با آب غیر پلاسمائی آبیاری شده بودند مشاهده گردید (تیمار شماره ۱، جدول ۹). در صورتی که تیمار شماره ۱ (بذر غیر پلاسمائی، آب غیر پلاسمائی و عدم محلول پاشی) با تیمارهای

نتیجه گیری

نمودن مرطوب، گرچه سبب افزایش غلظت آهن و روی گیاه نگردید ولی عملکرد را افزایش داد. ذکر این نکته ضروری است که دامنه تأثیر عواملی نظیر فرکانس مورد استفاده و مدت زمان قرارگیری بذور در شرایط پلاسمائی بر نتایج حاصله بسیار گسترده بوده، لذا بهینه سازی روش کار و انجام تحقیقات بیشتر در این زمینه ضروری می باشد.

از نتایج این پژوهش می توان نتیجه گیری نمود که کاربرد آب پلاسمائی و پلاسمائی نمودن بذر ذرت به روش خشک، تأثیری بر افزایش غلظت عناصر آهن، روی و مقدار عملکرد ذرت ندارد. پلاسمائی

جدول ۹- مقایسه میانگین اثر متقابل آب × بذر × محلول پاشی بر عملکرد خشک اندام هوایی

Table 9- Mean comparison of the interaction effects of water × seed × Foliar spray on dry weight (means that have no common letters, showed significant difference at 5% level of Tukey test)

شماره تیمار Treatment No.	بذر Seeds	آب آبیاری Irrigation Water	محلول پاشی Foliar Spray	عملکرد اندام هوایی Shoots D.Wt (g pot ⁻¹)
1	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	22.18 ^c
2	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	24.07 ^b
3	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	22.27 ^c
4	غیر پلاسمائی Non-treated (Control)	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	24.24 ^b
5	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	22.51 ^c
6	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	24.04 ^b
7	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	22.43 ^c
8	پلاسمای خشک Treated with dry plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	24.10 ^b
9	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	بدون محلول پاشی Without foliar spray	24.50 ^b
10	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب مقطر Non- activated water	محلول پاشی With foliar spray	26.91 ^a
11	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	بدون محلول پاشی Without foliar spray	24.61 ^b
12	پلاسمای مرطوب Treated with wet plasma	آب پلاسمائی PAW	محلول پاشی With foliar spray	26.98 ^a

Means followed by different letters are significantly different (P<0.05) according to Tukey's LSD test.

References

- Arazmjoo, E., Behdani, M.A., Mahmoodi, S., & Sadeghzade, B. (2018). Response of some bread wheat cultivars to foliar application of Zn and Fe different forms in two Locations with different soil properties. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 16(1), 203-216. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v16i1.61570>
- Emami, A. (1996). Methods of plant analysis, 982, 80-93. (In persian)
- Goudarzi, S., Ghafoorifard, H., Ghasemi, S.A., & Mazandarani, A. (2021). *The effect of atmospheric cold plasma on the rates of germination and root length and shoot length of sesame seed*. P1-7. In 27th Iranian nuclear conference, 30 February 2021. Nuclear Society of Iran, Mashhad, Iran.
- Hashizume, H., Kitano, H., Mizuno, H., Abe, A., Yuasa, G., Tohno, S., Tanaka, H., Ishikawa, K., Matsumoto, S., Sakakibara, H., Nikawa, S., Maeshima, M., Mizuno, M., & Hori, M. (2020). Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field. *Plasma Processes and Polymers*, 18(1), 1-11. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000181>
- Iranbakhsh, A., Ghoranneviss, M., Oraghi Ardebili, Z., Oraghi Ardebili, N., Hesami Tackallou, S., & Nikmaram, H. (2017). Non-thermal plasma modified growth and physiology in *Triticum aestivum* via generated signaling molecules and UV radiation. *Biologia Plantarum*, 61, 702-708. <https://doi.org/10.1007/s10535-016-0699-y>
- Jiang, J., Li, J., & Dong, Y. (2018). Effect of cold plasma treatment on seedling growth and nutrient absorption of tomato. *Plasma Science and Technology*, 20(4), 1-4. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aaa0bf>

- 7- Lamichhane, P., Veerana, M., Lim, J.S., Mumtaz, S., Shrestha, B., Kaushik, N.K., Park, G., & Choi, E.H. (2021). Low-temperature plasma-assisted nitrogen fixation for corn plant growth and development. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ijms22105360>
8. Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Jinfeng, H., Hanliang, S., Yuanhua, D., & Jiafeng, J. (2016). Improving seed germination and peanut yields by cold plasma treatment. *Plasma Science and Technology*, 18(10), 1027-1033. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/18/10/10>
9. Mildaziene, V., Ivankov, A., Pauzaite, G., Naucienė, Z., Zukiene, R., Degutyte-Fomins, L., Pukalskas, A., Venskutonis, P., Filatova, I., & Lyushkevich, V. (2020). Seed treatment with cold plasma and electromagnetic field induces changes in red clover root growth dynamics, flavonoid exudation, and activates nodulation. *Plasma Processes and Polymers*, 18(1), 1-10. <https://doi.org/10.1002/ppap.202000160>
10. Moreno-Jiménez, E., Plaza, C., Saiz, H., Manzano, R., Flagmeier, M., & Maestre, M. (2019). Aridity and reduced soil micronutrient availability in global drylands. *Nature Sustainability*, 2(5), 371-377. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0262-x>
11. Moshiri, F., Ardalan, M., Tehrani, M.M., & Savaghebi, Gh. (2010). Zinc efficiency of wheat cultivars in a calcareous soil with low zinc status. *Journal of Water and Soil*, 24(1), 145-153. (In Persian with English abstract)
12. Nabavi Moghadam, R., Saberi, M.H., & Sayyari, M.H. (2013). Effect of soil application of iron and manganese sulphate on quantitative and qualitative characteristics of forage maize hybrid single cross 704. *Journal of Crop Improvement*, 15(2), 75-86. <https://doi.org/10.22059/jci.2013.36100>
13. Najafi-Ghiri, M., Ghasemi-Fasaei, R., & Farrokhejad, E. (2013). Factors affecting micronutrient availability in calcareous soils of Southern Iran. *Arid Land Research and Management*, 27(3), 203-215. <https://doi.org/10.1080/15324982.2012.719570>
14. Porto, C. L., Ziuzina, D., Los, A., Boehm, D., Palumbo, F., Favia, P., Tiwari, B., Bourke, P., & Cullen, P. (2018). Plasma activated water and airborne ultrasound treatments for enhanced germination and growth of soybean. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 49, 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.013>
- 15-Randeniya, L.K., & Groot, G. (2015). Non-Thermal plasmatreatment of agricultural seeds for stimulation of germination, removal of surface contamination and other benefits: A review. *Plasma Processes and Polymers*, 12, 608-623. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500042>
16. Rasooli, Z., Barzin, G., Davari Mahabadi, T., & Entezari, M. (2021). Stimulating effects of cold plasma seed priming on germination and seedling growth of cumin plant. *South African Journal of Botany*, 142, 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.06.025>
17. Rathore, V., Tiwari, B., & Nema, S. (2022). Treatment of pea seeds with plasma activated water to enhance germination, plant growth, and plant composition. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 42(1), 109-129. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10211-5>
18. Rathore, V., & Nema, S.K. (2021). Optimization of process parameters to generate plasma activated water and study of physicochemical properties of plasma activated solutions at optimum condition. *Journal of Applied Physics*, 129, 901-924. <https://doi.org/10.1063/5.0033848>
19. Saberi, M., Ghomi, H., & Andreasen, C. (2022). Eco-friendly approach to improve traits of winter wheat by combining cold plasma treatments and carbonization of subtropical biomass waste. *Scientific Reports*, 12, 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15286-4>
20. Safari, N., Iranbakhsh, A., & Oraghi ardeblil, Z. (2017). Non-thermal plasma modified growth and differentiation process of *Capsicum annuum* PP805 Godiva in in vitro conditions. *Plasma Science and Technology*, 19(5), 1-6. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aa57ef>
21. Shainsky, N., Dobrynin, D., Ercan, U., Joshi, S.G., Ji, H., Brooks, A., Fridman, G., Cho, Y., Fridman, A., & Friedman, G., 2012. Plasma acid: water treated by dielectric barrier discharge. *Plasma Processes and Polymers*, 9, 6-13. <https://doi.org/10.1002/ppap.201100084>
22. Shahsavandi, F., & Eshghi, S. (2021). Effects of bicarbonate and Fe sources on vegetative growth and physiological traits of four grapevine cultivars. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 52(20), 2401-2413. <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.1928172>
23. Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, Ph., Roytrakul, S., & Norkaew, O. (2019). Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chemistry*, 289, 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061>
24. Yousefpour, A., & Farajzadeh Memari Tabrizi, E. (2018). Evaluation of micronutrient application at different growth stages on yield and yield components and grain quality of Sweet Corn. *Journal of Crop Ecophysiology*, 12(2), 287-302. (In Persian with English abstract)



Research Article

Vol. 37, No. 6, Feb.-Mar., 2024, p. 957-969

Changes in Soil-Phosphorus Fractions as Affected by Municipal Sewage Sludge and Triple Super Phosphate under Saline and Non-Saline Conditions

H. Hatami^{1*}, H. Parvizi¹, A. Parnian¹, Gh. Ranjbar²

1- Assistant Professor of National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

(*- Corresponding Author Email: h.hatami@areeo.ac.ir)

2- Associate Professor of National Salinity Research Center (NSRC), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Yazd, Iran

Received: 29-10-2023
Revised: 03-12-2023
Accepted: 30-12-2023
Available Online: 30-12-2023

How to cite this article:

Hatami, H., Parvizi, H., Parnian, A., & Ranjbar, Gh. (2024). Changes in Soil-Phosphorus Fractions as Affected by Municipal Sewage Sludge and Triple Super Phosphate under Saline and Non-Saline Conditions. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 957-969. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.85076.1351>

Introduction

The availability of phosphorus (P) is a limiting factor for the production of crops due to its reactions with soil components. Furthermore, there are concerns about the depletion of non-renewable global rock phosphate (the main source of P) reserves because of the high demand for P fertilizers. Therefore, it is essential to revisit existing agricultural practices to determine new resource management practices that utilize renewable resources. The application of sewage sludge could be an alternative P source; contrary to inorganic fertilizers, sewage sludge is cheap, contains nutrients, and improves soil quality due to contained organic matter. The total P content of sewage sludge may vary from less than 0.1% to over 14% on a dry solid basis, depending on the nature of the raw sewage being treated and the treatment process under consideration. However, the use of organic P resources can affect the soil chemistry, leading to changes to the P fractions and their quantities. Hence, the objective of this study was to compare the effect of the application of municipal sewage sludge and triple superphosphate on the distribution of soil-P fractions under saline and non-saline conditions.

Materials and Methods

To investigate the effect of municipal sewage sludge and triple superphosphate on changes in P fractions an incubation experiment was conducted in a completely randomized factorial design with three levels of triple superphosphate (0, 75, and 100 Kg ha⁻¹ which were named T₀, T₁, and T₃, respectively), three levels of municipal sewage sludge (0, 0.25 and 0.5% w/w which were named M₀, M₁ and M₃, respectively), two levels of salinity of irrigation water (2 and 12 dS m⁻¹, which were named saline and non-saline, respectively) and three replicates. The total number of samples was 54. The treated soils were incubated for three months and maintained at field capacity by adding the appropriate amount of saline and non-saline waters. P fractionated to KCl-P (soluble and exchangeable P), NaOH-P (Fe- and Al bound P), HCl-P (Ca-bound P), Res-P (residual P), and organic-P by sequential extraction method. Moreover, P percentage recovery for Olsen-P at each treatment was calculated. P concentration in samples was determined by the molybdate method. Data analysis was performed by MSTAT-C software, and the means were compared at $\alpha=5\%$ by Duncan test.



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.85076.1351>

Results and Discussion

The results showed that although the relative distribution of fractions followed the order of HCl-P > Organic-P > KCl-P > NaOH-P > Res-P, the changes in each fraction were dependent on the type of treatment and fraction. The amounts of KCl-P for application of municipal sewage sludge and fertilizer TSP combined, especially, T₂M₂ were 3.1 and 2.3 times higher than T₀M₀ in non-saline and saline conditions, respectively. The same result was obtained for NaOH-P. The combined and separate application of municipal sewage sludge diminished the relative distribution of HCl-P compared with triple superphosphate and control treatments in both salinities. However, the HCl-P in all treatments was more than 57% of the total P, suggesting that most of the soil P was in the carbonate phase. The treatments did not have a considerable impact on Res-P. The relative distribution of Organic-P increased by increasing levels of salinity and municipal sewage sludge. Therefore, it seems that municipal sewage sludge addition along with fertilizer P can reduce the negative effects of salinity and increase soil P availability compared with alone use of P fertilizer through growing the contents of KCl-P, NaOH-P, and organic-P fractions and, consequently, decreasing P entry into HCl-P fraction. Moreover, the application of municipal sewage sludge plus triple superphosphate increased P recovery as Olsen-P compared to a separate application of triple superphosphate which confirmed the advantage of the combined use of these sources.

Conclusion

The findings of this study indicate that the simultaneous application of municipal sewage sludge and triple superphosphate can effectively improve phosphorus (P) availability in saline conditions. This enhancement is attributed to the alteration of the relative distribution of non-stable P fractions, such as KCl-P and NaOH-P, which increase, while stable P fractions like HCl-P decrease. Moreover, the addition of municipal sewage sludge into soils led to a significant increase in organic C as well as the relative distribution of organic-P. Therefore, application of municipal sewage sludge can improve the physico-chemical properties of saline soil along with increase of P availability. Hence, further research on the growth response of halophyte plants as affected by these treatments is recommended.

Keywords: Available phosphorus, Chemical fertilizer, Organic fertilizer, Sequential extraction

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۵۷-۹۶۹

تغییر شکل‌های فسفر خاک تحت تأثیر لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در دو شرایط شور و غیر شور

حدیث حاتمی^{۱*} - حسین پرویزی^۱ - امیر پرنیان^۱ - غلامحسین رنجبر^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

چکیده

مطالعه شکل‌های مختلف فسفر در خاک‌های تیمار شده با ترکیبات آلی در مدیریت بهتر این مواد در شرایطی با قدرت جذب کم عناصر غذایی مانند شرایط خاک شور حائز اهمیت است. هدف از این پژوهش مقایسه تأثیر لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل بر توزیع شکل‌های مختلف فسفر خاک (محلول و تبادل) (KCl-P)، متصل به آهن و آلومینیوم (NaOH-P)، متصل به کلسیم (HCl-P)، باقی‌مانده (Res-P) و آلی (Organic-P) در دو شرایط شور و غیر شور بود. در این راستا از یک آزمایش انکوباسیون به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی شامل ۳ سطح لجن فاضلاب شهری (صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد وزنی به ترتیب M_0 ، M_1 و M_2)، ۳ سطح سوپر فسفات تریپل (صفر، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار به ترتیب T_0 ، T_1 و T_2)، ۲ سطح شوری (۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) و ۳ تکرار انجام شد. شکل‌های مختلف فسفر پس از ۳ ماه از شروع آزمایش به روش عصاره‌گیری متوالی استخراج و توسط روش رنگ‌سنجی قرائت شدند. نتایج نشان داد که به‌طور کلی سهم نسبی فسفر در اجزای مختلف دارای توالی $\text{NaOH-P} > \text{Res-P} > \text{Organic-P} > \text{HCl-P} > \text{KCl-P}$ بود اما روند تغییرات بسته به نوع تیمار و شکل فسفر متفاوت بود. کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل به‌ویژه در تیمار T_2M_2 به‌ترتیب موجب افزایش ۳/۱ و ۲/۳ برابری KCl-P در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر و به‌ترتیب ۲/۲ و ۱/۸ برابری NaOH-P در مقایسه با تیمار T_0M_0 شد. درحالی‌که کاربرد جداگانه و توأم لجن فاضلاب شهری در هر دو شوری سبب کاهش سهم نسبی در HCl-P در مقایسه با تیمارهای سوپر فسفات تریپل و شاهد گردید. اعمال تیمارهای آزمایشی تأثیر معنی‌داری بر Res-P نشان نداد؛ اما افزایش Organic-P با افزایش شوری و کاربرد تیمارهای لجن فاضلاب شهری مشاهده شد؛ بنابراین به‌نظر می‌رسد که کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل می‌تواند با افزایش سهم نسبی KCl-P و NaOH-P و کاهش ورود فسفر به جزء HCl-P سبب کاهش اثرات منفی شوری و افزایش فراهمی فسفر گردد. نتایج بررسی درصد بازیافت فسفر قابل دسترس خاک نیز تأییدکننده تأثیر بیشتر کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در افزایش کارایی این تیمارها در مقایسه با کاربرد جداگانه این منابع بود.

واژه‌های کلیدی: عصاره‌گیری متوالی، فسفر قابل دسترس، کود آلی، کود شیمیایی

مقدمه

(Xie et al., 2019). در حال حاضر بخش عمده‌ای از فسفر موجود در کودهای شیمیایی از سنگ فسفات که از جمله منابع غیرقابل تجدید است تأمین می‌شود لذا، همواره نگرانی‌هایی درباره اتمام آن وجود دارد (Yu et al., 2015). امروزه بحث تخلیه فسفر به یک مسئله جهانی

فسفر یکی از عناصر ضروری در تغذیه انسان و دیگر موجودات زنده از جمله عوامل محدودکننده تولید در اکوسیستم‌های کشاورزی می‌باشد

۱- استادیار پژوهشی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
۲- دانشیار پژوهشی مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
(Email: h.hatami@areeo.ac.ir) (*- نویسنده مسئول)

بر دینامیک سفر خاک مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بیان کردند که تیمارهای آزمایشی به شدت دینامیک سفر خاک را تحت تأثیر قرار داد به نحوی که پس از یک سال از کاربرد لجن، سطح بالای لجن قادر بود که فراهمی سفر خاک را به اندازه کود شیمیایی سوپر فسفات تریپل افزایش دهد. همچنین این محققین نشان دادند که بیشترین افزایش محتوای سفر مربوط به جزءهای کربنات و اکسیدهای آهن و آلومینیوم بود. در مطالعه‌ای دیگر شکل‌های مختلف سفر خاک (محلول، تبدلی، آلی، پیوند شده با کربنات، پیوند شده با اکسیدهای آهن و آلومینیوم و باقی‌مانده) پس از افزودن لجن فاضلاب و کمپوست آن مورد بررسی قرار گرفت (Wierzbowska et al., 2020). نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار سفر کل و جزءهای سفر با افزودن منبع آلی تغییر کرد و بیشترین مقدار سفر (۳۹/۷-۳۴/۷ درصد) در جزء آلی و کمترین آن (۲/۷-۱/۶ درصد) در جزء محلول مشاهده شد.

به‌طور کلی تفاوت مطالعات مختلف در سهم هر یک از جزءها می‌تواند به دلیل تفاوت مقدار و شکل‌های سفر موجود در لجن فاضلاب به کار رفته باشد که خود به شرایط فیزیکوشیمیایی فرایندهای تصفیه فاضلاب و تولید لجن وابسته است (Wierzbowska et al., 2020). با این وجود در تمام مطالعات صورت گرفته اثر مثبت آن بر افزایش سفر خاک گزارش شده است.

علی‌رغم مطالعات وسیع صورت گرفته، سهم مطالعاتی که به تأثیر شوری و افزودن لجن فاضلاب بر جزءبندی سفر خاک پرداخته باشند کم‌تر می‌باشد. علاوه بر این در اکثر آن‌ها، مطالعه در محدوده شوری-های پایین خاک صورت گرفته است و در طول دوره آزمایش رطوبت از طریق آب غیر شور تأمین شده است (Meena et al., 2018; Mousavi et al., 2020; Rehman et al., 2021). حال آن‌که بررسی خاک در شرایط شوری طبیعی آب و خاک می‌تواند نتایج نزدیک‌تر به واقعیتی را فراهم سازد؛ بنابراین، مطالعه حاضر با هدف مقایسه تأثیر کاربرد جداگانه و توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل بر توزیع شکل‌های سفر معدنی خاک در شرایط شور و غیر شور طراحی و اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر سوپر فسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری به‌عنوان دو منبع آلی و معدنی سفر بر توزیع شکل‌های مختلف سفر یک خاک آهکی آبیاری شده با دو شوری مختلف از یک مطالعه گلدانی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل استفاده شد. تیمارهای آزمایشی شامل ۳ سطح سوپر فسفات تریپل (صفر، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار به ترتیب T_0 ، T_1 و T_2)، ۳ سطح لجن فاضلاب شهری (صفر، ۲۵/۰ و ۵۰/۵ درصد وزنی به ترتیب M_0 ، M_1 و M_2) و ۲ سطح شوری (۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) بود؛ بنابراین، با احتساب ۳

تبدیل شده است به‌طوری‌که بر اساس تخمین‌های صورت گرفته چنانچه سطح فعلی حفاری‌ها حفظ شود؛ منابع سفر بین ۵۰-۱۰۰ سال آینده به اتمام خواهند رسید و پس از آن قطعاً سفر عاملی اصلی محدودکننده در تولید محصولات کشاورزی خواهد بود (Wierzbowska et al., 2020)؛ بنابراین، بازبینی در فعالیت‌های کشاورزی به‌منظور کاربرد شیوه‌های مدیریت منابع جدید تجدیدپذیر کاملاً ضروری به نظر می‌رسد (Rehman et al., 2021).

در این راستا پتانسیل تأمین سفر از ترکیبات آلی از جمله لجن فاضلاب در جهت مدیریت پایدار سفر در محیط‌های کشاورزی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است زیرا صرف‌نظر از تجدیدپذیر بودن، دارای ویژگی‌هایی مثل غنی بودن از سفر (و سایر عناصر غذایی)، ارزان قیمت‌تر بودن در مقایسه با کودهای شیمیایی و بهبوددهندگی کیفیت خاک است (Rehman et al., 2021; Jalali et al., 2021).

طبق گزارش‌های ارائه شده مقدار سفر کل موجود در لجن فاضلاب بسته به نوع و ماهیت لجن خام تصفیه شده و فرآیند تهیه آن از کمتر از ۰/۱ درصد تا بیش از ۱۴ درصد متغیر است (McLaughlin et al., 1984). علاوه بر این، محتوای سفر موجود در لجن فاضلاب به دلیل افزایش استفاده از شوینده‌های بر پایه سفر، در حال افزایش است (McLaughlin et al., 1984)؛ بنابراین، با توجه به مقدار قابل توجه سفر موجود در این منبع از یک‌سو و لزوم مدیریت زباله‌های تولید شده به‌منظور کاهش مشکلات زیست‌محیطی آن‌ها از سوی دیگر، کاربرد لجن فاضلاب به‌عنوان منبع سفر در خاک می‌تواند از جمله راه‌کارهای افزایش فراهمی سفر خاک از یک منبع تجدیدپذیر محسوب شود.

به‌طور کلی در چندین مطالعه اثر مثبت منابع آلی از جمله لجن فاضلاب بر افزایش فراهمی سفر خاک (Akhtar et al., 2002; Khorshid et al., 2009; Frišták & Soja, 2015; Kahiluoto et al., 2015; al., 2015)، جذب توسط گیاه (Bai et al., 2018; Kazemalilou et al., 2022) و بهبود برخی ویژگی‌های خاک (Akhtar et al., 2002; Achkir et al., 2003; Bahremand et al., 2002) گزارش شده است؛ اما با توجه به اینکه افزودن منابع آلی به محیط خاک می‌تواند شیمی خاک و در نتیجه مقدار و توزیع سفر در جزءهای مختلف خاک را دستخوش تغییر قرار دهد (Audette et al., 2016) و از طرف دیگر با توجه به متفاوت بودن پتانسیل تحرک و گردش سفر در هر جزء، فراهمی سفر خاک به مقدار و شکل‌های سفر موجود در خاک بستگی خواهد داشت (Akhtar et al., 2002)؛ بنابراین، مدیریت منطقی و صحیح سفر مستلزم آگاهی از سفر کل و اشکال مختلف آن در خاک است که برای این منظور از روش عصاره‌گیری متوالی استفاده می‌شود. هوبن و همکاران (Houben et al., 2019) اثر لجن فاضلاب‌های تهیه شده به روش‌های مختلف (حرارت داده شده و کمپوست شده) را

این روش عصاره‌گیری، ۱ گرم از هر یک از نمونه‌های خاک به‌صورت متوالی توسط ۲۰ میلی‌لیتر کلرید پتاسیم ۲ مولار (KCl-P)، ۲۰ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۱ مولار (NaOH-P)، ۲۰ میلی‌لیتر اسید کلریدریک ۰/۵ مولار (HCl-P) و نسبت ۵:۲ اسید نیتریک-اسید پرکلریک (Res-P) عصاره‌گیری گردید که به‌ترتیب بیانگر جزءهای محلول و تبادل، متصل به آهن و آلومینیوم، متصل به کلسیم و باقی مانده بود. اندازه‌گیری فسفر در تمام عصاره‌های تهیه شده با دستگاه اسپکتروفتومتر به روش رنگ‌سنجی (Murphy & Riley, 1962) انجام شد.

برای اندازه‌گیری فسفر کل (Total P) و آلی (Organic-P) از روش پیشنهاد شده توسط والکر و آدامز (Walker & Adams, 1958) استفاده شد. کلیات روش به این صورت بود که ابتدا ۰/۵ گرم نمونه خاک به مدت ۲ ساعت در کوره گرافیتی با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. پس از سرد شدن، نمونه توسط ۲۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک ۱ نرمال هضم و به مدت ۱۶ ساعت شیک گردید. فسفر اندازه‌گیری شده از عصاره حاصل، به‌عنوان فسفر کل (Total P) در نظر گرفته می‌شود. همین مراحل برای نمونه خاک مورد نظر بدون قرار دادن در کوره، به‌منظور اندازه‌گیری فسفر معدنی تکرار شد. از اختلاف فسفر کل و فسفر معدنی، Organic-P محاسبه گردید. غلظت فسفر در این عصاره‌ها نیز به روش رنگ‌سنجی (Murphy & Riley, 1962) اندازه‌گیری شد.

تکرار تعداد کل واحدهای آزمایشی ۵۴ عدد بود. خاک مورد استفاده در این تحقیق از مرکز ملی تحقیقات شوری از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه و پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و برخی از پارامترهای فیزیکی و شیمیایی این خاک مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (جدول ۱). لجن فاضلاب شهری نیز به‌صورت خشک از تصفیه‌خانه فاضلاب شهری یزد تهیه و از الک ۱ میلی‌متری عبور داده شد. برخی از پارامترهای اندازه‌گیری شده لجن فاضلاب شهری در جدول ۲ نشان داده شده است.

سطوح مورد نظر از هر یک از منابع کودی با ۱ کیلوگرم خاک خشک مخلوط و نمونه‌ها داخل گلدان‌های پلاستیکی در گلخانه نگهداری شدند. زمان نگهداری نمونه‌ها در گلخانه ۳ ماه بود که در این مدت رطوبت نمونه‌ها توسط آب‌های با شوری ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در حد ظرفیت زراعی حفظ گردید. لازم به یادآوری است که قبل از اعمال تیمارها، خاک گلدان‌ها چندین بار توسط آب با شوری‌های مورد نظر آبیاری شد تا تعادل لازم ایجاد گردد. تیمار شوری آب آبیاری با اختلاط آب شهری و آب انتقال یافته از خارج محل آزمایش با شوری بسیار بالا تهیه شد (جدول ۳).

در پایان این مدت، در هر نمونه فسفر قابل استفاده (Olsen-P) به روش اولسن (Olsen et al., 1954) و شکل‌های فسفر معدنی با روش ارائه شده توسط آن و همکاران (Ann et al., 2000) که تغییر یافته هدلی و همکاران (Hedley et al., 1982) بود، عصاره‌گیری شدند. در

جدول ۱- مقادیر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه

Table 1- Some physicochemical properties of soil used

شن (Sand)	سیلت (Silt)	رس (Clay)	pH	EC (dS m ⁻¹)	CCE (%)	OC (%)	N (%)	P _{available} (mg kg ⁻¹)	P _{total} (mg kg ⁻¹)	K _{available} (mg kg ⁻¹)
68.7	14	17.3	7.2	14	32	0.08	0.007	4.2	271.3	172

جدول ۲- مقادیر برخی از ویژگی‌های شیمیایی لجن فاضلاب شهری

Table 2- Some physicochemical properties of municipal sewage sludge used

pH (1:10)	EC (1:10) dS m ⁻¹	خاکستر Ash (%)	ماده آلی Organic matter (%)	OC (%)	N (%)	Total P (mg kg ⁻¹)	Total K (mg kg ⁻¹)	Cd	Pb
6.4	4.1	26	68.8	39.9	60000	24000	6000	nd*	38.6

* :None-detected

جدول ۳- مقادیر برخی از خصوصیات شیمیایی آب آبیاری

Table 3- Some physicochemical properties of irrigation water used

EC dS m ⁻¹	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	SAR
meq l ⁻¹								
2	8	9.1	4.3	16.8	27.9	1.1	1.2	6.5
12	7.9	35	17	70	111	2.9	4.1	13.7

به منظور تعیین تأثیر کود شیمیایی و ماده آلی بر مقدار فسفر قابل دسترس در هر یک از تیمارها، درصد بازیافت فسفر^۱ بر اساس رابطه ۱ محاسبه شد:

$$(۱) \quad \text{افزوده شده } P / \text{اصلاح شده } P \times ۱۰۰ = \text{درصد بازیافت فسفر}$$

در رابطه بالا، اصلاح شده P با توجه به رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$(۲) \quad \text{شاهد } P - \text{اولسن } P = \text{اصلاح شده } P$$

در رابطه ۲، شاهد P در تیمارهای کاربرد جداگانه کود شیمیایی و ماده آلی (T_1, T_2, M_1, M_2)، فسفر اولسن نمونه T_0M_0 و در تیمارهای کاربرد توأم کود شیمیایی و ماده آلی ($T_1M_1, T_1M_2, T_2M_1, T_2M_2$)، فسفر اولسن تیمار ماده آلی (M_1 یا M_2) در نظر گرفته شد. برای پردازش داده‌ها و رسم نمودارها از نرم‌افزارهای MSTATC و Excel و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس مربوط به شکل‌های مختلف فسفر عصاره گیری شده نشان داد که تنها در شکل KCl-P تمام اثرات اصلی و متقابل تیمارهای آزمایشی در سطح احتمال ۱ (۵ درصد) معنی‌دار شد (جدول ۴). در مورد سایر شکل‌های اندازه‌گیری شده (به جز اثر متقابل شوری، لجن فاضلاب و سوپر فسفات تریپل در Res-P و اثر متقابل شوری و لجن فاضلاب در NaOH-P و Organic-P) اثرات متقابل دارای تفاوت معنی‌دار نبود اما تفاوت معنی‌دار در اکثر اثرات اصلی مشاهده شد؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که تغییر شوری آب آبیاری و افزودن لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل بر توزیع شکل‌های فسفر خاک اثرگذار بوده است. با توجه به اینکه هدف از این مطالعه بررسی توزیع جزءهای فسفر تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی بود بنابراین، با وجود اینکه اثرات متقابل سه‌گانه در اکثر جزءها معنی‌دار نشده است اما نتایج مربوط به این اثر نیز در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. نتایج مربوط به اثرات سه‌گانه شوری، لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل بر شکل‌های اندازه‌گیری شده فسفر خاک در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر دو شوری افزودن تیمارهای آزمایشی به خاک (به جزء T_1M_0 در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) سبب افزایش معنی‌دار سهم نسبی در جزء KCl-P در مقایسه با تیمار شاهد شد. همچنین با افزایش سطوح سوپر فسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری، سهم نسبی این جزء افزایش یافت. با توجه به این که این شکل از فسفر بیانگر فسفر محلول و تبدلی موجود در خاک

است بنابراین، افزودن لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل تأثیر مثبتی بر افزایش فسفر قابل دسترس خاک داشته است که این نتیجه توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Tsadilas et al., 1995; Laboski & Lamb, 2003; Kahiluoto et al., 2015; Moeini et al., 2016; Shahbazi et al., 2019). با توجه به اینکه ۷۰ تا ۹۰ درصد از فسفر موجود در لجن فاضلاب را مربوط به شکل غیر آلی آن دانسته‌اند (Akhtar et al., 2002) بنابراین، تغییر شکل‌های معدنی فسفر (از جمله محلول و تبدلی) با کاربرد لجن فاضلاب امری محتمل خواهد بود. علاوه بر این، مقادیر KCl-P در تمام تیمارهای مربوط به شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر (حتی در تیمار T_0M_0) به صورت معنی‌داری کمتر از تیمارهای هم‌ارز آن‌ها در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود که این نکته گواه تأثیر شوری بر کاهش فراهمی فسفر خاک است. نتایج مطالعات نشان داده است که شوری و غلظت عناصر غذایی خاک از جمله فسفر دارای هم‌بستگی هستند بدین نحو که افزایش شوری موجب کاهش فراهمی و شار فسفر محلول در خاک می‌گردد (Duan & Kaushal, 2015; Xie et al., 2019)؛ اما نکته قابل توجه روند تغییرات KCl-P تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی است. در هر دو شوری افزودن هم‌زمان لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل تأثیر بیشتری در افزایش KCl-P در مقایسه با سایر تیمارها داشته است به طوری که سهم نسبی KCl-P در تیمار T_2M_2 به ترتیب به بیش از ۱۱ و ۹ درصد فسفر کل در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر رسید که در مقایسه با تیمار شاهد به ترتیب ۳/۱ و ۲/۳ برابر بیشتر بود؛ اما با این وجود اثر کاربرد جداگانه لجن فاضلاب شهری به‌ویژه تیمار T_0M_2 تأثیر بسیار نزدیکی بر سهم نسبی KCl-P در مقایسه با T_2M_2 داشته است به نحوی که در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر تفاوت معنی‌داری میان این دو تیمار مشاهده نشد؛ بنابراین، به نظر می‌رسد که در شرایط شور، افزودن لجن فاضلاب شهری به صورت جداگانه یا توأم با کود سوپر فسفات تریپل می‌تواند تأثیر قابل توجهی در افزایش فسفر قابل دسترس خاک و کاهش اثرات شوری داشته باشد. در مطالعات دیگر نیز برتری کاربرد توأم لجن فاضلاب (و دیگر منابع کودی آلی) و کود شیمیایی در فراهمی فسفر خاک گزارش شده است (Reddy et al., 1999; Halajnia et al., 2009; Meena et al., 2018; Rehman et al., 2021).

جدول ۴- تجزیه واریانس شکل‌های مختلف فسفر عصاره‌گیری شده در تیمارها

Table 4- Analysis of variance for different forms of extracted phosphorus in the studied treatments

منابع تغییر (Sources)	درجه آزادی freedom) (Degrees of	میانگین مربعات Mean of) (Squares				
		KCl-P	NaOH-P	HCl-P	Res-P	Organic-P
شوری (Salinity)	1	12.9**	67.6**	2.8	2.7	143.1**
لجن فاضلاب (Sewage sludge)	2	99.3**	50.4**	705.9**	13.8**	235.3**
سوپر فسفات تریپل (Triple superphosphate)	2	15.2**	6.5**	161.6**	2.2	48.5**
شوری × لجن فاضلاب (Salinity × Sewage sludge)	2	3.9**	3.8*	0.2	1.4	20.9*
شوری × سوپر فسفات تریپل (Salinity × Triple superphosphate)	2	0.5*	0.03	0.8	2.1	0.2
لجن فاضلاب × سوپر فسفات تریپل (Sewage sludge × Triple superphosphate)	4	1.9**	1.6	2.3	1.9	2.6
شوری × لجن فاضلاب × سوپر فسفات تریپل (Salinity × Sewage sludge × Triple superphosphate)	4	1.2**	1.6	6.0	4.2*	0.7
خطا (Error)	36	0.1	0.8	28.8	1.5	5.1
ضریب تغییرات (%) (Coefficient of Variation)		4.8	13.3	8.1	14.6	23.1

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطوح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد
* and ** significant at 5% and 1% probability levels, respectively.

جدول ۵- اثر شوری و سطوح مختلف سوپر فسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری بر سهم نسبی شکل‌های فسفر

Table 5- Effect of salinity and different levels of triple superphosphate and municipal sewage sludge on distribution of Soil-P fractions

شوری (dS m ⁻¹) Salinity	سطوح مختلف سوپر فسفات تریپل و لجن فاضلاب شهری Different levels of triple superphosphate and municipal sewage sludge	سهم نسبی فسفر در اجزای عصاره‌گیری شده (%) Distribution of Soil-P fractions				
		KCl-P	NaOH-P	HCl-P	Res-P	Organic-P
2	T ₀ M ₀	3.8 ^j	4.4 ^{fg}	77.7 ^a	9.4 ^{abc}	4.8 ^g
	T ₁ M ₀	6.2 ^h	4.9 ^{efg}	72.4 ^{abc}	9.4 ^{abc}	5.1 ^g
	T ₂ M ₀	6.8 ^{gh}	6.6 ^d	70.0 ^{abcd}	9.2 ^{abc}	6.5 ^{fg}
	T ₀ M ₁	8.8 ^e	8.3 ^{bc}	67.5 ^{bcde}	8.5 ^{bce}	6.9 ^{efg}
	T ₁ M ₁	9.9 ^{bc}	10.3 ^a	62.9 ^{cde}	8.3 ^{bce}	8.4 ^{efg}
	T ₂ M ₁	10.2 ^{bc}	8.4 ^{bc}	62.5 ^{cde}	8.9 ^{abc}	9.9 ^{def}
	T ₀ M ₂	10.3 ^{bc}	8.7 ^b	63.6 ^{cde}	9.2 ^{abc}	8.2 ^{efg}
	T ₁ M ₂	10.6 ^b	8.7 ^b	62.6 ^{cde}	7.7 ^{bcd}	10.4 ^{def}
	T ₂ M ₂	11.9 ^a	9.5 ^{ab}	57.8 ^e	7.5 ^{bcd}	13.3 ^{abcd}
12	T ₀ M ₀	4.4 ⁱ	3.8 ^g	76.9 ^{ab}	9.6 ^{ab}	5.2 ^g
	T ₁ M ₀	5.0 ⁱ	4.0 ^{fg}	72.7 ^{abc}	11.0 ^a	6.2 ^{fg}
	T ₂ M ₀	7.6 ^f	4.6 ^{fg}	71.6 ^{abc}	7.9 ^{bcd}	7.3 ^{efg}
	T ₀ M ₁	7.4 ^{fg}	5.2 ^{defg}	67.2 ^{bcde}	9.3 ^{abc}	10.9 ^{cde}
	T ₁ M ₁	8.0 ^f	6.4 ^{de}	65.2 ^{cde}	7.6 ^{bcd}	12.7 ^{bcd}
	T ₂ M ₁	8.8 ^e	6.7 ^d	62.5 ^{cde}	7.1 ^{cd}	14.9 ^{abc}
	T ₀ M ₂	9.1 ^{de}	5.5 ^{def}	65.8 ^{cde}	6.3 ^d	13.3 ^{abcd}
	T ₁ M ₂	9.8 ^c	6.8 ^d	60.3 ^{de}	7.7 ^{bcd}	15.4 ^{ab}
	T ₂ M ₂	9.6 ^{cd}	6.9 ^{cd}	58.8 ^e	7.7 ^{bcd}	17.0 ^a

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک دارای اختلاف معنی‌دار (P<0.05) نمی‌باشند. T₀, T₁, T₂ به ترتیب سطوح صفر، ۷۵ و ۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار سوپر فسفات تریپل و M₀, M₁, M₂ به ترتیب سطوح صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد (وزنی) لجن فاضلاب شهری هستند.

In every column numbers followed by the same letter are not significantly different (P<0.05). T₀, T₁, T₂ are 0, 75, and 100 Kg ha⁻¹ triple superphosphate and M₀, M₁, M₂ are 0, 0.25, 0.5% (w/w) municipal sewage sludge, respectively.

آن برای گیاه پیشنهاد نمودند. فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم در طی فرآیند معدنی شدن می‌تواند به‌عنوان منبع بالقوه فسفر خاک و مکمل فسفر قابل دسترس خاک نقش‌آفرین باشد بنابراین، این جزء به‌عنوان فسفر نسبتاً فعال خاک در نظر گرفته می‌شود (Rose *et al.*, 2010). از این رو کاربرد منابعی که سبب افزایش این جزء از فسفر خاک گردند بسیار مهم و قابل توجه خواهد بود.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود جزء HCl-P بیشترین سهم از فسفر کل (حدود ۵۷ تا ۷۷ درصد بسته به نوع تیمار) را به خود اختصاص داده است که حاکی از این نکته است که بخش عمده فسفر خاک به‌صورت پیوند شده با کلسیم وجود دارد. مشابه این روند در مطالعات جلالی و رنجبر (Jalali & Ranjbar, 1999)، الوارز-رگل (Alvarez-Rogel *et al.*, 2007)، معینی و همکاران (Moeini *et al.*, 2016) و شهبازی و همکاران (Shahbazi *et al.*, 2019) نیز گزارش شده است. همچنین، مقایسه تیمارهای هم‌ارز در شوری‌های مورد مطالعه نشان داد که در هیچ‌یک از تیمارهای آزمایشی، افزایش شوری نتوانست تفاوت معنی‌داری در فسفر HCl-P ایجاد نماید؛ اما روند تغییرات فسفر در HCl-P در هر یک از شوری‌های مورد مطالعه متفاوت از جزءهای KCl-P و NaOH-P بود. به بیان دیگر، با اعمال تیمارهای آزمایشی سهم نسبی فسفر در این جزء کاهش یافت به‌نحوی که در هر دو شوری بیشترین و کمترین مقدار این جزء به‌ترتیب در تیمارهای شاهد (T_0M_0) و کاربرد توأم منابع (T_2M_2) مشاهده شد. علاوه بر این، سهم نسبی فسفر HCl-P در تیمارهای T_1M_0 و T_2M_0 در هر دو شوری فاقد تفاوت معنی‌دار با تیمار T_0M_0 بود؛ درحالی‌که در تیمارهای T_0M_1 ، T_0M_2 ، T_1M_1 ، T_2M_1 و T_1M_2 تفاوت معنی‌دار با تیمار T_0M_0 مشاهده شد.

این نتایج نشان می‌دهد که کاربرد لجن فاضلاب شهری چه به‌صورت جداگانه و چه توأم با سوپر فسفات تریپل سبب کاهش ورود فسفر به جزء HCl-P شده است. با توجه به این‌که فسفر متصل به کلسیم به‌عنوان بخشی از فسفر پایدار خاک در نظر گرفته می‌شود (Costa *et al.*, 2016)؛ در تعدادی از مطالعات صورت گرفته عدم تغییر یا تغییرات اندک در افزایش این جزء با افزودن کودهای آلی و معدنی گزارش شده است (Kashem *et al.*, 2004; Moeini *et al.*, 2016; Meena *et al.*, 2018; Houben *et al.*, 2019; Shahbazi *et al.*, 2023; Biassoni *et al.*, 2019)؛ اما برخی از مطالعات نیز به کاهش سهم آن با اعمال تیمارهای آزمایشی اشاره کرده‌اند. به‌عنوان مثال، الوتایی و همکاران (Alotaibi *et al.*, 2021) در بررسی توزیع فسفر در یک خاک تیمار شده با بیوچارهای^۱ مختلف نشان دادند که در بیوچار مربوط به لجن فاضلاب، کود مرغی و تفاله زیتون سهم نسبی HCl-P

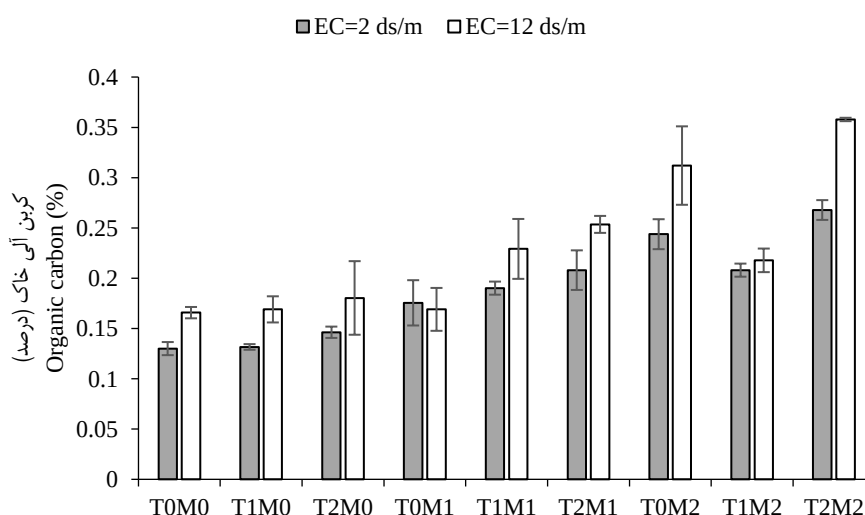
به‌طور کلی مکانیسم‌های افزایش فراهمی فسفر با کاربرد منابع آلی را می‌توان جایگزینی آنیونی ترکیبات آلی محلول حاصل از تجزیه با یون‌های فسفات موجود در مکان‌های جذبی، ایجاد پوشش بر روی سطوح جذب‌کننده اکسیدهای آهن، آلومینیوم و کربنات‌ها و ایجاد کمپلکس با یون‌های آهن، آلومینیوم و کربنات دانست (Havlin *et al.*, 1999).

افزودن لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل علاوه بر افزایش جزء KCl-P، سبب افزایش سهم نسبی NaOH-P که شامل فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم است، گردید (جدول ۵). بیشترین افزایش در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر به‌ترتیب در تیمارهای T_1M_1 و T_2M_2 به مقدار ۱۰/۳ و ۶/۹ درصد مشاهده شد که در مقایسه با تیمار شاهد سبب افزایش ۲/۳ و ۱/۸ برابری فسفر در این جزء شد. لازم به ذکر است اگرچه در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر، سهم نسبی NaOH-P در تیمار T_1M_1 بزرگ‌تر از تیمار T_2M_2 است اما تفاوت میان این دو تیمار از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول ۵). همچنین مقایسه تیمارهای هم‌ارز در شوری‌های مورد مطالعه نشان داد که در تمام تیمارهای آزمایشی (به استثنای T_0M_0 و T_1M_0) افزایش شوری موجب کاهش معنی‌داری سهم نسبی NaOH-P شد. دینگ و همکاران (Ding *et al.*, 2020) نیز در بررسی تأثیر چند منبع آلی و معدنی بر توزیع فسفر خاک نشان دادند که با افزایش شوری خاک، سهم فسفر متصل به اکسیدهای آهن و آلومینیوم کاهش می‌یابد که این نتیجه مشابه با نتایج پژوهش حاضر بود. علاوه بر این، کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل، افزایش معنی‌داری در این جزء در مقایسه با کاربرد جداگانه لجن فاضلاب شهری در هیچ‌یک از شوری‌های مورد مطالعه ایجاد نکرد اما در مقایسه با کاربرد جداگانه سوپر فسفات تریپل، به‌صورت معنی‌داری افزایش مشاهده شد؛ بنابراین، این نتایج پیشنهاد می‌دهد که کاربرد لجن فاضلاب شهری در مقایسه با کود شیمیایی تأثیر بیشتری در افزایش فسفر مربوط به جزء NaOH-P داشته است.

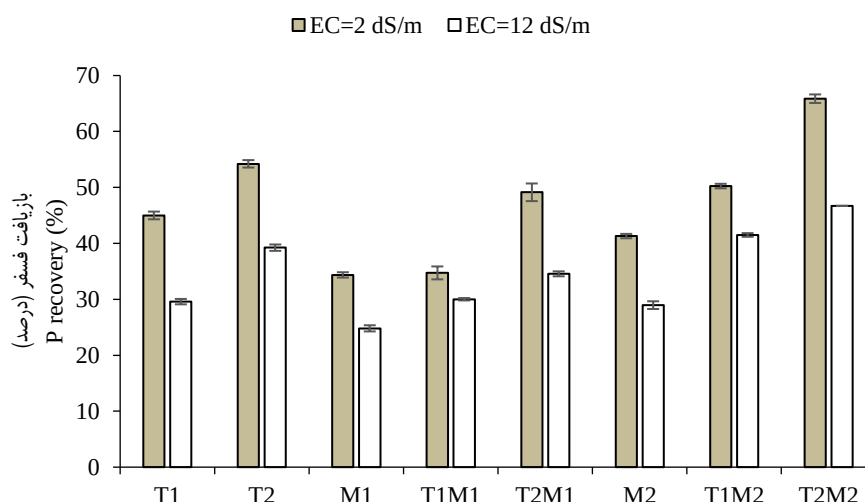
منا و همکاران (Meena *et al.*, 2018) در بررسی اثرات تیمارهای کودهای شیمیایی (NPK)، کمپوست زباله شهری و کودهای شیمیایی + کمپوست زباله شهری بر توزیع شکل‌های مختلف فسفر یک خاک شور ($EC (1:2) = 7.2 \text{ dS m}^{-1}$) نشان دادند که در سال اول این تیمارها به ترتیب موجب افزایش ۱/۹، ۱/۸ و ۲/۶ برابری فسفر متصل به آهن در مقایسه با تیمار شاهد گردید و در سال آخر مطالعه (سال سوم) به ترتیب افزایش ۳/۳، ۳/۵ و ۴/۹ برابر در مقایسه با تیمار شاهد گزارش شد. این محققین، استفاده توأم منابع آلی و معدنی فسفر را به‌منظور بهبود انحلال فسفر و کاهش رسوب آن و در نتیجه افزایش فراهمی

فسفر را شامل می‌شد (جدول ۵). در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر تنها تیمارهای T_0M_2 ، T_2M_1 ، T_1M_2 و T_2M_2 سبب افزایش معنی‌دار Organic-P در مقایسه با تیمار شاهد شد اما در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر در تیمارهای T_0M_1 ، T_1M_1 ، T_2M_1 ، T_0M_2 ، T_1M_2 و T_2M_2 تفاوت معنی‌دار در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده شد؛ بنابراین، افزودن تیمارهای T_1M_0 و T_2M_0 در هیچ‌کدام از شوری‌های مورد مطالعه سبب افزایش معنی‌دار فسفر در این جزء نشد درحالی‌که کاربرد جداگانه و توأم سطح T_2 لجن فاضلاب شهری با سوپر فسفات تریپل می‌تواند در هر دو شوری در افزایش فسفر آلی خاک مؤثر باشد. همچنین مقایسه تیمارهای هم‌ارز در شوری‌های مورد مطالعه نشان داد که در تیمارهای T_0M_1 ، T_1M_1 ، T_2M_1 ، T_0M_2 ، T_1M_2 و T_2M_2 سهم نسبی Organic-P در شوری ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر بزرگ‌تر از شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. به‌طور کلی با توجه به درصد بالای کربن آلی در نمونه لجن فاضلاب شهری (جدول ۲)، افزایش سهم نسبی Organic-P در تیمارهای لجن فاضلاب امری دور از انتظار نبود. علاوه‌بر این، تغییرات کربن آلی خاک در تیمارهای آزمایشی نیز دلالت بر تأثیر مثبت لجن فاضلاب شهری بر افزایش کربن آلی خاک در مقایسه با تیمارهای شاهد و سوپر فسفات تریپل داشت (شکل ۱). هم-بستگی مثبت بین کربن آلی و Organic-P در مطالعات ترنر و همکاران (Turner et al., 2003)، حیدری و همکاران (Heidari et al., 2013) و کستا و همکاران (Costa et al., 2016) گزارش شده است.

به‌صورت معنی‌داری کمتر از تیمار شاهد بود. این محققین بیان کردند که تأثیر این تیمارها بر تحریک رهاسازی فسفر از طریق تجزیه ماده آلی و حلالیت جزء متصل به کلسیم، موجب کاهش فسفر HCl-P و از طرف دیگر افزایش فرم‌های ناپایدار فسفر (به‌خصوص محلول و تبادل) شده است. در مطالعه‌ای دیگر نیز افزایش فسفر تمام اجزای مورد مطالعه به‌جز HCl-P با افزودن کود حیوانی به خاک گزارش شد (Halajnia et al., 2009). این محققین دلیل این مشاهده را کاهش تشکیل رسوب فسفر به شکل فسفات کلسیم به دلیل پیوند فسفر با ترکیبات آلی فلزی موجود در کود دامی دانستند. نتایج مشابه دیگری توسط زو و همکاران (Xu et al., 2014)، دینگ و همکاران (Ding et al., 2020) و موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2020) نیز گزارش شده است. بر اساس نتایج، سهم نسبی فسفر در جزء Res-P تقریباً در تمام تیمارهای آزمایشی کمتر از ۱۰ درصد فسفر کل بود و روند تغییرات فسفر در این جزء در هر دو شوری مورد مطالعه نزولی بود (جدول ۵)؛ اما با این وجود مقایسه میانگین‌ها نشان داد که این تغییرات به‌خصوص در شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر موجب ایجاد تفاوت معنی‌داری میان تیمارهای آزمایشی و شاهد نگردید که می‌تواند نشان‌دهنده پایداری و ثبات این جزء حتی با اعمال تیمارهای آزمایشی باشد. عدم تغییر یا تغییرات اندک فسفر در این جزء توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است (Jalali & Ranjbar, 1999; Houben et al., 2019). سهم نسبی فسفر در جزء Organic-P بسته به تیمارهای آزمایشی بین ۴/۸ تا ۱۷ درصد بود که پس از HCl-P، بیشترین سهم نسبی



شکل ۱- تغییرات کربن آلی خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف در شوری‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر
Figure 1- Changes of soil organic carbon as affected by different treatments under two salinities of 2 and 12 dS m⁻¹



شکل ۲- تغییرات میانگین درصد بازیافت فسفر اولسن در تیمارهای لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در شوریه‌های ۲ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر

Figure 2- Mean changes in phosphorus recovery as Olsen-P in municipal sewage sludge and triple superphosphate treatments under two salinities of 2 and 12 dS m⁻¹

فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل (به‌خصوص تیمار کاربرد توأم (T₂M₂)) در هر دو شوریه مورد مطالعه منجر به افزایش معنی‌دار سهم نسبی اشکال KCl-P و NaOH-P گردید. با توجه به این که این دو جزء به‌عنوان فسفر ناپایدار خاک در نظر گرفته می‌شوند لذا می‌توان به‌منظور کاهش اثرات منفی شوریه بر فراهمی فسفر خاک، کاربرد توأم این دو منبع آلی و معدنی را پیشنهاد داد. نتایج بررسی درصد بازیافت فسفر قابل دسترس خاک نیز تأییدکننده تأثیر بیشتر کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در افزایش فراهمی فسفر (به عبارت دیگر افزایش کارایی تیمارها) در مقایسه با کاربرد جداگانه این منابع بود. بیشترین سهم نسبی فسفر (۵۷ تا ۷۷ درصد از فسفر کل بسته به نوع تیمار) متعلق به HCl-P بود که نشان‌دهنده پیوند بخش عمده فسفر با کلسیم است. مقایسه تیمارهای هم‌ارز در شوریه‌های ۲ و ۱۲ دسی‌زیمنس نشان داد که افزایش شوریه نتوانست سهم نسبی این جزء را تغییر دهد اما در هر دو شوریه سهم نسبی فسفر این جزء می‌تواند با کاربرد جداگانه و یا توأم لجن فاضلاب شهری به‌صورت معنی‌داری کاهش یابد. کاهش فسفر متصل به کلسیم می‌تواند در افزایش فسفر قابل جذب گیاه به‌خصوص در شرایط شور حائز اهمیت باشد. از دیگر اثرات مثبت و قابل توجه افزودن لجن فاضلاب شهری، افزایش کربن آلی خاک و سهم نسبی جزء Organic-P بود که می‌تواند هم‌زمان با افزایش ذخایر فسفر خاک در بهبود ویژگی‌های خاک و رشد گیاه تأثیرگذار باشد. در این راستا بررسی تأثیر تیمارهای این پژوهش بر ویژگی‌های رشدی و جذب فسفر در یک گیاه شورپسند توصیه می‌شود.

با توجه به این که فسفر قابل دسترس (Olsen-P) به‌عنوان شاخصی از فسفر قابل جذب گیاه در نظر گرفته می‌شود لذا این شکل از فسفر نیز در تیمارهای مورد مطالعه اندازه‌گیری و درصد بازیافت آن محاسبه شد (شکل ۲). در شوریه ۲ دسی‌زیمنس بر متر با کاربرد تیمار T₂M₂ به‌طور میانگین ۶۵/۸ درصد از کل فسفر افزوده شده به خاک قابل عصاره‌گیری بود که این مقدار در مقایسه با تیمارهای T₀M₂ و T₂M₀ به‌ترتیب موجب افزایش ۱/۲ و ۱/۶ برابری درصد بازیافت فسفر شد. در شوریه ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر هم بیشترین درصد بازیافت به مقدار ۴۳/۱ درصد در تیمار T₂M₂ مشاهده شد که این مقدار نیز در مقایسه با تیمارهای T₀M₂ و T₂M₀ به‌ترتیب ۱/۳ و ۱/۵ برابر بزرگ‌تر بود؛ بنابراین، نتایج پیشنهاد می‌دهد که در هر دو شوریه مورد مطالعه، کاربرد توأم لجن فاضلاب شهری و سوپر فسفات تریپل در افزایش درصد بازیافت فسفر در مقایسه با کاربرد جداگانه هر یک از این منابع دارای تأثیر مثبتی است اما با افزایش شوریه درصد بازیافت فسفر در کلیه تیمارهای آزمایشی به‌صورت معنی‌داری کاهش می‌یابد که حاکی از تأثیر منفی شوریه بر فراهمی فسفر خاک است. افزایش فسفر قابل دسترس با کاربرد توأم منابع آلی و معدنی در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است (Halajnia et al., 2007; Garg & Bahl, 2008; Moeini et al., 2016; Jalali et al., 2021).

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که افزودن تیمارهای مختلف لجن

References

1. Achkir, A., Aouragh, A., El Mahi, M., Lotfi, E.M., Labjar, N., EL Bouch, M., Ouahidi, M.L., Badza, T., Farhane, H., & EL Moussaou, T. (2023). Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. *Emerging Contaminants*, 9, 100200. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.100200>
2. Akhtar, M., McCallister, D.L., & Eskridge, K.M. (2002). Availability and fractionation of phosphorus in sewage sludge-amended soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(13&14), 2057–2068. <https://doi.org/10.1081/CSS-120005748>
3. Alotaibi, K.D., Arcand, M., & Ziadi, N. (2021). Effect of biochar addition on legacy phosphorus availability in long-term cultivated arid soil. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 8, 47. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00249-0>
4. Alvarez-Rogel, J., Jimenez-Carceles, F.J., & Egea-Nicolas, C. (2007). Phosphorus retention in a coastal salt marsh in SE Spain. *Science of the Total Environment*, 378, 71–74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.016>
5. Ann, Y., Reddy, K.R., & Delfino, J.J. (2000). Influence of chemical amendments on phosphorus Immobilization in soils from a constructed wetland. *Ecological Engineering*, 14, 157-167. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(99\)00026-9](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(99)00026-9)
6. Audette, Y., O'Halloran, I.P., Evans, L.J., Martin, R.C., & Voroney, R.P. (2016). Kinetics of phosphorus forms applied as inorganic and organic amendments to a calcareous soil II: Effects of plant growth on plant available and uptake phosphorus. *Geoderma*, 279, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.06.002>
7. Bahremand, M.R., Afyuni, M., Hajabbassi, M.A., & Rezaeinejad, Y. (2003). Effect of sewage sludge on soil physical properties. *Journal of Water and Soil Science*, 6(4), 1-9. (In Persian)
8. Bai, J., Sun, X., Xu, C., Ma, X., Huang, Y., Fan, Z., & Cao, X. (2022). Effects of sewage sludge application on plant growth and soil characteristics at a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Horqin Sandy Land. *Forests*, 13, 984. <https://doi.org/10.3390/f13070984>
9. Biassoni, M.M., Vivas, H., Gutiérrez-Boem, F.H., & Salvaggiotti, F. (2023). Changes in soil phosphorus (P) fractions and P bioavailability after 10 years of continuous P fertilization. *Soil and Tillage Research*, 232, 105777. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105777>
10. Costa, M.G., Gama-Rodrigues, A.C., Moraes Gonçalves, J.L., Gama-Rodrigues, E.F., Silva Sales, M.V., & Aleixo, S. (2016). Labile and non-labile fractions of phosphorus and its transformations in soil under *Eucalyptus* plantations, Brazil. *Forests*, 7, 15. <https://doi.org/10.3390/f7010015>
11. Ding, Z., Kheir, A.M.S., Ali, M.G. M., Ali, O.A.M., Abdelaal, A.N., Lin, X., Zhou, Z., Wang, B., Liu, B., & He, Z. (2020). The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. *Scientific Reports*, 10, 2736. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59650-8>
12. Duan, S., & Kaushal, S.S. (2015). Salinization alters fluxes of bioreactive elements from stream ecosystems across land use. *Biogeosciences*, 12, 7331–7347. <https://doi.org/10.5194/bg-12-7331-2015>
13. Frišták, V., & Soja, G. (2015). Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 14(1), 104-115. <https://doi.org/10.1515/nbec-2015-0020>
14. Garg, S., & Bahl, G.S. (2008). Phosphorus availability to maize as influenced by organic manures and fertilizer P associated phosphatase activity in soils. *Bioresource Technology*, 99, 5773–5777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.10.063>
15. Halajnia, A., Haghnia, G.H., Fotovat, A., & Khorasani, R. (2007). Effect of organic matter on phosphorus availability in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Science*, 10(4), 121-132. (In Persian)
16. Halajnia, A., Haghnia, G.H., Fotovat, A., & Khorasani, R. (2009). Phosphorus fractions in calcareous soils amended with P fertilizer and cattle manure. *Geoderma*, 150, 209–213. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.010>
17. Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L., & Nelson, W.L. (1999). Soil fertility and fertilizer an introduction to nutrient management. 6th eds., Macmillan Pub. Co., New York, USA.
18. Hedley, M.J., Stewart, J.W.B., & Chauhan, B.C. (1982). Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induce by cultivation practices and by laboratory incubation. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 970–976. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600050017x>
19. Heidari, N., Reyhani Tabar, A., Najafi, N., & Oustan, Sh. (2013). Phosphorus fractions of selected calcareous soils of eastern Azerbaijan province and their relationships with some soil characteristics. *Journal of Soil and Water Research*, 44(3), 271-279. (In Persian)
20. Houben, D., Michel, E., Nobile, C., Lambers, H., Kandeler, E., & Faucon, M.P. (2019). Response of phosphorus dynamics to sewage sludge application in an agroecosystem in northern France. *Applied Soil Ecology*, 137, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.017>
21. Jalali, M., & Ranjbar, F. (1999). Aging effects on phosphorus transformation rate and fractionation in some calcareous soils. *Geoderma*, 155, 101–106. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.030>

22. Jalali, M., Jalali, M., & Antoniadis, V. (2021). Impact of sewage sludge, nanoparticles, and clay minerals addition on cucumber growth, phosphorus uptake, soil phosphorus status, and potential risk of phosphorus loss. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101702. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101702>
- 23- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., & Heikkinen, J. (2015). Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science & Technology*, 49, 2115–2122. <https://doi.org/10.1021/es503387y>.
24. Kashem, M.A., Akinremi, O.O., & Racz, G.J. (2004). Phosphorus fractions in soil amended with organic and inorganic phosphorus sources. *Canadian Journal of Soil Science*, 84, 83–90. <https://doi.org/10.4141/S03-018>
25. Kazemalilou, S., Najafi, N., Reyhanitabar, A. & Ghaffari M. (2018). Effects of integrated application of phosphorus fertilizer and sewage sludge on leaf chlorophyll index and some growth characteristics of sunflower under water deficit conditions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(4), 1-18. (In Persian)
26. Khorshid, M., Hosseinpour, A.S., & Oustan. Sh. (2009). Impacts of sewage sludge on phosphorus sorption characteristics and its availability in some calcareous soils. *Journal of Water and Soil Science*, 12(46), 791-801. (In Persian).
27. Laboski, C. A. M. & J. A. Lamb. (2003). Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. *Soil Science Society of America Journal*, 67,544-554. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.5440>
28. McLaughlin, M.J. (1984). Land application of sewage sludge: phosphorus considerations. *South African Journal of Plant and Soil*, 1(1), 21-29. <https://doi.org/10.1080/02571862.1984.10634104>
29. Meena, M.D., Narjary, B., Sheoran, P., Jat, H.S., Joshi, P.K., Chinchmalatpure, A.R., Yadav, G., Yadav, R.K., & Meena, M.K. (2018). Changes of phosphorus fractions in saline soil amended with municipal solid waste compost and mineral fertilizers in a mustard-pearl millet cropping system. *Catena*, 160, 32-40. <http://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.002>
30. Moeini, M., Hejazi Mehrizi, M., & Jafari, A. (2016). Assessment of phosphorus status in a saline soil after sewage sludge and chemical P fertilizer application using a chemical fractionation procedure. *Journal of Agricultural Engineering*, 38(2), 125-144. (In Persian)
31. Mousavi, R., Rasouli-Saddghiani, M., Sepehr, E., Barin, M., & Khezri, M. (2020). Effects of enriched biochars on the availability and fractions of phosphorus in the saline soils of lake Urmia basin. *Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3177-3193. (In Persian)
32. Murphy, J., & Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
33. Olsen, S.R., Cole, C.V., Watanabe, F.S. & Dean, L.A. (1954). In: Klute, A. (Ed), *Methods of Soil Analysis: Physical Properties*, Part 1, second ed. Agron Monogr, No 9. Madison WI: ASA and SSSA. pp. 403–430.
34. Reddy, D.D., Subba Rao, A., Sammi Reddy, K., & Takkar, P.N. (1999). Yield sustainability and phosphorus utilization in soybean–wheat system on vertisols in response to integrated use of manure and fertilizer phosphorus. *Field Crops Research*, 62,181-190. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00019-2)
35. Rehman, R.A., Qayyum, M.F., Haider, G., Schofield, K., Abid, M., Rizwan, M., & Ali, S. (2021). The sewage sludge biochar and its composts influence the phosphate sorption in an alkaline–calcareous soil. *Sustainability*, 13, 1779. <https://doi.org/10.3390/su13041779>.
36. Rose, T.J., Hardiputra, B., & Rengel, Z. (2010). Wheat, canola and grain legume access to soil phosphorus fractions differs in soils with contrasting phosphorus dynamics. *Plant Soil*, 326, 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9990-4>
37. Shahbazi, F., Hosseinpour, A.R., & Motaghian, H.R. (2019). Effect of P fertilizer and sewage sludge on availability and fractions of P and maize (*Zea mays* L.) indices in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 9(2), 45-63. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2019.15468.1832>
38. Tsadilas, C.D., Matsi, Barbayiannis, T.N., & Dimoyiannis, D. (1995). Influence of sewage sludge application on soil properties and on the distribution and availability of heavy metal fractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26(15&16), 2603-2619. <http://doi.org/10.1080/00103629509369471>
39. Turner, B.L., Cade-Menun, B.J., & Westermann, D.T. (2003). Organic phosphorus composition and potential bioavailability in semi-arid arable soils the Western United States. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1168–1179. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1168>.
40. Walker, T.W., & Adams, A.F.R. (1958). *Ignition method*. In: Klute, A. (Ed), *Methods of Soil Analysis: Physical Properties*, Part 1, second ed. Agron Monogr, No 9. Madison WI: ASA and SSSA. pp. 403–430.
41. Wierzbowska, J., Sienkiewicz, S., Zalewska, M., Żarczyński, P., & Krzobietke, S. (2020). Phosphorus fractions in foil fertilised with organic waste. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 315. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8190-9>.
42. Withers, P.J.A., van Dijk, K.C., Neset, T.-S.S., Nesme, T., Oenema, O., Rubæk, G.H., Schoumans, O.F., Smit, B., & Pellerin, S. (2015). Stewardship to Tackle global phosphorus inefficiency: The case of Europe. *Ambio*, 44, 193–206. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0614-8>
43. Xie, X., Pu, L., Zhu, M., Xu, Y., & Wang, X. (2019). Linkage between soil salinization indicators and physicochemical

- properties in a long-term intensive agricultural coastal reclamation area, Eastern China. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 3699–3707. <https://doi.org/10.3390/w14182804>
44. Xu, G., Sun, J., Shao, H., & Chang, SX. (2014). Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*, 62, 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.10.027>
45. Yu, Q., Zheng, Y., Wang, Y., Shen, L., Wang, H., Zheng, Y., He, N., & Li, Q. (2015). Highly selective adsorption of phosphate by pyromellitic acid intercalated ZnAl-LDHs: Assembling hydrogen bond acceptor sites. *Chemical Engineering Journal*, 260, 809–817. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.059>



Rainfall-Runoff Modeling of Khormazard and Bonab Hydrometric Stations Using Support Vector Machine and Random Forest Algorithms

Z. Bigdeli ¹, A. Majnooni-Heris ^{2*}, R. Delirhasannia ², S. Karimi ³

1, 2 and 3- Ph.D Candidate, Associate Professor and Postdoctoral Resercher, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: majnooni@tabrizu.ac.ir)

Received: 14-03-2023
Revised: 25-11-2023
Accepted: 01-12-2023
Available Online: 02-12-2023

How to cite this article:

Bigdeli, Z., Majnooni-Heris, A., Delirhasannia, R., & Karimi, S. (2024). Rain-runoff modeling of Khormazard and Bonab hydrometric stations using Support Vector Machine and Random Forest algorithms. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 971-989. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81608.1264>

Introduction

Water plays a crucial role in ensuring the sustainable development of any region. Given that our country consists primarily of arid and semi-arid regions, where the majority of rivers are also found, along with the critical state of groundwater extraction and the growing importance of surface water, It is crucial to have a deep understanding of the future condition of water resources within the country's watersheds (Fathollahi *et al.*, 2015). By utilizing intelligent models, it becomes feasible to represent the inherent relationships between data that cannot be solved by conventional mathematical methods. Support vector machine (SVM) and Random Forest algorithms are two types of machine learning methods that utilize essential algorithms for making repeated and accurate predictions (Kisi & Parmarm, 2016). The most recent study conducted by Zarei *et al.* (2022) evaluated the risk of flooding using data mining models of SVM and RF (case study: Frizi watershed). By analyzing the results, it was found that both the SVM algorithm and the new random forest algorithm showed higher accuracy in predicting flooding risks, both in terms of the educational data and algorithmic performance. The purpose of this study is to simulate the precipitation-runoff process in the hydrometric stations at the end of the Maragheh plain (Khormazard station on the Mahpari chai river and Bonab station on the Sufichai river) in East Azerbaijan province using support vector machine and random forest modeling algorithms. This study has been conducted over a period of 43 years, making it one of the few research cases in this area.

Materials and Methods

The Maragheh Sufi chai basin is situated in the eastern region of Lake Urmia, within the East Azarbaijan province. It covers an area of 611.89 square kilometers and is located between longitudes 45° and 40' to 46° and 25' and latitudes from 37° and 15' to 37° and 55' north. The average height of the basin is 1767 meters above sea level (Sharmod *et al.*, 2015). Based on the substantial changes observed in the runoff trend in the data since 1994 (without any noticeable change in the precipitation trend), the available data was divided into two distinct periods. The first period spans from 1976 to 1994, and the second period covers the years 1995 to 2019. To simulate rainfall-runoff, first the average rainfall of Maragheh plain was calculated by polygonal method. Subsequently, this data was combined with the discharge output from Bonab and Khormazard stations, with a one-day time lag. These inputs were then utilized in two models, SVM (kernel function) and RF. For this purpose, 70% of the data was used for the training stage and 30% of the data was used for the validation stage. Then, the rainfall and runoff training sets from one day before were chosen as the predictor variables, while the runoff training set was designated as the target variable. Several combinations of runoff and rainfall inputs were evaluated for the purpose of modeling. The inputs consist of the monthly Q and P values that were recorded



©2023 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81608.1264>

previously (P_t, Q_{t-1}), while the output represents the current runoff data (Q_t), with the subscript t indicating the time step. As a result, two input combinations were constructed from Q and P data (as seen in Table 3) and SVM and RF models were used for rainfall-runoff modeling to determine the optimal input combination.

Calculating average rainfall through the Thiessen Polygons method

Thiessen polygons, which are Voronoi cells, are used to define rainfall polygons that correspond to the surface area (A_i). These polygons are used to weight the rainfall measured by each rain gauge (r_i). Consequently, the area-weighted rainfall is equivalent to:

$$(t) = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(t) \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

Random Forest Algorithm

Random forest is a modern type of tree-based methods that includes a multitude of classification and regression trees. This algorithm is one of the most widely used machine learning algorithms due to its simplicity and usability for both classification and regression tasks.

Support Vector Machine (SVM) algorithm

Support vector machines works like other artificial intelligence methods based on data mining algorithm. The most important functions of the support vector machine model are classification and linearization or data regression.

Evaluation Criteria

To evaluate the models and compare their effectiveness, this research employs metrics such as the root mean square error (RMSE), correlation coefficient (r), explanation coefficient (R^2) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NS) are used. Below are the relationships among these criteria:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$r = \frac{n(\sum_{i=1}^n O_i \cdot P_i) - (\sum_{i=1}^n O_i)(\sum_{i=1}^n P_i)}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2)(n \sum_{i=1}^n P_i^2 - (\sum_{i=1}^n P_i)^2)}} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (5)$$

Results and Discussion

Figure 6 displays the time series data for rainfall and runoff during the two study periods, before and after 1994. The analysis of the figures showed that for Bonab station, during the two study periods, the value of Kendall's statistic for precipitation variable was 0.044 and 0.028, respectively. For Khormazard station, this statistic value for the first and second period was 0.030, and 0.028, respectively. However, these values are not significant at the 95% level. This indicates that the annual rainfall for the two studied stations during these years is not statistically significant. Therefore, it is concluded that the annual rainfall in these stations between the years 1976 to 2019 did not show any significant trend. The variations observed during this period were deemed normal, suggesting that the time series of rainfall displayed fluctuating patterns. However, it should be noted that there were instances of both increasing and decreasing trends in certain years. Examining the time series reveals varying trends. Initially, the outflow from Bonab station (both a and b) displayed fluctuating patterns, followed by periods of both decreasing and increasing trends. However, in recent years, there has been an increase in outflow from this station. The Mann-Kendall test statistic for the two study periods for this station is 0.325 and 0.512, respectively. These values are significantly different at the 95% level, indicating that the increasing trend of discharge for both time periods was statistically significant. The reason for this trend at the Bonab station, compared to other entrance stations to Lake Urmia, is the lower demand for water in the Sofichai basin for agricultural and industrial purposes, in contrast to other rivers. To explore the root cause of this issue, studies should be conducted to examine both underground and surface water sources, as well as the utilization of water in the agricultural and industrial sectors of this region. On the contrary, the trend observed at Khormazard station (c and d) is different. Unlike Bonab station, the discharge from Khormazard station exhibited a complete downward trend. The Mann-Kendall test statistic for the discharge variable during our two research periods were -0.269 and -0.412, respectively. At the 95% level, the decreasing trend of discharge in this station was found to be significant. On the other

hand, it is apparent that the volume of discharge in this hydrometric station has decreased drastically since 1976 (d). Apart from 2007, when there was a sudden increase in discharge volume, the water inflow into lake Urmia has remained at its lowest level throughout the years. To analyze the Bonab and Khormazard stations during two distinct periods, rainfall and runoff statistics (average, minimum, maximum) for the first period (1976-1994) and the second period (1995-2019) are presented in Tables 4 and 5. Based on the data presented in both tables, the Bonab station displays the highest average rainfall and runoff values in the total data column, while the Khormazard station has the lowest average rainfall and runoff values.

As mentioned, in order to model rainfall-runoff data using SVM and RF models, a portion of the data was used for training purposes, while another portion was used for validation. Tables 5 and 6 present the values of the calculated statistical indicators associated with the results obtained from the training and validation sections for both SVM and RF models. According to the results of Tables 6 and 7, it is clear that in both study periods, the SVM model outperformed the RF model at the Bonab station. The SVM model demonstrated superior accuracy in simulating both flow rate and monthly rainfall. Conversely, at the Khormazard station during these periods, the RF model displayed better performance compared to the SVM model. The modeling results in the test set for both stations revealed that the mutual correlation values for the first and second study periods at the Bonab station were 0.85 and 0.84, respectively. For the Khormazard station, these values were 0.79 and 0.75, respectively.

Conclusion

The results indicate that for both periods at the Bonab station, the SVM model exhibited higher efficiency compared to the RF model. Conversely, at the Khormazard station, the RF model outperformed the SVM model for both periods. Mutual correlation values for the test sets were 0.85 and 0.84 for the first and second study periods at the Bonab station, respectively, for the SVM model test set. For the Khormazard station, these values were 0.79 and 0.75, respectively, for the RF model test set. Other notable findings of this research include the analysis of the time series data for rainfall and runoff over 43 years. Graphs obtained for both stations, along with the Mann-Kendall statistic for precipitation and flow parameters, revealed no discernible trend in precipitation during the two study periods. Instead, precipitation in these areas displayed fluctuating patterns. However, the analysis of the time series and statistical values for the discharge of Sofichai and Mahpari chai rivers at the Bonab and Khormazard stations showed different results. In the Bonab station, the discharge exhibited fluctuations, with an increase observed in the second period. Conversely, at the Khormazard station, the discharge trend was downward in both study periods. The volume of Mahpari chai River outflow notably decreased in recent years, as evidenced by the Mann-Kendall statistic showing a decreasing trend.

Keywords: Maragheh Plain, Modeling, Rainfall-runoff, Random forest, Sufi Chai, Support Vector Machine

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۲، ص. ۹۸۹-۹۷۱

مدل‌سازی بارش- رواناب ایستگاه‌های هیدرومتری خرمازرد و بناب با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی

زینب بیگدلی^۱، ابوالفضل مجنونی هریس^{۲*}، رضا دلیر حسن نیا^۳، سپیده کریمی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۰

چکیده

شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت منابع آب و مسائل هیدرولوژی داشته باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) اقدام به مدل‌سازی بارش-رواناب دو ایستگاه بناب و خرمازرد به ترتیب واقع بر روی رودخانه‌های صوفی‌چای و ماهپری‌چای (دشت مراغه) شده است. در مطالعه حاضر داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری منطقه از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۷ از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی دریافت گردید. تغییر روند رواناب جاری در سال ۱۳۷۴، باعث گردید مدت مطالعه به دو دوره قبل و بعد آن تقسیم شود. مقدار بارش و رواناب با تاخیر زمانی یک ماه بعنوان ورودی به این مدل وارد و سپس مقادیر رواناب ماهانه مشاهداتی با رواناب ماهانه تخمین زده شده با استفاده از معیارهای ارزیابی خطا مورد بررسی گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو دوره برای ایستگاه بناب مدل SVM کارایی بالاتری نسبت به مدل RF داشت و در ایستگاه خرمازرد نیز برای این دو دوره، مدل RF عملکرد بهتری از مدل SVM ارائه کرد. نتایج مدل‌سازی در مجموعه تست در دو ایستگاه نشان داد که مقدار همبستگی متقابل برای دو دوره مطالعاتی اول و دوم ایستگاه بناب به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۰/۸۴ و برای ایستگاه خرمازرد برابر با ۰/۷۹ و ۰/۷۵ بدست آمد. با توجه به نتایج مقادیر آماره من کندال و سری‌های زمانی برای هر دو ایستگاه، روند مشخصی برای بارش در طول دوره مشاهده نشد، ولی دبی رودخانه صوفی‌چای در ایستگاه بناب، بخصوص بعد از سال ۱۳۷۴ روند صعودی و دبی رودخانه ماهپری‌چای روند کاملاً نزولی داشته است.

واژه‌های کلیدی: بارش- رواناب، جنگل تصادفی، دشت مراغه، صوفی‌چای، ماشین بردار پشتیبان، مدل‌سازی

مقدمه

مدیریت و کنترل تمامی عوامل در صورتی که تغییرات غیرطبیعی مانند دخالت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی در حوزه‌های آبخیز مختلف بیش از حدی رخ دهد، به دلیل پیچیدگی آنها بسیار دشوار خواهد بود. همچنین، پیش‌بینی دقیق رواناب به یک چالش اساسی برای دانشمندان و مهندسان در دوران معاصر تبدیل شده است. از آنجا که تحلیل بارش-رواناب به دلیل وجود روابط پیچیده و غیرخطی در تبدیل بارش به رواناب با مشکلات بسیاری روبه‌رو است. با توجه به اینکه

آب یکی از عوامل مهم در توسعه پایدار هر منطقه می‌باشد. به نظر می‌رسد با توجه به شرایط اقلیمی، کمیت و کیفیت آب قابل دسترس برای توسعه اقتصادی و زیست‌محیطی در اکثر نقاط ایران کافی نمی‌باشد (Sharifi et al., 2014). در حال حاضر، به دلیل کاهش میزان بارش در ایران و ادامه روند خشکسالی، نیاز به مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب از هر زمان دیگری اهمیت بیشتری پیدا کرده است. اما

۲، ۱ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و محقق پسا دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(Email: majnooni@tabrizu.ac.ir)
(*) نویسنده مسئول:

ایران منطقه‌ای خشک و نیمه خشک است و بیشتر رودخانه‌ها در مناطق خشک جریان دارند، وضعیت بحرانی برداشت آب‌های زیرزمینی و لزوم توجه بیشتر به آب‌های سطحی، اطلاعاتی درباره وضعیت آینده منابع آبی در حوزه‌های آبریز کشور اهمیت بسیاری دارد (Fathollahi et al., 2015). بنابراین، برآورد دقیق رواناب متناسب با بارش‌های بارانی، به عنوان یک گام حیاتی در فرآیند برنامه‌ریزی منابع آب بسیار حائز اهمیت است (Dastorani et al., 2018). به عبارت دیگر، سیلاب‌ها به طور معمول در مناطق خشک و در دره‌هایی رخ می‌دهند که داده‌های اندازه‌گیری شده موجود نیست. به عنوان مثال، در استان آذربایجان شرقی، برای حوضه‌های کوچکتر از ۴۰ کیلومتر مربع، اطلاعات ایستگاه‌های هیدرومتری در دسترس نیست. بنابراین، توسعه روش‌های تخمین رواناب برای این نواحی امری ضروری است (Patil et al., 2008) از آنجایی که اغلب داده‌های بارش در دوره‌های زمانی بلندتری نسبت به داده‌های رواناب موجود هستند، این ویژگی امکان پرکردن خلاءهای آماری در داده‌های رواناب را فراهم می‌کند (Rezazei et al., 2017). به همین دلیل، در دسترس بودن اطلاعات پیوسته بارش و سایر متغیرهای اقلیمی که می‌توانند برای مدلسازی مقدار رواناب مورد استفاده قرار گیرد، بسیار ضروری می‌باشد (Lorrai & Sechi, 1995). با این گفته‌ها، اشاره شده است که از دهه ۱۹۶۰ مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب توسعه یافته‌اند. مدل در واقع یک ابزار است که می‌تواند بخشی از واقعیت را شبیه‌سازی کند. هدف از مدل‌سازی، نمایش عملکرد و رفتار یک پدیده طبیعی تحت شرایط خاص است (Phomcha et al., 2011). به طور کلی، مدل‌های ریاضی بارش-رواناب را می‌توان به دو گروه مدل‌های دارای مبنای فیزیکی (مانند مدل‌های هیدرولوژیکی مفهومی) و مدل‌های داده‌محور (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و ...) تقسیم‌بندی کرد. یک رده جدید از مدل‌های رگرسیون بر مبنای رویکردهای یادگیری ماشین برای حل مشکلات مدل‌های سری زمانی کلاسیک ایجاد شده است. با استفاده از مدل‌های هوشمند، می‌توان روابط ذاتی میان داده‌ها را که ریاضیات کلاسیک قادر به حل آنها نیست، مدل‌سازی کرد. استفاده گسترده از یادگیری ماشین و رویکردهای مدرن در مطالعه منابع آب در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله مدل‌های هوشمند می‌توان به مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs)، برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و مدل‌های جدیدی همچون ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) اشاره کرد. الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی دو نوع روش یادگیری ماشینی هستند که از الگوریتم‌های ضروری برای پیش‌بینی‌های چندگانه مکرر استفاده می‌کنند (Kisi & Parmarm, 2016). تاکنون در مطالعات زیادی از مدل‌های هوشمند برای پیش‌بینی جریان بارش-رواناب، سیلاب و ... استفاده شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

باتیس و همکاران (Botsis et al., 2011) بارش-رواناب روزانه در کالیفرنیا را شبیه‌سازی کردند مدل ماشین بردار پشتیبان با سه نوع تابع کرنل با مدل شبکه عصبی مصنوعی مورد مقایسه قرار گرفت، در نتیجه این تحقیق ماشین بردار پشتیبان شبیه‌سازی دقیق‌تری از بارش-رواناب داشت. حسین و همکاران (Hussain et al., 2020) جهت پیش‌بینی جریان رودخانه هنزه در پاکستان از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه، (MLP) رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و جنگل تصادفی (RF) استفاده نموده اند. مجموعه‌ای از پنج پارامتر به اضافه سری زمانی جریان رودخانه با تاخیرهای مختلف بعنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد. مقایسه عملکرد مدل‌ها نشان داد که به ترتیب مدل‌های RF، MLP و SCR بالاترین عملکرد را در پیش‌بینی جریان رودخانه هنزه داشتند. همچنین نتایج نشان داد که مدل‌های مبتنی بر الگوریتم‌های یادگیری ماشینی به ویژه مدل RF می‌تواند با دقت بسیار بالایی در پیش‌بینی جریان رودخانه به کار گرفته شوند. نجیب‌زاده و همکاران (Najibzade et al., 2020) مطالعه‌ای در مورد بهره‌گیری از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی در مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: حوضه آبریز سد صفارود) انجام دادند. نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش‌های MLP و SVR Linear در مدلسازی بارش رواناب در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. شهاب و همکاران (Band et al., 2020) در حوضه آبخیز کلوان در همدان با مدل‌های الگوریتم یادگیری ماشین (ML)، درخت رگرسیون تقویت شده (BRT)، جنگل تصادفی (RF)، جنگل تصادفی موازی (PRF)، جنگل تصادفی منظم (RRF) و درختان تصادفی (ERT) به این نتیجه رسیدند که مدل ERT با مقدار AUC ۰/۸۲ مناسب ترین مدل است و مقدار AUC برای مدل‌های RF، PRF و BRT به ترتیب ۰/۸۰، ۰/۷۹، ۰/۷۸ و ۰/۷۵ است. شرفی و همکاران (Sharafi et al., 2021) بارش ماهانه با استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان را پیش‌بینی نمودند. نتایج نشان داد که عملکرد هر دو مدل خوب و تقریباً یکسان بوده (میانگین خطای مطلق به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۲۱) ولی با توجه به ارزیابی‌های انجام شده مدل رگرسیون بردار پشتیبان عملکرد نسبتاً بهتری داشته است (ضریب همبستگی ۰/۹۹۹). به طور کلی می‌توان گفت که مدل رگرسیون بردار پشتیبان برای مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش ماهانه استان اردبیل مناسب‌تر بوده است. سهرابی گشنیگانی و همکاران (Sohrabi Geshnigani et al., 2021) روی مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از مدل HBV و الگوریتم تصادفی در حوضه آبخیز بازفت مطالعه کردند. مقایسه نتایج مدل مفهومی HBV و مدل RF نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل RF بود. بنابراین، مدل RF به عنوان مدل برتر انتخاب گردید که این مدل می‌تواند برای کاربردهای آینده به عنوان یک گزینه جدید برای پیش‌بینی رواناب در حوضه بازفت مورد استفاده قرار گیرد. در جدیدترین

ما نیازمند بررسی دقیق همبستگی بین این دو متغیر هستیم. از آنجا که در فصول گرم، میزان بالای تبخیر باعث می‌شود که بارش به رواناب تبدیل نشود، لازم است تا روند سری زمانی در بازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. این بررسی ما را قادر می‌سازد تا متوجه شویم آیا همبستگی بارش و دبی در تمام فصول سال وجود دارد یا خیر! با در نظر گرفتن این اطلاعات، در جهت ایجاد مدل دقیق برای مدل‌سازی بارش- رواناب، انجام روندسازی نیز از اهمیت ویژه برخوردار است تا نتایج به دقت و قابل اطمینانی منجر شوند.

در واقع سؤال اساسی تحقیق این است که آیا برای شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب، مدل ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی، در شرایط کمبود داده و اطلاعات در برخی ایستگاه‌های دشت مراغه، می‌تواند جوابگوی پیش‌بینی بارش و رواناب در دو ایستگاه مورد مطالعه (بناب و خرمازرد) و در این دوره مطالعاتی باشد؟ سؤال بعدی که مطرح است این است که کدام یک از مدل‌ها در دو ایستگاه پایانی دشت مراغه عملکرد بهتری در شبیه‌سازی بارش-رواناب دارند؟

مواد و روش‌ها

حوضه صوفی چای مراغه در استان آذربایجان شرقی و تقریباً در قسمت شرق دریاچه ارومیه واقع شده است. این حوضه با مساحت ۶۱۱/۸۹ کیلومتر مربع که ۲۵ درصد آن را دشت و ۷۵ درصد آن را ارتفاعات تشکیل داده است و در حد فاصل طول‌های جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه و عرض‌های جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه شمالی قرار گرفته و ارتفاع متوسط آن از سطح دریا ۱۷۶۷ متر از سطح دریا می‌باشد (Sharmod et al., 2015).

حوضه صوفی‌چای از دامنه جنوبی کوهستان سهند سرچشمه گرفته و از شمال به حوضه آبریز لیقوان و کندچای، از شرق به حوضه آبریز مردق‌چای، از غرب به حوضه آبریز قلعه‌چای و از جنوب بعد از عبور از محدوده سد علویان به دریاچه ارومیه منتهی می‌شود. رودخانه صوفی چای با طول ۲۰ کیلومتر در داخل حوضه آبریز صوفی‌چای قرار دارد. از ابتدای حوضه صوفی‌چای، رودخانه‌های اسفستاج‌چای، اسپران، چکان‌چای و ماهپری‌چای به صوفی‌چای پیوستند. ۱۰ ایستگاه مختلف در دشت مراغه وجود دارد که از ایستگاه‌های مهم حوضه صوفی‌چای می‌توان به ایستگاه بناب (بر روی رودخانه صوفی‌چای) و ایستگاه خرمازرد (بر روی رودخانه ماهپری‌چای) اشاره کرد. این دو ایستگاه آخرین ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه صوفی‌چای و ماهپری‌چای و منتهی به دریاچه ارومیه می‌باشند. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز صوفی چای و ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد.

در جدول ۱ نیز خلاصه‌ای از مشخصات آماری دشت مراغه ارائه شده است. نکته قابل ذکر رودخانه‌های حوضه صوفی‌چای این است که

مطالعه انجام گرفته توسط بیگدلی و همکاران (Bigdeli et al., 2023)، مدل‌سازی بارش-رواناب حوضه آجی‌چای با استفاده از مدل های جنگل تصادفی و شبکه عصبی مصنوعی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که برای حوضه آجی‌چای مدل ANN کارایی بالاتری نسبت به RF دارد. در جدیدترین مطالعه بیگدلی و همکاران (Bigdeli et al., 2023)، کاربرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان و درخت تقویت شده برای مدل‌سازی بارش-رواناب (مطالعه موردی: دشت تبریز) را بررسی نمودند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در دوره‌های مطالعاتی انجام شده، برای ایستگاه آخولا مدل SVM عملکرد بهتری نسبت به مدل BT داشت و در ایستگاه پل سنیخ، مدل BT عملکرد بهتری نسبت به مدل SVM ارائه کرد.

پورصالحی و همکاران (Poursalehi et al., 2022) عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در پیش‌بینی نوسانات سطح ایستابی در مقایسه با دو مدل درخت تصمیم و شبکه عصبی مصنوعی (مطالعه موردی: آبخوان آزاد دشت بیرجند) را مطالعه کردند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی نشان می‌دهد این الگوریتم توانایی نسبتاً زیادی در شبیه‌سازی تراز سطح ایستابی آبخوان دارد.

زارعی و همکاران (Zarei et al., 2020) پتانسیل وقوع سیل با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی ماشین بردار پشتیبان، چاید و جنگل تصادفی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز فریزی) را ارزیابی نمودند. بر اساس نتایج، هم در داده‌های تعلیمی و هم در داده‌های آموزشی در الگوریتم (SVM) و مدل الگوریتم نوین جنگل تصادفی دارای نتایج دقیق‌تری می‌باشد. این نتیجه بیانگر این مطلب است که هر دو مدل از نظر صحت و اعتبار مدل‌سازی مورد تأیید قرار گرفته‌اند. اشاره می‌گردد که، داده‌های تعلیمی معمولاً برای آموزش مدل‌ها و الگوریتم‌های یادگیری ماشینی استفاده می‌شوند و داده‌های آموزشی و آزمونی کمک می‌کنند تا مدل‌ها بهترین عملکرد را در پیش‌بینی و تحلیل داده‌های جدید از خود نشان دهند.

هدف از این مطالعه، شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در ایستگاه های هیدرومتری انتهای دشت مراغه (ایستگاه خرمازرد روی رودخانه ماهپری‌چای و ایستگاه بناب روی رودخانه صوفی‌چای) در استان آذربایجان شرقی با استفاده از نرم‌افزار STATISTICA و ایجاد مدل بارش- رواناب با روش‌های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی می‌باشد.

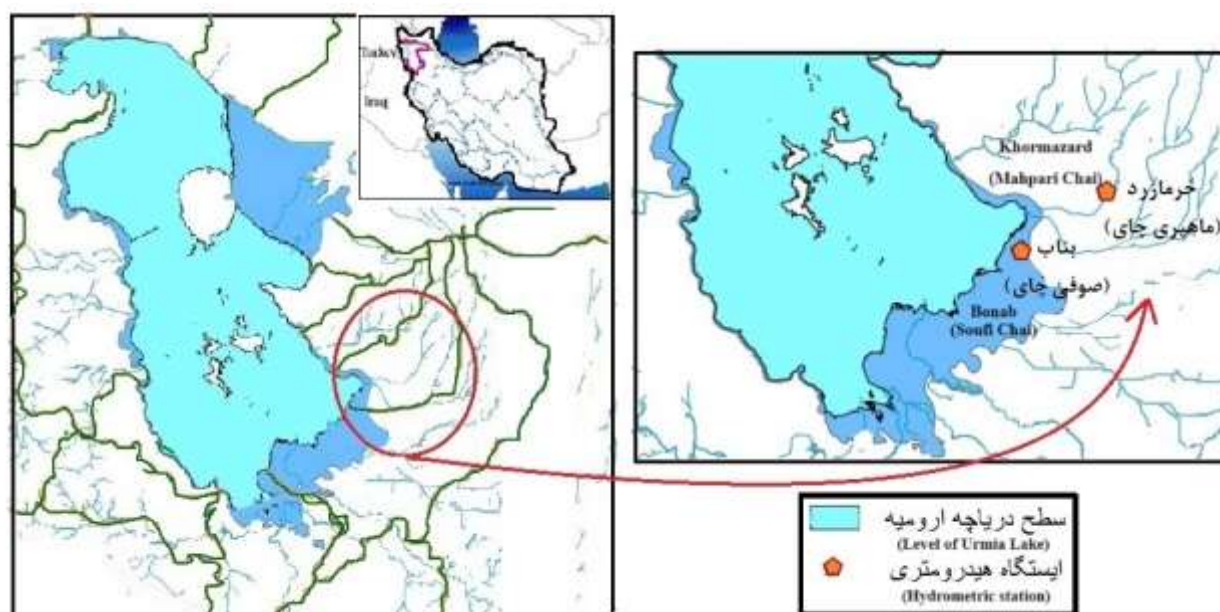
اگر چه در تعدادی از مطالعات اشاره شده، از مدل‌های این تحقیق استفاده شده است، اما با توجه به مطالعات انجام شده، تاکنون از روش های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای مدل‌سازی بارش- رواناب دشت مراغه و دو ایستگاه بناب و خرمازرد، استفاده نشده است. این مطالعه در بازه زمانی ۴۳ ساله انجام شده است که در این موضوع مطالعاتی می‌تواند جزء موارد محدود تحقیقاتی در این منطقه باشد. از طرفی دیگر، به دلیل تغییرات فصلی و احتمال بارش در فصل‌های گرم،

سال ۱۳۷۴ (بدون تغییر محسوس در روند بارش)، داده های ۴۳ ساله به دو دوره (۱۳۵۵-۱۳۷۴) و (۱۳۷۵-۱۳۹۷) تقسیم شدند. برای شبیه سازی بارش - رواناب، ابتدا بارش متوسط دشت مراغه با روش پلیگون بندی محاسبه و سپس به همراه دبی خروجی از ایستگاه بناب و خرمازرد به همراه لگ زمانی یک ماهه وارد دو مدل SVM (تابع کرنل) و RF شدند. برای این منظور از ۷۰ درصد داده ها برای مرحله آموزش و ۳۰ درصد داده ها برای مرحله صحت سنجی استفاده گردید. سپس مجموعه آموزشی بارش و رواناب یک ماهه ما قبل به عنوان متغیر پیش بینی کننده و مجموعه آموزشی رواناب به عنوان متغیر هدف انتخاب شدند.

تمام این رودخانه های فصلی یا دائمی به شاخه اصلی رودخانه صوفی چای می ریزند و در نهایت دبی رودخانه صوفی چای و ماهپری در دو ایستگاه بناب (طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۰ دقیقه) و خرمازرد (طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۴ دقیقه) ثبت می شوند.

داده های مورد استفاده برای مدل سازی در این پژوهش، شامل داده های باران (ماهانه) و دبی خروجی از دو ایستگاه مورد مطالعه (ماهانه) می باشد که از ۶ ایستگاه باران سنجی و سینوپتیک (از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۷) از شرکت آب منطقه ای و سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی تهیه گردید. مشخصات ایستگاه های اشاره شده در **جدول ۲** آورده شده است.

براساس تغییرات قابل توجه روند رواناب مشاهده شده در داده ها از



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های بناب و خرمازرد

Figure 1- Geographical location of Bonab and Khormazard stations

جدول ۱- مشخصات دشت مراغه

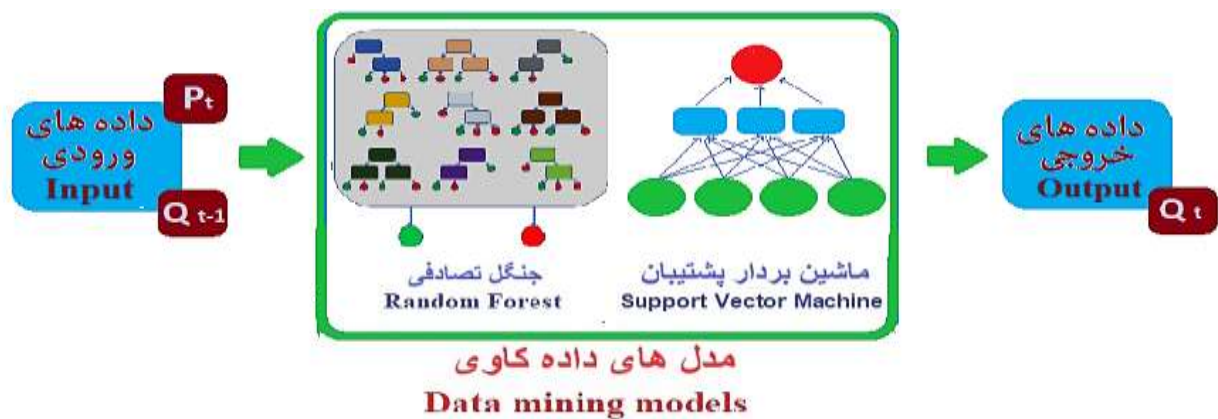
Table 1- The properties of Maragheh Plain

زیر حوضه Sub - Basin	رودخانه های زیر حوضه Sub-Basin Rivers	ایستگاه Station	مساحت رودخانه های زیر حوضه Area of rivers sub-basin (km ²)	ارتفاع ایستگاه Height of station (m)	متوسط بارش Average precipitation (mm)	متوسط دما Average temperature (°C)
مراغه - بناب Maragheh- Bonab	صوفی چای Soufi Chai	بناب Bonab	661	1440	345.7	13.11
	ماهپری چای Mahpari Chai	خرمازرد Khormazard	74	1600	350.7	8.70

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های دشت مراغه

Table 2- The properties of Stations of Maragheh Plain

زیر حوضه Sub - Basin	مساحت Area (km ²)	ایستگاه‌های منتخب Selected Stations	رودخانه‌های حوضه Basin Rivers	ارتفاع ایستگاه Stations Height	متوسط بارش Average precipitation (mm)	متوسط دما Average temperature (°C)
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	تازه کند Tazekand	صوفی چای Soufi Chai	1600	310.5	9.7
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	اسفناج Esfastanch	اسفناج چای Esfastanch Chai	1557	311.0	10.3
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	مراغه Maragheh	مراغه چای Soufi Chai	1478	312.7	12.8
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	چکان Chekan	چکان چای Chekan Chai	1289	285.6	12.2
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	بناب Bonab	صوفی چای Soufi Chai	1440	345.7	13.1
مراغه-بناب Maragheh- Bonab	1163	خرمازرد Khormazard	ماهپری چای Mahpari Chai	1600	350.7	8.7



شکل ۲- شماتیک ورودی و خروجی مدل SVM و RF

Figure 2 Schematic of SVM and BT model inputs and outputs

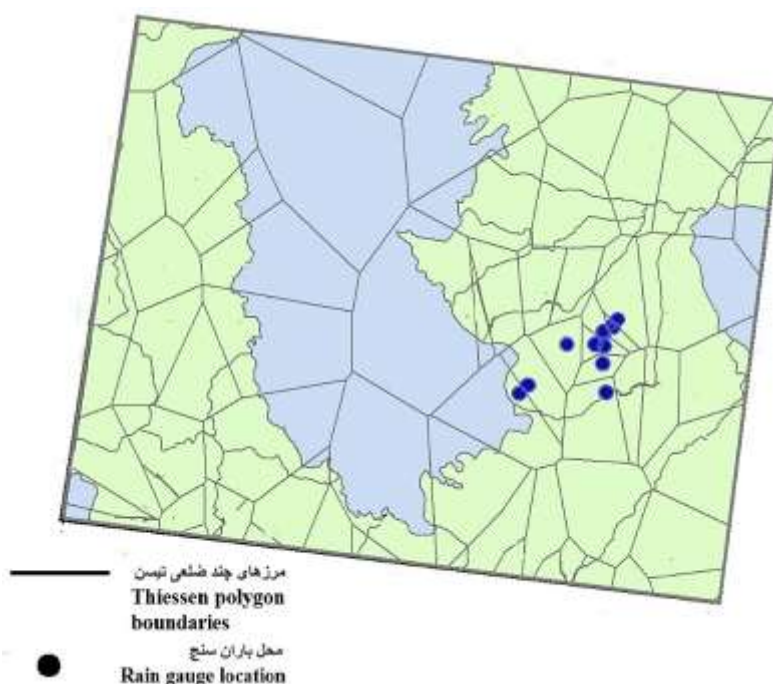
جدول ۳- ترکیب ورودی از داده‌های Q و P

Table 3- Input combination of Q and P data

خروجی Output	ورودی Input	مدل Model	ردیف No.
Q _t	P _t , Q _{t-1}	جنگل تصادفی Random Forest	1
Q _t	P _t , Q _{t-1}	ماشین بردار پشتیبان Support Vector Machin	2

دو ترکیب ورودی از داده‌های Q و P ساخته شد (همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود) و مدل RF و SVM برای مدل‌سازی بارش-رواناب برای ترکیب ورودی استفاده شد (شکل ۲).

ترکیب مشخص ورودی رواناب و بارندگی برای مدل‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. ورودی‌ها مقادیر Q و P ماهانه قبلاً ثبت شده (P_t، Q_{t-1}) را ارائه می‌دهند و خروجی مربوط به داده‌های رواناب فعلی (Q_t) است، که در آن، زیرنویس t نشان‌دهنده مرحله زمانی است. در نتیجه،



شکل ۳- تقسیم بندی چند ضلعی تیسن دشت مراغه
Figure 3- Thiessen polygon partitioning of the Eastern Lake Urmia Basin

یادگیری ماشین محسوب می شود. همان طور که از نام آن مشهود است، این الگوریتم جنگلی را به طور تصادفی می سازد (شکل ۴). جنگل ساخته شده در واقع گروهی از درخت های تصمیم است. کار ساخت جنگل با استفاده از درخت ها اغلب اوقات به روش کیسه گذاری انجام می شود. ایده اصلی روش کیسه گذاری آن است که ترکیبی از مدل های یادگیری، نتایج کلی مدل را افزایش می دهد. به بیان ساده، جنگل تصادفی چندین درخت تصمیم می سازد و آنها را با یکدیگر ادغام می کند تا پیش بینی های صحیح تر و پایداری به دست آیند (Youssef et al., 2015). این الگوریتم را نخستین بار بریمان (Breiman, 2001) ایجاد کردند و توسعه دادند. مدل پیش بینی کننده RF بر اساس میانگین گیری از نتایج حاصل از تمامی درخت های تصمیم مربوط استوار است و برای بسیاری از مجموعه داده ها، طبقه بندی با صحت بالایی را انجام می دهد (Catani et al., 2013). درختان تصادفی با در نظر گرفتن بردار ورودی، آن را با هر درخت در جنگل، طبقه بندی کرده و خروجی، کلاس هایی هستند که از اکثریت آرا دریافت شده است. در این مدل از دو عامل میانگین کاهشی دقت و میانگین کاهشی جینی برای تعیین اولویت تأثیر هر یک از عوامل مؤثر استفاده می شود (Nicodemus et al., 2011). الگوریتم جنگل تصادفی (RF) مبتنی بر دسته ای از درخت های تصمیم است و در حال حاضر یکی از بهترین الگوریتم های یادگیری است. هر درخت به صورت زیر تشکیل می شود:

اگر N تعداد حالت ها در مجموعه داده های train (مجموعه کار)

محاسبه متوسط بارندگی از طریق روش Thiessen Polygons (چند ضلعی تیسن)

چند ضلعی های تیسن، که سلول های Voronoi هستند (Aurenhammer et al., 2013) جهت تعریف چند ضلعی بارش معادل مساحت سطح A_i برای وزن کردن بارندگی هر باران سنج r_i استفاده می شود. سپس، بارندگی با وزن مساحت معادل برابر است با:

$$r_{th}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n r_i(t) \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، چند ضلعی های تیسن مربوطه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی کوانتومی تولید شدند (Shekar & Xiong, 2018)، و بارندگی معادل با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد.

الگوریتم جنگل تصادفی (Random-Forest)

جنگل تصادفی، نوعی الگوریتم یادگیری ماشین و نظارت شده با قابلیت استفاده آسان است که اغلب اوقات نتایج بسیار خوبی را حتی بدون تنظیم پارامترهای آن، فراهم می کند (Catani et al., 2013). جنگل های تصادفی یک نوع مدرن از روش های درخت-پایه هستند که شامل انبوهی از درخت های کلاس بندی و رگرسیونی می باشند (Breiman 2001). این الگوریتم به دلیل سادگی و قابلیت استفاده، هم برای دسته بندی و هم رگرسیون، از پرکاربردترین الگوریتم های

ماشین‌های بردار پشتیبان، طبقه‌بندی و خطی‌سازی یا رگرسیون داده‌ها است. روشی است که هم برای گروه‌بندی و هم برای تخمین و برآورد تابع برازش داده‌ها در مسائل رگرسیون به کار می‌رود به‌طوری‌که کمترین خطا در گروه‌بندی داده‌ها یا تابع برازش رخ دهد. SVM الگوریتمی است که نوع خاصی از مدل‌های خطی را می‌یابد که حداکثر حاشیه ابر صفحه را حاصل می‌کنند. به نزدیک‌ترین نقاط آموزشی به حداکثر حاشیه ابر صفحه، بردارهای پشتیبان گفته می‌شود و تنها از این بردارها (نقاط) برای مشخص کردن مرز بین طبقات استفاده می‌شود. **شکل ۵** فرآیند مدل SVM را نشان می‌دهد. هدف پیدا کردن فرم تابعی برای $f(x)$ است.

$$f(x) = W^T \cdot \phi(x) + b \quad (2)$$

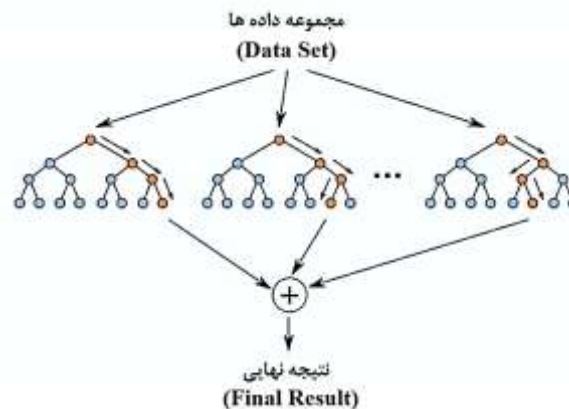
$$y(t) = \sum_{k=1}^k w_k \cdot h_{a,b}(t) \quad (3)$$

بردار ضریب W و ثابت b و تابع کرنل ϕ در این رابطه با حل مساله بهینه‌سازی محدب و با استفاده از روش لاگرانژین و اصل کمینه‌سازی خطای ساختاری بدست می‌آیند. می‌توان از توابع مختلف کرنل برای ساخت انواع مختلف SVM استفاده کرد. انواع کرنل عبارتند از: کرنل چند جمله‌ای با سه مشخصه هدف، کرنل توابع پایه (RBF) با یک مشخصه هدف و کرنل خطی. در مطالعات بارش - رواناب عمدتاً از تابع RBF استفاده می‌شود زیرا ماشین بردار پشتیبان با این نوع تابع در مقایسه با سایر توابع از دقت بیشتری در شبیه‌سازی این پدیده برخوردار است (Eskandari et al., 2011)، که رابطه آن به صورت (۳) می‌باشد.

باشد، N حالت به‌صورت تصادفی با جای‌گذاری از داده‌های اصلی، نمونه‌گیری می‌شود. این نمونه مجموعه کار برای این درخت می‌باشد. اگر M متغیر وجود داشته باشد و m کوچکتر از M در نظر گرفته شود، به طوری‌که در هر گره، m متغیر به‌صورت تصادفی از M انتخاب می‌شوند و بهترین جداسازی روی این m متغیر برای جداسازی گره استفاده می‌شود. مقدار m در طول ساخت جنگل ثابت در نظر گرفته می‌شود. هر درخت به اندازه ممکن بزرگ می‌شود. هیچ هرسی وجود ندارد. نرخ خطای جنگل به دو مورد زیر بستگی دارد: الف - همبستگی بین هر دو درخت در جنگل: افزایش همبستگی نرخ خطای جنگل را افزایش می‌دهد. ب - قدرت هر یک از درختان در جنگل: هر درخت با نرخ خطای کم، یک طبقه‌بند قوی است. افزایش قدرت هر یک از درختان نرخ خطای جنگل را کاهش می‌دهد. از جمله مزیت‌های جنگل تصادفی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: ۱. در میان الگوریتم‌های فعلی از نظر دقت کم نظیر است. ۲. روی داده‌های بسیار بزرگ قابل اجراست. ۳. می‌تواند هزاران متغیر را بدون حذف متغیرها مدیریت کند. ۴. برآوردی از مهم‌ترین متغیرها در طبقه‌بندی می‌دهد. ۵. راهکارهایی برای برآورد داده‌های گم شده دارد (Geshnigani et al., 2021).

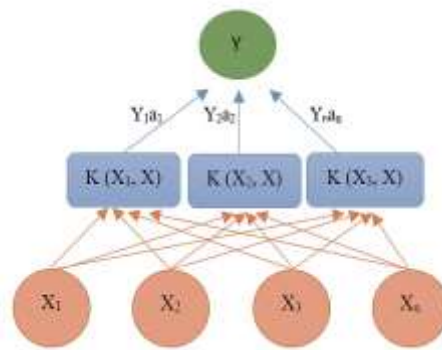
الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین‌های بردار پشتیبان همانند دیگر روش‌های هوش مصنوعی بر مبنای الگوریتم داده کاوی عمل می‌کنند. مهم‌ترین وظایف مدل



شکل ۴- ساختار الگوریتم جنگل تصادفی

Figure 4- Structure of RF Algorithm



شکل ۵- فرایند مدل SVM (سیدیان و همکاران، ۱۳۹۳)
Figure 5- SVM model process (Seyedian et al., 2014)

از آنجایی که توزیع تعدادی از سری های اقلیمی از جمله بارش و دبی نرمال نیست، در چنین حالت هایی روش من- کندال مناسب تر است (Pasquini, 2006). تحلیل روند در این مطالعه با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال انجام شد. آزمون من- کندال ابتدا توسط Mann (1945) مطرح و سپس توسط Kendall (1975) بسط و توسعه یافت (Serrano et al., 1999). این روش بطور متداول و گستردهای در تحلیل روند سری های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار گرفته می شود (Lettenmaier, 1994). از نقاط قوت این روش می توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری های زمانی ای که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی کنند، اشاره کرد. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری های زمانی مشاهده می گردند نیز از دیگر مزیت های استفاده از این روش است (Turgay & Ercan, 2005). فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و وجود نداشتن روند در سری داده ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده ها می باشد. آزمون من - کندال با تعریف آماره S به شکل زیر تعریف می شود:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(X_i - X_j) \quad (8)$$

که در آن X_i و X_j مقادیر مرتب شده ی نمونه و n تعداد نمونه است. مقدار $\text{Sign}(x_j - x_i) < 0$ برای $(x_j - x_i) < 0$ برابر با منفی یک، $(x_j - x_i) = 0$ برابر با صفر و برای $(x_j - x_i) \geq 0$ برابر با یک است. مقدار نمره استاندارد شده Z و واریانس آماره S نیز از رابطه ی زیر محاسبه می شود:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , S > 0 \\ 0 & , S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

مقادیر مثبت Z نشان دهنده ی روندهای افزایشی و مقادیر منفی Z نشان دهنده ی روندهای کاهشی است. در شرایطی که $S=0$ باشد داده ها فاقد روند بوده و هیچ روند معنی دار یا غیر معنی داری در داده ها وجود ندارد که این شرایط ایده آل برای داده های هیدرولوژیکی

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی مدل ها و مقایسه کارایی آن ها، در این پژوهش از معیارهای، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NS) استفاده می شود. در ادامه روابط این معیارها ارائه شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$r = \frac{n(\sum_{i=1}^n O_i \cdot P_i) - (\sum_{i=1}^n O_i) \cdot (\sum_{i=1}^n P_i)}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n O_i^2 - (\sum_{i=1}^n O_i)^2) \cdot (n \sum_{i=1}^n P_i^2 - (\sum_{i=1}^n P_i)^2)}} \quad (5)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i) \cdot (P_i - \bar{P}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (6)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (7)$$

در روابط فوق، n تعداد داده ها، P_i داده های مشاهداتی $\bar{Q}$ میانگین داده های مشاهداتی و Q_i داده های محاسباتی می باشد. هر چقدر مقدار r به عدد یک نزدیک تر باشد، برآورد و برازش بهتر را نشان می دهد. ضریب کارایی نش- ساتکلیف می تواند از منفی بی نهایت تا ۱ تغییر کند، هر چه مقادیر به عدد یک نزدیک تر باشد، مدل برازش بهتری دارد و عدد یک برازش عالی را نشان می دهد. جذر میانگین مربع خطاهای داده های محاسباتی و مشاهداتی را بیان می کند. واضح است که هر چه مقدار این عدد کمتر باشد، عملکرد مدل در شبیه سازی داده ها بهتر است. امروزه یکی از ابزارهای تعیین تغییرهای اقلیمی تحلیل روند می باشد. روش های متفاوتی برای تعیین روند وجود دارند که به دو دسته تقسیم می شوند: روش پارامتریک و ناپارامتریک. در اصل گفته می شود که آزمون های پارامتریک در صورتی که داده ها به صورت نرمال باشند، قوی تر از آزمون های ناپارامتریک هستند ولی در شرایط داده های غیرنرمال، آزمون ناپارامتریک قوی تر از پارامتریک است (Sabouhi & Soltani, 2008).

به ندرت ممکن است اتفاق بیفتد. در این مطالعه سطح‌های معنی‌داری $P=0.05$ بکار گرفته شده است.

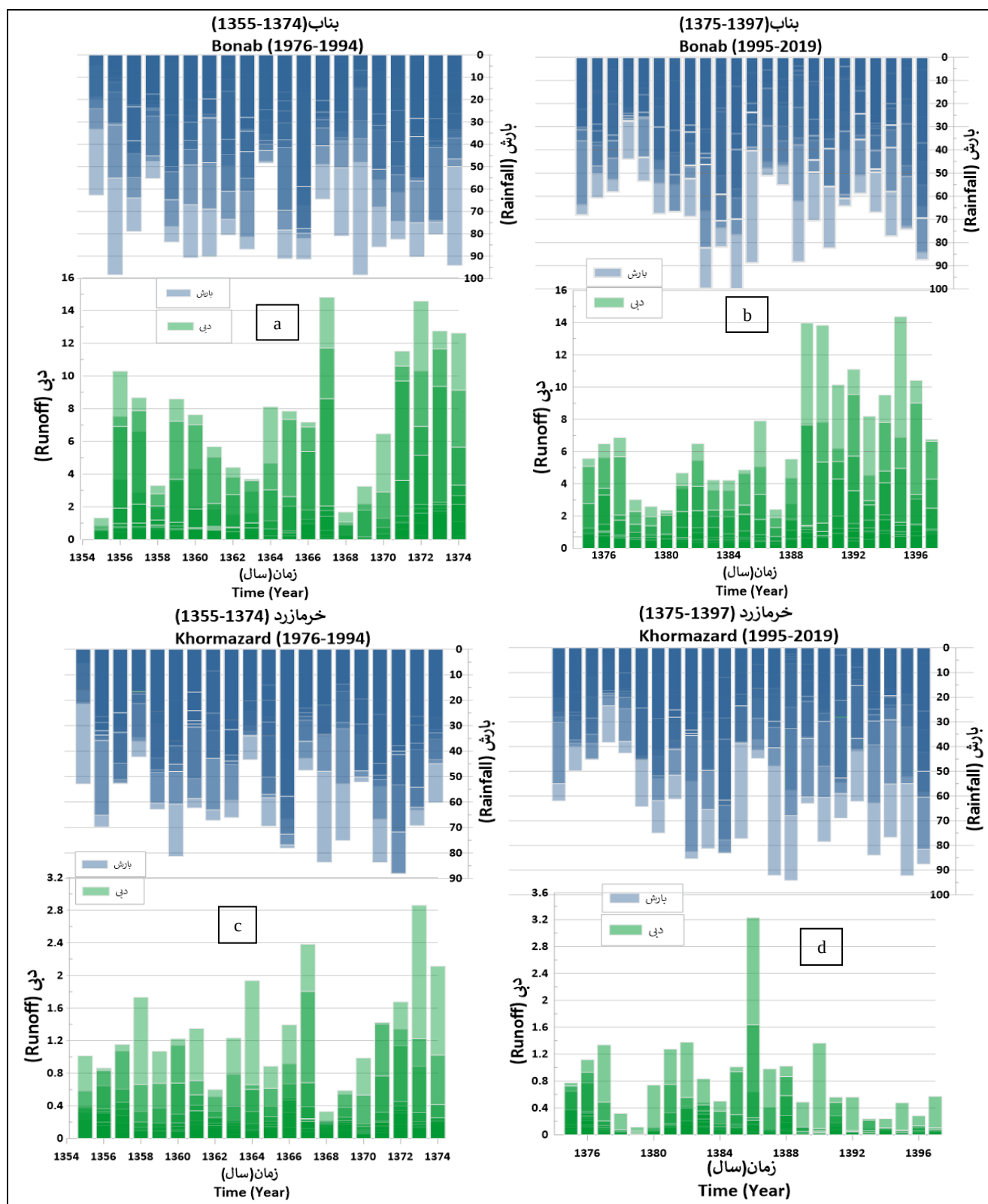
نتایج و بحث

سری زمانی مربوط به بارش و رواناب در دو دوره مطالعاتی قبل و بعد ۱۳۷۴ در شکل ۶ نشان داده شده است. بررسی اشکال فوق نشان داد که در ایستگاه بناب و برای دو دوره مطالعاتی، مقدار آماری من کندال برای متغیر بارش به ترتیب برابر با ۰/۰۴۴ و ۰/۰۲۸ و برای ایستگاه خرمازرد این مقدار آماری برای دوره اول و دوم به ترتیب برابر با ۰/۰۳۰ و ۰/۰۲۸ بدست آمد که در سطح ۹۵ درصد معنادار نمی‌باشد که مؤید این است که بارش سالانه در این سال‌ها برای دو ایستگاه مورد مطالعاتی از نظر آماری معنادار نیست. بنابراین این گونه استنباط می‌شود که بارش سالانه در این ایستگاه‌ها در سال‌های ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۷ دارای روند نبوده و تغییرهای رخ داده در این دوره زمانی طبیعی می‌باشد و سری زمانی بارش نوسانی می‌باشد و در برخی سال‌ها روند افزایشی و در برخی دیگر روند کاهشی داشته است. صالحی و همکاران (Salehi Babil et al., 2017) گزارش کردند که نوسانات بارش در زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه وجود دارد و در بارندگی‌های ماهانه کمتر از ۵ میلی‌متر در سطح احتمال ۱ درصد افزایش معنی‌داری داشته و در برخی محدوده‌ها روند معنی‌داری نشان نداده است، در حالی که محدوده ۱۰ تا ۱۵ میلی‌متر روند کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهد. اما شکل ۶ سری زمانی دبی‌های خروجی از هر دو ایستگاه را نیز نشان می‌دهد. بررسی سری‌های زمانی نتایج متفاوتی را نشان می‌دهد، همانطور که مشاهده می‌شود در دوره مطالعاتی دبی خروجی از ایستگاه بناب (a و b) روند نوسانی داشته و بصورت کاهشی-افزایشی است و نهایتاً در سال‌های آخر جریان خروجی از این ایستگاه افزایش یافته است. مقدار آماره آزمون من کندال برای دو دوره مطالعاتی برای این ایستگاه به ترتیب برابر با ۰/۳۲۵ و ۰/۵۱۲ بوده و در سطح ۹۵ درصد معنادار می‌باشد و نشان می‌دهد در دو دوره زمانی مورد مطالعه، روند افزایشی دبی معنادار بوده است که می‌تواند به این دلیل باشد که در ایستگاه بناب نسبت به سایر ایستگاه‌های ورودی به دریاچه ارومیه، میزان تأمین نیاز آب اراضی کشاورزی و صنایع در حوضه صوفی‌چای نسبت به سایر رودخانه‌ها کمتر بوده است که برای بررسی دقیق علت این موضوع، باید مطالعاتی جهت بررسی آب‌های زیرزمینی و سطحی و همچنین مصرف آب در بخش‌های کشاورزی و صنعت این منطقه انجام داد. از طرفی با توجه به این تغییرات بارش و دبی، می‌توان با توجه به نتایج تحقیق منتصری و همکاران (Montaseri et al., 2018) که روی این منطقه انجام داده‌اند، می‌توان دوره اول را ترسالی و دوره دوم را خشکسالی دانست. در تحقیق ایشان، وضعیت منطقه مطالعه شده در هفت گروه شامل قبل از سال ۱۳۶۰ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف،

۱۳۶۷-۱۳۶۱ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۶۸-۱۳۷۱ نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۷۲-۱۳۷۷ وضعیت نرمال و ترسالی ضعیف، ۱۳۷۸-۱۳۸۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف، ۱۳۸۴-۱۳۸۶ نرمال با گرایش به ترسالی ضعیف و ۱۳۸۷-۱۳۹۲ شرایط نرمال با گرایش به خشکسالی ضعیف طبقه‌بندی شد.

از طرف دیگر، در ایستگاه خرمازرد (c و d) رودخانه ماهپری‌چای روند متفاوتی را ثبت کرده است، بدین‌صورت که در این ایستگاه، دبی خروجی از آن برخلاف ایستگاه بناب کاملاً روند نزولی داشته است و مقدار آماره آزمون من کندال برای متغیر دبی در دو دوره تحقیقاتی ما به ترتیب میزان ۰/۲۶۹- و ۰/۴۱۲- بوده‌اند و در سطح ۹۵ درصد روند کاهشی دبی در این ایستگاه معنادار بوده است. از طرفی همانطور که مشاهده می‌شود حجم دبی در این ایستگاه هیدرومتری بعد از سال ۱۳۷۴ (d) به شدت کاهش یافته است و بغیر از سال ۱۳۸۶ که میزان دبی به طور ناگهانی افزایش داشته است، در تمامی سال‌ها، میزان حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه در کمترین حد خود بوده است که با توجه به این که در سایر مطالعات اخیر ایستگاه‌های مطالعاتی زیرحوضه ارومیه این کاهش دبی ورودی به دریاچه محسوس است، می‌تواند زنگ خطری برای دریاچه ارومیه محسوب شود. ناظری و همکاران (Nazeri Tahroudi et al., 2018) روند کاهشی داده‌های سطح آب دریاچه ارومیه را یک سال پس از روند کاهشی داده‌های جریان گزارش کرد. عوامل بسیاری در کاهش جریان رواناب دخیل هستند که یکی از دلایل اصلی آن استفاده از آب رودخانه‌ها در کشاورزی و صنعت می‌باشد. دلیل بعدی را می‌توان احداث سد بر روی رودخانه‌ها نام برد. مطالعات زیادی برای بررسی تغییرات روند جریان رودخانه و میزان بارش حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است و همه آنها تأیید می‌کنند که کاهش رواناب رودخانه‌های حوضه دریاچه ارومیه چشمگیر بوده است. دلایل زیادی برای این کاهش وجود دارد چنانچه در مقابل ۱۳ رودخانه ورودی به دریاچه سدسازی شده است (Hosseini-Moghari et al., 2020، Lari et al., Bashirian et al., 2020، Javadzadeh et al., 2020، Vaheddoost et al., Hamidi-Razi et al., 2019، al., 2019، 2018).

جهت بررسی ایستگاه‌های بناب و خرمازرد در دو دوره، آمار بارندگی و رواناب (میانگین، حداقل، حداکثر) برای دوره اول (۱۳۷۴-۱۳۵۵) و دوره دوم (۱۳۹۷-۱۳۷۵) در جدول ۴ و جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، ابتدا جداول به پنج ستون تقسیم شده و سپس ستون‌های سوم، چهارم و پنجم به دو قسمت تقسیم شدند. ستون سوم (تمام داده‌ها) شامل بخش‌های P و Q بود. در ستون چهارم و پنجم، مجموعه آموزشی و تست نشان داده شده است. بنابراین، مدل‌های RF و SVM (تابع کرنل) با داده‌های واقعی آموزش و آزمایش شدند.



شکل ۶- سری زمانی متوسط بارش و دبی خروجی از ایستگاه های بناب (a و b) و خرمازرد (c و d) در دوره های قبل و بعد ۱۳۷۴
Figure 6- Time series plots of the observed rainfall and runoff values at Bonab (a and b) and Khormazard (c and d) stations before and after 1995

جدول ۴- پارامترهای آماری داده‌های بارندگی و رواناب در مدت ۱۳۷۴-۱۳۵۵

Table 4- Statistical parameters of the rainfall and runoff data 1976-1994

ایستگاه Station	پارامتر Parameter	داده ورودی Entire data 1976-1994		مجموعه آموزشی Training set		مجموعه تست Test set	
		P	Q	SVM	RF	SVM	RF
بناب Bonab	میانگین Mean	31.48	2.02	2.00	1.99	2.15	1.96
	حداقل Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	حداکثر Maximum	98.46	14.81	14.57	11.70	14.81	14.81
	میانگین Mean	28.16	0.34	0.36	0.36	0.33	0.30
خرمازرد Khormazard	حداقل Minimum	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	0.00
	حداکثر Maximum	88.15	2.86	2.86	1.94	1.68	2.86

جدول ۵- پارامترهای آماری داده‌های بارندگی و رواناب در مدت ۱۳۹۷-۱۳۷۵

Table 5- Statistical parameters of the rainfall and runoff data 1995-2019

ایستگاه Station	Parameter	Entire data 1995-2019		Training set		Test set	
		P	Q	SVM	RF	SVM	RF
بناب Bonab	میانگین Mean	27.85	2.07	1.87	1.98	2.30	2.03
	حداقل Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	حداکثر Maximum	99.93	14.37	13.98	13.98	14.37	13.8
	میانگین Mean	25.59	0.19	0.18	0.18	0.13	0.20
خرمازرد Khormazard	حداقل Minimum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	حداکثر Maximum	94.18	3.23	3.23	3.23	1.38	2.11

دوره مطالعاتی در ایستگاه بناب مدل SVM نسبت به مدل RF عملکرد بهتری داشته است و با دقت خوبی توانسته دبی جریان و بارش ماهانه را شبیه‌سازی کند. همچنین در این دوره‌ها در ایستگاه خرمازرد مدل RF کارایی بهتری را نسبت به مدل SVM نشان می‌دهد.

همانطور که در **جدول ۶** (دوره اول) به وضوح دیده می‌شود همبستگی متقابل (CC) در مدل SVM در ایستگاه بناب برای داده‌های آموزشی ۰/۸۶ و در داده‌های تست ۰/۸۵ بدست آمده است. عدد R^2 نیز در این مدل برای داده‌های آموزشی و تست به ترتیب برابر با ۰/۷۴ و ۰/۷۳ تعیین شد. شاخص کارایی نش سائکلیف داده‌های آموزشی و تست به ترتیب برابر است با ۰/۷۳ و ۰/۷۲ و آخرین شاخص که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است خطای جذر میانگین مربعات می باشد و مقدار آن برای داده‌های آموزشی و تست به ترتیب برابر با ۱/۵۲ و ۱/۷۳ بدست آمده است. اما در این دوره برای ایستگاه خرمازرد، مقدار

طبق جداول در هر دو مقطع، در ستون داده کل، ایستگاه بناب بیشترین میانگین بارندگی و رواناب را داشته و کمترین مقادیر میانگین بارندگی و رواناب به ایستگاه خرمازرد مربوط می‌شود.

نتایج مدل‌سازی رواناب با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF)

همانطور که گفته شد به منظور مدل‌سازی داده‌های بارش-رواناب با استفاده از دو مدل SVM و RF بخشی از داده‌ها جهت آموزش و بخشی دیگر جهت صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت. در **جدول ۵** و **جدول ۶** مقادیر شاخص‌های آماری محاسبه شده مربوط به نتایج بخش آموزش و صحت‌سنجی در هر دو مدل SVM و RF ارائه شده است. با توجه به نتایج **جدول ۶** و **جدول ۷** مشخص است که در هر دو

ایستگاه های بناب و خرمازرد زیرحوضه مراغه مناسب دانست. از طرفی دیگر با توجه به نتایج **جدول ۶** و **جدول ۷**، مشاهده می شود که اثر سال های ترسالی و خشکسالی در دوره مطالعاتی اول و دوم، بر روی دقت مدل ها مؤثر بوده است و در دوره خشکسالی (دوم) در این مطالعه، دقت مدل ها کاهش یافته است. بنابراین می توان برای پیش بینی رواناب در سال های آینده از مدل های برتر این مطالعه استفاده کرد. همچنین در **شکل ۷** نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر شبیه سازی شده دبی های ماهانه، توسط مدل های ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای دو ایستگاه بناب و خرمازرد در دو دوره مطالعاتی نشان داده شده است. خط های برازش داده شده در **شکل ۷** نشان دهنده همبستگی بین داده های مشاهداتی و داده های مدل می باشد که نتایج بدست آمده از جداول بالا نیز این موضوع را تصدیق می کند.

در **شکل ۷** نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در برابر مقادیر شبیه سازی شده دبی های ماهانه توسط مدل ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای داده های بخش صحت سنجی دو ایستگاه مورد مطالعاتی نشان داده شد. با توجه به شکل های پراکنش پیش بینی دو مدل، مدل SVM برای ایستگاه بناب و مدل RF برای ایستگاه خرمازرد نه تنها با درجه همبستگی (R) بیشتری فرآیند بارش - رواناب ماهانه را در این تحقیق شبیه سازی نموده است، بلکه تا حدودی در برآورد مقادیر حداکثر رواناب عملکرد بهتری داشته اند.

CC برای دوره های آموزشی و تست مدل RF برابر با ۰/۸۰ و ۰/۷۹ ثبت گردید. مقدار R^2 برای این مدل، برای داده های آموزشی ۰/۶۴ و برای داده های تست ۰/۶۲ تعیین شد. شاخص NSE برای این مدل و دوره های آموزشی و تست، ۰/۸۰ و ۰/۵۶ تعیین شد. اما آخرین شاخص خطای جذر میانگین مربعات به ترتیب برابر با ۰/۲۰ و ۰/۳۰ برای مجموعه آموزشی و تست ثبت گردید. اما در **جدول ۷** (دوره دوم (۱۳۷۵-۱۳۹۷)) و برای ایستگاه بناب، مقدار CC برابر با ۰/۸۶ و ۰/۸۴ (آموزشی و تست) بدست آمد.

همچنین مقدار R^2 برای دوره های آموزشی و تست، ۰/۷۳ و ۰/۷۱ و مقدار شاخص NSE برای مجموعه آموزشی و تست ۰/۷۰ و ۰/۶۶ تعیین گردید. آخرین پارامتر خطای جذر میانگین مربعات برای دوره آموزش و تست به ترتیب برابر با ۱/۱۹ و ۱/۶۷ بدست آمد. اما مقادیر مدل RF برای ایستگاه خرمازرد و برای پارامتر CC و مجموعه آموزشی و تست به ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۷۵، پارامتر R^2 ، ۰/۵۳ و ۰/۴۳، پارامتر NSE برابر با ۰/۵۲ و ۰/۵۶ و آخرین پارامتر RMSE به ترتیب با ۰/۲۴ و ۰/۲۳ تعیین گردید. حال با توجه به اینکه در تحلیل مقالات از داده های تست برای بررسی عملکرد مدل ها استفاده می شود، می توان گفت در این مطالعه نیز CC، R^2 ، NSE و RMSE بدست آمده در داده های تست، برای بارش و رواناب اعداد قابل قبولی هستند و می توان کارایی و عملکرد مدل ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی را برای

جدول ۶- عملکرد مدل های RF و SVM در مجموعه های آموزشی و آزمایشی در مدت ۱۳۷۴-۱۳۵۵

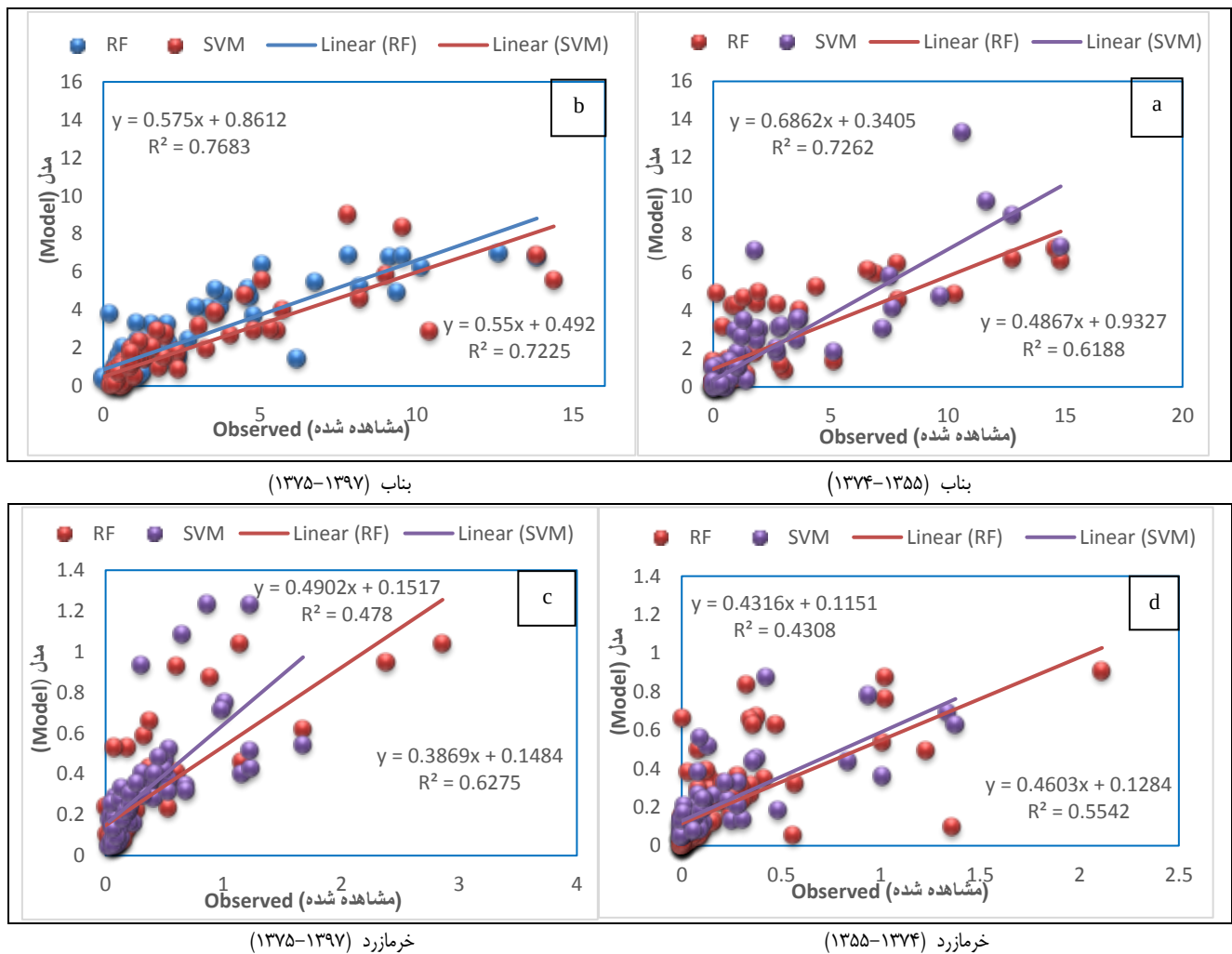
Table 6- Performance of RF and SVM models in the training and testing sets 1976-1994

ایستگاه Station	داده ورودی Entire data 1976-1994	Cross Correlation		R^2		NSE		RMSE	
		SVM	RF	SVM	RF	SVM	RF	SVM	RF
بناب Bonab	آموزش Train	0.86	0.86	0.74	0.75	0.73	0.73	1.52	1.42
	تست Test	0.85	0.79	0.73	0.62	0.72	0.59	1.73	2.15
خرمازرد Khormazard	آموزش Train	0.82	0.80	0.67	0.64	0.66	0.80	0.28	0.20
	تست Test	0.69	0.79	0.48	0.62	0.48	0.56	0.25	0.30

جدول ۷- عملکرد مدل های RF و SVM در مجموعه های آموزشی و آزمایشی در مدت ۱۳۹۷-۱۳۷۵

Table 7- Performance of RF and SVM models in the training and testing sets 1976-1994

ایستگاه Station	داده ورودی Entire data 1995-2019	Cross Correlation		R^2		NSE		RMSE	
		SVM	RF	SVM	RF	SVM	RF	SVM	RF
بناب Bonab	آموزش Train	0.86	0.89	0.73	0.79	0.70	0.78	1.19	1.04
	تست Test	0.84	0.83	0.71	0.69	0.66	0.72	1.67	1.29
خرمازرد Khormazard	آموزش Train	0.62	0.73	0.38	0.53	0.36	0.52	0.27	0.24
	تست Test	0.74	0.75	0.55	0.43	0.49	0.56	0.19	0.23



شکل ۷- نمودارهای پراکنده رواناب شبیه‌سازی شده با استفاده از RF و SVM ایستگاه بناب (a و b) و خرمزرد (c و d) در دوره‌های مطالعاتی قبل و بعد سال ۱۳۷۴

Figure 7- Verification scatter plots of simulated runoff using RF and SVM at Bonab (a and b) and Khormazard (c and d) stations before and after 1995

۱۳۵۵) و بعد آن (۱۳۷۵-۱۳۹۷) تقسیم شود. مقدار بارش و رواناب با لگ زمانی یک ماهه بعنوان ورودی به این مدل وارد و سپس مقادیر رواناب ماهانه مشاهداتی با رواناب ماهانه تخمین زده شده با استفاده از معیارهای ارزیابی مورد بررسی گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو دوره برای ایستگاه بناب مدل SVM کارایی بالاتری نسبت به مدل RF عملکرد داشت و در ایستگاه خرمزرد نیز برای این دو دوره، مدل RF عملکردی بهتری از مدل SVM ارائه کرد. نتایج نشان داد که مقدار همبستگی متقابل برای مجموعه تست و در دو دوره مطالعاتی اول و دوم ایستگاه بناب به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۸۴ بدست آمد. اما مقدار این شاخص برای ایستگاه خرمزرد در دو دوره مطالعاتی مطرح شده و برای مجموعه تست

نتیجه‌گیری

شبیه‌سازی دقیق فرآیند رواناب می‌تواند نقش بسزایی در مدیریت منابع آب و مسائل مربوطه داشته باشد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) و جنگل تصادفی (RF) اقدام به شبیه‌سازی بارش-رواناب دو ایستگاه خرمزرد و بناب (روی رودخانه‌های صوفی‌چای و ماهپری‌چای) شده است. در مطالعه حاضر داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری دشت مراغه از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۹۷ از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان آذربایجان شرقی دریافت گردید. تغییر روند رواناب جاری در سال ۱۳۷۴، باعث گردید مدت مطالعه به دو دوره قبل (۱۳۷۴-

بصورت افزایشی مشاهده گردید. اما در ایستگاه خرمازرد وضعیت بصورت دیگری است و در هر دو دوره مطالعاتی روند دبی بصورت نزولی بوده و حجم جریان خروجی رودخانه ماهپری چای در سال های اخیر به شدت کاهش یافته است، مقدار آماره من کندال نیز روند کاهشی را نشان داد. از دلایل مهم کاهش دبی ورودی رودخانه ماهپری چای در ایستگاه خرمازرد، استفاده از جریان آب در بخش کشاورزی و صنعت می باشد. با توجه به عملکرد خوب این مدل ها در شبیه سازی بارش - رواناب، می توان برای سایر ایستگاه های پایانی در حوضه دریاچه ارومیه نیز از این روش های یادگیری ماشین استفاده کرد.

مدل جنگل تصادفی به ترتیب برابر با 0.79 و 0.75 تعیین گردید. نتایج دیگر این پژوهش می توان به سری زمانی بارش و رواناب طی ۴۳ سال اشاره کرد. با توجه به نمودارهای بدست آمده برای هر دو ایستگاه و همچنین مقدار آماره من کندال برای هر دو ایستگاه و هر دو پارامتر بارش و دبی، در طی این دو دوره روند مشخصی برای بارش دیده نشد، در واقع نتایج نشان داد که بارش در این مناطق بصورت نوسانی بوده است. اما سری زمانی و مقدار آماره برای دبی رودخانه های صوفی چای و ماهپری چای در ایستگاه بناب و خرمازرد، نتایج متفاوتی نشان داد. در ایستگاه بناب، دبی خروجی از این ایستگاه در دوره اول مطالعاتی بصورت کاهشی و افزایشی بود اما در دوره دوم حجم خروجی از ایستگاه

منابع

- Adnan, R.M., Yuan, X., Kisi, O., Adnan, F., & Mehmood, A. (2018). Stream flow forecasting of poorly gauged mountainous watershed by Least Square Support Vector Machine, Fuzzy Genetic Algorithm and M5 Model Tree using climatic data from Nearby Station. *Water Resources Management*, 32, 4469-4486. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2033-2>
- Aurenhammer, F., Klein, R., & Lee, D.T. (2013). *Voronoi Diagrams and Delaunay Triangulations*. World Scientific Publ. Co., Singapore p. 337.
- Band, S.S., Janizadeh, S., Chandra Pal, S., Saha, A., Chakraborty, R., Melesse, A.M., & Mosavi, A. (2020). Flash flood susceptibility modeling using new approaches of hybrid and ensemble tree-based machine learning algorithms. *Remote Sensing*, 12(21), 3568. <http://doi.org/10.3390/rs12213568:2-23>
- Bashirian, F., Rahimi, D., Movahedi, S., & Zakerinejad, R. (2020). Water level instability analysis of Urmia Lake Basin in the northwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(4), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5207-1>
- Bigdeli, Z., Majnooni Heris, A., Delirhasannia, R., & Karimi, S. (2023). Rainfall-runoff modeling of Aji Chai basin using random forest and artificial neural network models. *New Research Sustainable Water Engineering*, 1(2), 27-42. <http://doi:10.22103/nrswe.2023.20278.1013>
- Bigdeli, Z., Majnooni-Heris, A., Delirhasannia, R., & Karimi, S. (2023). Application of support vector machine and boosted tree algorithm for rainfall-runoff modeling (Case study: Tabriz plain). *Environment and Water Engineering*, 9(4), 532-547. <http://doi.org/10.22034/ewe.2023.366913.1816>
- Botsis, D., Latinopoulos, P., & Diamantaras, K. (2011). Rainfall-runoff modeling using support vector regression and artificial neural networks. *Journal Rhodes, Greece*. <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1398.13.6.15.1>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Catani, F., Lagomarsino, D., Segoni, S., & Tofani, V. (2013). Landslide susceptibility estimation by random forests technique: sensitivity and scaling issues. *Natural Hazards Earth System Science*, 13, 2815-2831. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2815-2013>
- Dastorani, M.T., Mahjoobi, J., Talebi, A., & Fakhar, F. (2018). Application of machine learning approaches in rainfall-runoff modeling (Case study: Zayandeh_Rood Basin in Iran). *Civil Engineering Infrastructures Journal*, 51(2), 293-310. <https://doi.org/20.1001.1.23222093.2018.51.2.4.1>
- Eskandari, A., Noori, R., Meeraji, H., & Kiaghaderi, A. (2011). Development of an appropriate model based on artificial neural network and support vector machine to predict the 5-day biochemical oxygen demand while, *Ecology*, 38, 71-82. <https://doi.org/20.1001.1.10258620.1391.38.1.8.1>
- Fathollahi, S., Mirshahi, D., & Abbasipour, B. (2015). *Water and climate change: prediction of runoff from rainfall in the Aji Chai River basin using artificial neural network*, the first national congress of irrigation and drainage in Iran. (In Persian)
- Hamidi-Razi, H., Mazaheri, M., Carvajalino-Fernández, M., & Vali-Samani, J. (2019). Investigating the restoration of Lake Urmia using a numerical modelling approach. *Journal of Great Lakes Research*, 45(1), 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.10.002>
- Hosseini-Moghari, S.M., Araghinejad, S., Tourian, M.J., Ebrahimi, K., & Döll, P. (2020). Quantifying the impacts of human water use and climate variations on recent drying of Lake Urmia basin: the value of different sets of spaceborne and in situ data for calibrating a global hydrological model. *Hydrology & Earth System Sciences*, 24(4). <https://doi.org/10.5194/hess-24-1939-2020>
- Hussain, D., & Khan, A.A. (2020). Machine learning techniques for monthly river flow forecasting of Hunza River.

- Pakistan. *Earth Science Informatics*, 13(3), 939-949. <https://doi.org/10.1007/s12145-020-00450-z>
16. Javadzadeh, H., Ataie-Ashtiani, B., Hosseini, S.M., & Simmons, C.T. (2020). Spectral analysis of periodic behavior of Lake Urmia water level time series Interaction of lake-groundwater levels using cross correlation analysis: A case study of Lake Urmia Basin, Iran. *Science of The Total Environment*, 138822.
17. Kendall, M.G. (1975). *Rank correlation methods*. fourth ed. Charles Griffin, London.
18. Kisi, O., & Parmar, K.S. (2016). Application of least square support vector machine and multivariate adaptive regression spline models in long term prediction of river water pollution. *Journal of Hydrology*, 534, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.014>
19. Lari, A., Pishvae, M.S., & Khodabakhsh P. (2019). A system dynamics approach for basin policy design: Urmia Lake case study. *Kybernetes*. <https://doi.org/10.1108/K-04-2019-0226>
20. Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., & Wallis, J.R. (1994). Hydro-climatological Trends in the Continental United States, 1948-88. *Journal of Climate*, 7, 586-607. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1994\)007<0586:HCTITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1994)007<0586:HCTITC>2.0.CO;2)
21. Lorrai, M., & Sechi, M.G. (1995). Neural nets for modeling rainfall-runoff transformation. *Water Resources Management*, 9, 299-313. <https://doi.org/10.1007/BF00872489>
22. Mann H.B. (1945). non-parametric test against trend. *Journal of Econometrical*, 13, 245-259.
23. Montaseri, M., Nourjou, A., Behmanesh, J., & Akbari, M. (2018). Investigation of heteorological drought in Southern basins of Urmia lake (Case study: Zarrineh rud and Simeneh rud). *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(1), 189-202. <http://doi.org/10.22059/ije.2018.245903.781>
24. Najibzade, N., Qaderi, K., & Ahmadi, M.M. (2020). Rainfall-runoff modelling using support vector regression and artificial neural network models (case study: SafaRoud Dam Watershed). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 13(6), 1709-1720. <https://doi: 20.1001.1.20087942.1398.13.6.15.1>
25. Nazeri Tahroudi, M., Ahmadi, F., & Khalili, K. (2018). Impact of 30 years changing of river flow on Urmia lake basin. *AUT Journal of Civil Engineering*, 2(1), 115-122. <https://doi.org/10.22060/AJCE.2018.14520.5481>
26. Nicodemus, K.K. (2011). Letter to the Editor: On the stability and ranking of predictors from random forest variable importance measures. *Briefings in Bioinformatics*, 12, 369-373. <https://doi.org/10.1093/bib/bbq011>
27. Pasquini, A.I., Lecomte, K.L., Piovano, E.L., & Depetris, P.J. (2006). Recent rainfall and runoff variability in central Argentina. *Q. Int.* 158(1), 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.021>
28. Patil, J. P., Sarangi, A., Singh, O.P., Singh, A.K., & Ahmad, T. (2008). Development of a GIS interface for estimation of runoff from watersheds. *Water Resources Management*, 22(9), 1221-1239. <https://doi.org/10.1007/s11269-007-9222-8>
29. Phomcha, P., Wirojanagud, P., Vangpaisal, T., & Thaveevouthti, T. (2011). Suitability of SWAT model for simulating of monthly streamflow in Lam Sonthi watershed. *The Journal of Industrial Technology*, 7(2), 49-56.
30. Poursalehi, F., KhasheiSiuki, A., & Hashemi, S.R. (2022). Investigating the performance of random forest algorithm in predicting water table fluctuations Compared with two models of decision tree and artificial neural network (Case study: unconfined aquifer of Birjand). *journal of Ecohydrology*, 8(4), 961-974. <https://doi.org/10.22059/IJE.2022.327263.1526>
31. Rezazei, H., Jabbari, A., Behmanesh, J., & Hessari, B. (2017). Modelling the daily runoff of Nazloo Chai watershed at the west side of Urmia Lake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 123-141. <https://doi.org/10.22069/JWFST.2017.9735.2401>
32. Sabouhi, R., & Soltani, S. (2008). Analysis of the climate trend in the major cities of Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 12(46). (In Persian)
33. Salehi Babil, S., Zeinalzadeh, K., & Hessari, B. (2017). The changes in the frequency of daily precipitation in Urmia Lake basin, Iran. *Journal of Theoretical and Applied Climatology*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2177-7>
34. Serrano, A., Mateos, V.L., & Garcia, J.A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921-1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)
35. Seyedian, S. M., Soleimani, M. & Kashani, M. (2014). Predicting streamflow using data-driven model and time series. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 1(3), 167-179. (In Persian). <https://doi:10.22059/IJE.2014.54219>
36. Shafeizadeh, M., Fathian, H., & Nikbakht Shahbazi, A. (2019). Continuous rainfall-runoff simulation by artificial neural networks based on efficient input variables selection using partial mutual information (PMI) algorithm. *Iran-Water Resources Research*, 15(2), 144-161. <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1398.15.2.12.1>
37. Sharafi, M., Samadian Fard, S., & Hashemi, S. (2021). Monthly rainfall forecasting using genetic programming and support vector machine. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 8(4), 63-71.
38. Sharifi, A., Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., & Moghaddamnia, A. (2014). Optimum combination of variables for runoff simulation in Amameh watershed using Gamma test. *Water and Soil Science*, 23(4), 59-72. (In Persian)
39. Sharmod, T., Hosseini, A., & Mohammadzade, H. (2017). Hydrogeochemical report of the study areas of Azarshahr, Shiramini, Ajab Shir and Maragheh. *Geological Survey and Mineral Exploration of IRAN*.
40. Shekar, S., & Xiong, H. (2018). *Encyclopedia of GIS*. Springer Science & Business Media. New York, USA, 1370.

41. Sohrabi Geshnigani, F., Mirabbasi Najafabadi, R., & Golabi, M.R. (2021). Rainfall-runoff modeling using HBV model and random forest algorithm in Bazoft watershed. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1395-1407. <https://doi:20.1001.1.2008479.1400.52.5.18.2>
42. Turgay, P., & Ercan, K. (2005). Trend analysis in Turkish precipitation data. *Hydrological Processes: An International Journal*, 20(9), 2011-2026. <https://doi.org/10.1002/hyp.5993>
43. Vaheddoost, B., & Aksoy, H. (2018). Interaction of groundwater with Lake Urmia in Iran. *Hydrological Processes*, 32(21), 3283-3295. <https://doi.org/10.1002/hyp.13263>
44. Youssef, A.M., Pourghasemi, H.R., Pourtaghi Z.S., & Al-Katheeri, M.M (2015). Landslide susceptibility mapping using random forest, boosted regression tree, classification and regression tree, and general linear models and comparison of their performance at Wadi Tayyah Basin, Asir Regio. *Saudi Arabia Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0614-1>
45. Zarei, M., Zandi, R., & Naemitabar, M. (2022). Assessment of flood occurrence potential using data mining models of support vector machine, chaid and random forest (case study: Frizi watershed). *Jwmr*, 13(25), 133-144. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-1-1140-en.html>

Contents

Estimating the Changes in the Agricultural Lands Using Satellite Images	829
Case Study: Fariman Dam Downstream Basin	
A. Nouri, J. Omidvar, F. Modaresi, K. Davari, S. Nouri , A. Asadi	
Flood Susceptibility Mapping of the Farnat Watershed, Gilan Province	841
F. Mirchooli, I. Gholami, M. Boroughani	
Application of TOPSIS Method in the Investigation of River Water Quality (Case Study: Aji Chai River)	855
N. Jafari, Y. Dinpashoh	
The Impact of Agricultural Waste and Residue Composts on Two Consecutive Spinach Cultivations: 1- Response of Soil Fertility Indicators, Plant Nutrient Uptake, and Yield	871
Kh. Salarinik, M. Nael	
Effects of Humic Acid as Fertigation on Phosphate and Iron Fertilizers Efficiency and Some of Mineral Nutrients Concentration in Corn (<i>Zea mays</i> L.)	891
M. Amarloo, M. Heshmati Rafsanjani, M. Hamidpour	
Impact of Foliar Application of Iron and Zinc Sulfate on Forage Yield and Iron and Zinc Concentration in Corn Fodder (<i>Zea mays</i> L.)	907
K. Asadi, M. Barani Motlagh, S.A. Movahedi Naein, T. Nazari	
Digital Mapping of Soil Texture Particles with Machine Learning Models and Environmental Covariates	923
P. Khosravani , M. Baghernejad, A.A. Moosavi, S.R. FallahShamsi	
Cold Plasma Treatment Effects on Corn (<i>Zea mays</i> L.) Yield and Iron and Zinc Concentration	943
B. Atarodi, M. Zangiabadi	
Changes in Soil-Phosphorus Fractions as Affected by Municipal Sewage Sludge and Triple Super Phosphate under Saline and Non-Saline Conditions	957
H. Hatami, H. Parvizi, A. Parnian, Gh. Ranjbar	
Rainfall-Runoff Modeling of Khormazard and Bonab Hydrometric Stations Using Support Vector Machine and Random Forest Algorithms	971
Z. Bigdeli, A. Majnooni-Heris, R. Delirhasannia, S. Karimi	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 6

2024

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., Tabriz 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: jsa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).



Vol. 37 No. 6

2024

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

Estimating the Changes in the Agricultural Lands Using Satellite Images Case Study: Fariman Dam Downstream Basin	829
A. Nouri, J. Omidvar, F. Modaresi, K. Davari, S. Nouri, A. Asadi	
Flood Susceptibility Mapping of the Famnat Watershed, Gilan Province.....	841
F. Mirchooli, I. Gholami, M. Boroughani	
Application of TOPSIS Method in the Investigation of River Water Quality (Case Study: Aji Chai River)	855
N. Jafari, Y. Dinpashoh	
The Impact of Agricultural Waste and Residue Composts on Two Consecutive Spinach Cultivations: 1- Response of Soil Fertility Indicators, Plant Nutrient Uptake, and Yield	871
Kh. Salarinik, M. Nael	
Effects of Humic Acid as Fertigation on Phosphate and Iron Fertilizers Efficiency and Some of Mineral Nutrients Concentration in Corn (<i>Zea mays</i> L.).....	891
M. Amarloo, M. Heshmati Rafsanjani, M. Hamidpour	
Impact of Foliar Application of Iron and Zinc Sulfate on Forage Yield and Iron and Zinc Concentration in Corn Fodder (<i>Zea mays</i> L.).....	907
K. Asadi, M. Barani Motlagh, S.A. Movahedi Naein, T. Nazari	
Digital Mapping of Soil Texture Particles with Machine Learning Models and Environmental Covariates.....	923
P. Khosravani, M. Baghernejad, A.A. Moosavi, S.R. FallahShamsi	
Cold Plasma Treatment Effects on Corn (<i>Zea mays</i> L.) Yield and Iron and Zinc Concentration	943
B. Atarodi, M. Zangiabadi	
Changes in Soil-Phosphorus Fractions as Affected by Municipal Sewage Sludge and Triple Super Phosphate under Saline and Non-Saline Conditions	957
H. Hatami, H. Parvizi, A. Parnian, Gh. Ranjbar	
Rainfall-Runoff Modeling of Khormazard and Bonab Hydrometric Stations Using Support Vector Machine and Random Forest Algorithms	971
Z. Bigdeli, A. Majnooni-Heris, R. Delirhasannia, S. Karimi	