

- تعیین آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید جو در کشور ۶۶۱
سید ابوالقاسم حقایقی مقدم - فربرز عباسی - ابوالفضل ناصری - پیمان ورجاوند - سید ابراهیم دهقانان - محمد مهدی قاسمی - سالومه سپهری صادقیان - حسن خسروی - محمد کریمی - فرزین پرچی عراقی - مصطفی گودرزی - مختار میرانزاده - سعید فرزانه‌نیا - افشین یوسف گمرگچی - سید معین‌الدین رضوانی - رامین نیکانفر - سید حسن موسوی فضل - علی قدمی فیروزآبادی
- ارزیابی کارایی روش‌های الاستیسنه محور در برآورد سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در میزان دبی رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو) ۶۷۵
هاجر نوروززاده - مهسا حسینیورکاشانی - علی رسولزاده
- پایامد آلودگی نفتی طبیعی و طولانی‌مدت بر جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک ۶۸۷
شکوفه مرادی - محمد رضا ساریخانی - علی بهشتی آل آقا - عادل ریحانی تیار - سید سیامک علوی کیا - علی بنده حق - روح اله شریفی
- اثر توده‌های جنگل کاری شده با سنن مختلف و پوشش مرتعی بر ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک ۷۰۳
یحیی کوچ - محمود توکلی فیض آبادی - کنایون حق وردی
- تعیین حدود پهنه شاخص‌های متحنی توزیع اندازه منافذ خاک ۷۲۳
مهدی زنگی آبادی
- بررسی فرآیندهای تغییر و تحول و تنفس میکروبی خاک در امتداد یک مخروط افکنه نیمه خشک در شمال شرق ایران ۷۳۵
مهران حسن‌زاده بشیان - علیرضا کریمی - عادل سپهر - امیر لکریان - امید بیات
- تأثیر شکل نیتروژن بر ترکیب شیمیایی، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ و عملکرد دو رقم ذرت علوفه‌ای (Zea mays L.) در کشت بدون خاک ۷۵۳
مریم قربانی - شهرام کیانی - علی محرز - سینا فلاح
- پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم ۷۷۱
نسرین ابراهیمی - آذر زرین - عباس مفیدی - عباسعلی داداشی رودباری
- ارزیابی روش‌های پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی کشاورزی (CDI) براساس تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین ۷۸۹
تازیلا شاملو - محمدتقی ستاری - خلیل ولی زاده کامران - حالت آپ آبدین
- ویژگی‌های بارش زراعی و فرین‌های آن در استان مرکزی در دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۹۹ ۸۱۱
سکینه خان‌سالاری - محمود امیدی - مرگانه فلاح‌زاده

Contents

- Determination of Applied Water and Water Productivity in Barley Production in Iran 659
S.A. Haghayeghi Moghaddam, F. Abbasi, A. Nasser, P. Varjavand, S.E. Dehghanian, MM. Ghasemi, S. Sepehri, H. Khosravi, M. Karimi, F. Parchami Araghi, M. Goodarzi, M. Miranzadeh, M. Farzammia, A. Uossef Gomrokchi, M. Rezvani, R. Nikanfar, H. Mousavi fazl, A. Ghadam Firoozabadi
- Evaluation of Elasticity-Based Methods in Estimating Contribution of Climate Change and Human Activities on Rivers' Discharge (Case Study: Gharehsoo River) 673
H. Norouzzadeh- M. Hasanpour Kashani- A. Rasoulzadeh
- Consequence of Natural and Long Term Oil Pollution on Microbial Population and Urease Activity of Soil 685
Sh. Moradi, M.R. Sarikhani, A. Beheshti Ale-Agha, A. Reyhanitabar, S.S. Alavi-kia, A. Bandehagh, R. Sharifi
- The Effect of Plantation Stands with Different Ages and Rangeland Cover on the Properties of Organic and Surface Soil Layer 701
Y. Kooch, M. Tavakoli Feizabadi, K. Haghverdi
- Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters 721
M. Zangiabadi
- Investigating the Soil Evolution and Microbial Respiration along a Semi-Arid Alluvial Fan in Northeastern Iran 733
M. Hassanzadeh Bashtian, A. Karimi, A. Sepehr, A. Lakzian, O. Bayat
- The Effect of Nitrogen Form on Chemical Composition, Leaf Photosynthetic Pigments Concentration and Yield of Two Fodder Maize (Zea mays L.) Cultivars in Soilless Culture 751
M. Ghorbani, SH. Kiani, A. Moharrery, S. Fallah
- Projected Precipitation Extremes in Lake Urmia Basin under Climate Change 769
N. Ebrahimi- A. Zarrin- A. Mofidi- A.A. Dadashi-Roudbari
- Evaluation of Combined Agricultural Drought Index (CDI), Prediction Methods Based on Satellite Images via Deep Learning and Machine Learning Approaches 787
N. Shamlou, M.T. Sattari, Kh. Valizadeh Kamran, H. Apaydin
- Analysis of Crop Precipitation and Its Extreme Events in Markazi Province During the Statistical Period of 1991-1992 to 2020-2021 809
S. Khansalari, M. Omid, M. Fallahzadeh

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 ۵ آذر-دی 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)

تقوایان، صالح

استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)

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

- ۶۶۱ تعیین آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید جو در کشور
سید ابوالقاسم حقایقی مقدم- فربرز عباسی- ابوالفضل ناصری- پیمان ورجاوند- سیدابراهیم دهقانان- محمد مهدی قاسمی- سالومه سپهری صادقیان- حسن خسروی- محمد کریمی- فرزین پرچی عراقی- مصطفی گودرزی- مختار میرانزاده- مسعود فرزام‌نیا- افشین یوسف گمرکچی- سیدمعین‌الدین رضوانی- رامین نیکانفر- سیدحسن موسوی فضل- علی قدمی فیروزآبادی
- ۶۷۵ ارزیابی کارایی روش‌های الاستیسته محور در برآورد سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در میزان دبی رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو)
هاجر نوروززاده- مهسا حسنیورکاشانی- علی رسولزاده
- ۶۸۷ پیامد آلودگی نفتی طبیعی و طولانی‌مدت بر جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک
شکوفه مرادی- محمدرضا ساریخانی- علی بهشتی آل‌آقا- عادل ریحانی تبار- سیدسیامک علوی کیا- علی بنده‌حق- روح اله شریفی
- ۷۰۳ اثر توده‌های جنگل کاری شده با سنین مختلف و پوشش مرتعی بر ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک
یحیی کوچ- محمود توکلی فیض آبادی- کنایون حق وردی
- ۷۲۳ تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک
مهدی زنگی‌آبادی
- ۷۳۵ بررسی فرآیندهای تغییر و تحول و تنفس میکروبی خاک در امتداد یک مخروط افکنه نیمه‌خشک در شمال شرق ایران
مehوان حسن‌زاده بشتیان- علیرضا کریمی- عادل سپهر- امیر لکریان- امید بیات
- ۷۵۳ تأثیر شکل نیتروژن بر ترکیب شیمیایی، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ و عملکرد دو رقم ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) در کشت بدون خاک
مریم قربانی- شهرام کیانی- علی محرری- سینا فلاح
- ۷۷۱ پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم
نسرین ابراهیمی- آذر زرین- عباس مفیدی- عباسعلی داداشی رودباری
- ۷۸۹ ارزیابی روش‌های پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی کشاورزی (CDI) براساس تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین
نازیلا شاملو- محمدتقی ستاری- خلیل ولی‌زاده کامران- حلیت آپ‌آیدین
- ۸۱۱ ویژگی‌های بارش زراعی و فرین‌های آن در استان مرکزی در دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹
سکینه خان‌سالاری- محمود امیدی- مژگان فلاح‌زاده



Research Article

Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p.659-672

Determination of Applied Water and Water Productivity in Barley Production in Iran

S.A. Haghayeghi Moghaddam ^{1*}, F. Abbasi², A. Nasser³, P. Varjavand⁴, S.E. Dehghanian⁵, MM. Ghasemi⁶, S. Sepehri⁷, H. Khosravi⁸, M. Karimi⁹, F. Parchami Araghi¹⁰, M. Goodarzi¹¹, M. Miranzadeh¹², M. Farzammia¹³, A. Uossef Gomrokchi¹⁴, M. Rezvani¹⁵, R. Nikanfar¹⁶, H. Mousavi fazl¹⁷, A. Ghadam Firouzabadi¹⁸

1 and 9- Agricultural Engineering Research Department, Khorasan Razavai Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran

(*- Corresponding Author Email: Sahm51@yahoo.com)

2, 6 and 7- Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

3 and 16- Agricultural Engineering Research Department, East Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran

4- Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran

5- Agricultural Engineering Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Shiraz, Iran

8- Agricultural Engineering Research Department, North Khorasan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Bojnourd, Iran

10- Agricultural Engineering Research Department, Ardabil Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Moghan, Iran

11- Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran

12 and 13- Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

14- Agricultural Engineering Research Department, Ghazvin Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Qazvin, Iran

15 and 18- Agricultural Engineering Research Department, Hamedan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Hamedan, Iran

17- Agricultural Engineering Research Department, Agricultural and Natural Resources Research Center Semnan province (Shahrood), AREEO, Shahrood, Iran

How to cite this article:

Received: 17-05-2023
Revised: 30-08-2023
Accepted: 09-09-2023
Available Online: 09-09-2023

Haghayeghi, S.A., Abbasi, F., Nasser, A., Varjavand, P., Dehghanian, S.E., Ghasemi, MM., Sepehri, S., Khosravi, H., Karimi, M., Parchami Araghi, F., Goodarzi, M., Miranzadeh, M., Farzammia, M., Uossef Gomrokchi, A., Rezvani, M., Nikanfar, R., Mousavi fazl, H., & Ghadam Firouzabadi, A. (2023). Determination of applied water and water productivity in barley production in Iran. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 659-672. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82302.1284>

Introduction

The basic strategy to mitigate water crisis is to save agricultural water consumption by increasing productivity, which will result in more income for farmers and sustainable production. Due to the economic importance of barley production in the country, it is necessary to study the volume of irrigation water and water productivity to produce this strategic product. Based on extensive field research on irrigation water management and application of different irrigation methods in barley farms, the innovations of this research were: a) measuring water consumed and determining water use efficiency in barley production, b) the up-to-date of the measurements and research findings, c) findings applicability for application in agricultural planning at the national and regional levels, d) the ability to development the findings in barley farms at the national level to improve water use efficiency. The hypotheses of this research are: a) barley irrigation water is various in different regions, b) water applied in barley farms is more than the required one, c) the water use efficiency of barley is different in the main production areas, and d) The applied water of barley is not the same in different irrigation methods. Therefore, the main objective of



©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.2023.82302.1284>

this study is to determine the water consumed and water use efficiency in barley production; to measure the water applied to barley farms in the main production areas; to compare the water measured in the production areas with the net irrigation requirement; and finally to determine water use efficiency of the barley in the main production areas in the Iran.

Materials and Methods

For this purpose, the volume of irrigation water and barley yield in 296 selected farms in 12 provinces (about 75% of the area under cultivation and production of barley in Iran) including Khuzestan, East Azerbaijan, Ardabil, North Khorasan, Fars, Khorasan Razavi, Tehran, Semnan, Markazi, Isfahan, Hamedan and Qazvin were measured directly. Farms in the mentioned provinces were selected to cover various factors such as irrigation method, level of ownership, proper distribution and quality of irrigation water. By carefully monitoring the irrigation program of selected farms during the growing season, the amount of irrigation water for barley during one year was measured. At the end of the season and after determining the average yield of barley during the 2020-2021 year, the values of irrigation water productivity and total water productivity (irrigation+effective rainfall) were determined in selected barley farms in each region. The volume of water supplied was compared with the gross irrigation requirements estimated by the Penman-Monteith method using meteorological data from the last ten years, and compared with the values of the National Water Document. Analysis of variance was used to investigate the possible differences in yield, irrigation water and water productivity in barley production.

Results and Discussion

To assess the reliability of statistical analysis, we evaluated the sufficiency of the number of measurements needed for both the quantity of irrigation water and the ley yield on the farms. Subsequently, we computed statistical indices, such as the mean and standard deviation. The results showed that the number of measurements of irrigation water and barley yield was to be 296 and 283, respectively, which was more than the number of measurements required for irrigation water (41 dataset) and yield (50 dataset). Therefore, the sufficiency of the data for the statistical analysis was reliable. The results showed that the difference in yield, volume of irrigation water and water productivity indices were significant in the mentioned provinces. The volume of barley irrigation water in the studied areas varied from 1900 to 9300 cubic meters per hectare and its average weight was 4875 cubic meters per hectare. The average barley yield in selected farms varied from 1630 to 7050 kg ha⁻¹ and the average was 3985 kg ha⁻¹. Irrigation water productivity in selected provinces ranged from 0.22 to 1.53 and its weight average was 0.90 kg m⁻³. Average gross irrigation water requirement in the study areas by the Penman-Monteith method using meteorological data of the last ten years and the national water document were 4710 and 4950 cubic meters per hectare, respectively. Irrigation efficiency of barley fields in the country is estimated at 62-65% without deficit irrigation.

Conclusion

In order to reduce water consumption and improve water productivity, it is suggested to manage water delivery to farms during the season and deliver water rights to them according to crops water requirements. To reduce water losses and enhance productivity in the barley farms, it is suggested the application of modern irrigation systems according to the farms conditions with the suitable operation; and modification and improvement of surface and traditional irrigation methods. Note that, water is only one of several necessary and effective inputs in the optimal and economic production of barley. On the other hand, attention should be paid to the optimal application of other inputs including: seeds, fertilizers, equipment and tools etc.

Keywords: Barley, Irrigation water, Water productivity, Yield

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۶۷۲-۶۵۹

تعیین آب آبیاری و بهره‌وری آب در تولید جو در کشور

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^{۱*}، فریبرز عباسی^۲، ابوالفضل ناصری^۳، پیمان ورجاوند^۴، سیدابراهیم دهقانان^۵،
محمد مهدی قاسمی^۶، سالومه سپهری صادقیان^۷، حسن خسروی^۸، محمد کریمی^۹، فرزین پرچی عراقی^{۱۰}، مصطفی
گودرزی^{۱۱}، مختار میرانزاده^{۱۲}، مسعود فرزام‌نیا^{۱۳}، افشین یوسف گمرکچی^{۱۴}، سیدمعین‌الدین رضوانی^{۱۵}، رامین نیکانفر^{۱۶}،
سیدحسن موسوی فضل^{۱۷}، علی قدمی فیروزآبادی^{۱۸}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

چکیده

با توجه به اهمیت اقتصادی تولید جو در کشور، بررسی حجم آب آبیاری و بهره‌وری آب برای تولید این محصول استراتژیک ضرورت دارد. به این منظور، حجم آب آبیاری و عملکرد جو در ۲۹۶ مزرعه منتخب ۱۲ استان (۷۵ درصد سطح زیرکشت آبی و تولید جو در کشور) شامل استان‌های خوزستان، آذربایجان شرقی، اردبیل، خراسان شمالی، فارس، خراسان رضوی، تهران، سمنان، مرکزی، اصفهان، همدان و قزوین به‌طور مستقیم اندازه‌گیری گردید. در انتهای فصل و پس از تعیین میانگین عملکرد محصول جو طی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹، مقادیر بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کل (آبیاری + بارندگی مؤثر) در مزارع منتخب جو در هر منطقه تعیین شد. نتایج نشان داد تفاوت عملکرد، حجم آب آبیاری و شاخص‌های بهره‌وری آب در استان‌های یادشده معنی‌دار بود. حجم آب آبیاری جو در مناطق مورد مطالعه از ۱۹۰۰ تا ۹۳۰۰ متر مکعب در هکتار متغیر و میانگین وزنی آن ۴۸۷۵ متر مکعب در

۱ و ۹- استادیاران پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Sahm51@yahoo.com)

۲، ۶ و ۷- به‌ترتیب استاد و استادیاران پژوهش، بخش تحقیقات آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
۳ و ۱۶- دانشیار مربی پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران

۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
۵- مربی پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران
۸- محقق، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان شمالی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، بجنورد، ایران
۱۰- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل (مغان)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران
۱۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران
۱۲ و ۱۳- محقق و مربی پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
۱۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان قزوین، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، قزوین، ایران
۱۵ و ۱۸- استادیار و دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، همدان، ایران

۱۷- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان سمنان (شاه‌رود)، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شاه‌رود، ایران

هکتار بود. میانگین عملکرد جو در مزارع منتخب از ۱۶۳۰ تا ۷۰۵۰ کیلوگرم در هکتار متغیر و میانگین وزنی آن ۳۹۸۵ کیلوگرم در هکتار بود. بهره‌وری آب آبیاری نیز در استان‌های منتخب از ۰/۲۲ تا ۱/۵۳ متغیر و میانگین وزنی آن ۰/۹۰ کیلوگرم تعیین شد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب، تحویل آب به مزارع در طول فصل مدیریت شود و حقایقه متناسب با نیاز آبی در نظر گرفته شود. استفاده از برنامه‌ریزی مناسب آبیاری به‌طور مسلم موجب تلفات آب و افزایش بهره‌وری در مزارع جو می‌گردد. برای بهبود بهره‌وری لازم است تمام نهاده‌های مؤثر در تولید بهینه و اقتصادی از جمله آب، بذر، کود، سم، تجهیزات و ادوات، نیروی انسانی آموزش‌دیده توجه لازم مبذول گردد.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی، آبیاری، بازده کاربرد، تولید جو، کارایی مصرف آب

مقدمه

گیاه جو (*Hordium vulgare*) تقریباً در تمام کشورهای جهان کشت و تولید شده و پس از گندم، ذرت و برنج به‌عنوان چهارمین غله جهان از نظر تولید در نظر گرفته می‌شود. در ایران، جو با سطح زیر کشت (آبی و دیم) بیش از ۱۶۶۰ هزار هکتار و با تولید بیش از ۳۸۰۰ هزار تن (۲۶۰۰ هزار تن از کشت آبی و ۱۲۰۰ هزار تن از کشت دیم) بعد از گندم، عمده‌ترین محصول زراعی می‌باشد و با توجه به سازگاری وسیع اکولوژیکی در اکثر نقاط کشور مورد کشت و کار قرار می‌گیرد (Ahmadi et al., 2021). با توجه به سطح زیرکشت قابل‌توجه جو و جایگاه مهم این گیاه در ترکیب علوفه دام کشور، ارزیابی حجم آب آبیاری این محصول و سهم آب اختصاص‌یافته از منابع آب کشور در تولید جو از اهمیت زیادی برخوردار است.

آب یکی از مهم‌ترین عوامل رشد و نمو جو و سایر گیاهان است. نیاز جو به آب در ابتدای دوره رشد زیاد و تأمین رطوبت در اطراف ریشه یکی از عوامل مهم و اولیه برای رشد کامل و تولید محصول کافی در این گیاه می‌باشد. در جو حساس‌ترین مرحله رشد به تنش رطوبتی مرحله بین گرده‌افشانی و رسیدن دانه‌ها است که باعث کاهش قابل‌ملاحظه وزن هزار دانه می‌شود. در مجموع مراحل حساس رشد جو که در آن احتیاج بیشتری به آب دارد عبارت‌اند از: جوانه زدن، ساقه رفتن، تولید سنبله، گلدهی و پر شدن دانه (Sohrabi, 2015). نقدی‌زادگان و همکاران (Naghdyzadegan et al., 2016) در آزمایشی دوساله (۲۰۱۵-۲۰۱۳) در ایستگاه تحقیقاتی باجگاه دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، تأثیر سطوح مختلف آبیاری و ازت بر رشد و عملکرد جو (رقم ریحان) را بررسی کردند. بالاترین بهره‌وری آب دانه جو از تیمار تأمین ۷۵٪ نیاز آبی در سال اول و دوم به‌ترتیب به میزان ۱/۳۴ و ۱/۲۷ کیلوگرم بر متر مکعب حاصل شد. مقدار مصرف آب آبیاری در تیمارهای تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی این آزمایش، به‌ترتیب در سال اول و دوم برابر ۴۴۰۰ و ۴۸۰۰ متر مکعب در هکتار برآورد گردیده است. پیراسته و همکاران (Pirasteh-Anosheh et al., 2017) در تحقیقی به بررسی تأثیر شوری آب آبیاری بر عملکرد جو، و بهره‌وری آب در مرکز ملی تحقیقات شوری یزد پرداختند. میانگین دوساله بهره‌وری آب محصول جو با شوری آب آبیاری ۲ دسی‌زیمنس بر متر برابر ۰/۸۸ کیلوگرم بر متر مکعب و با شوری آب ۱۲ دسی‌زیمنس بر

متر ۰/۶۴ به‌دست آمد. میانگین آب مصرفی توسط گیاه در کرت‌های شاهد (شوری ۲) معادل ۷۳۰۰ متر مکعب در هکتار و در کرت‌های شور (شوری ۱۲) برابر با ۶۲۰۰ متر مکعب در هکتار گزارش شده است. الخاصی و همکاران (Alihashi et al., 2019) در تحقیقی بهبود بهره‌وری آب در تولید جو با به‌کارگیری سامانه استحصال آب باران و آبیاری تکمیلی را در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه تربیت مدرس مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که استفاده از سامانه جمع‌آوری آب باران موجب افزایش عملکرد و بهره‌وری آب جو نسبت به شرایط دیم شد. انجام یک‌مرتب آبیاری تکمیلی موجب شد که بیشترین بهره‌وری آب در بین تیمارهای مختلف (۰/۶۷ کیلوگرم بر متر مکعب) به دست آمد. غلامی و همکاران (Gholami et al., 2016) گزارش نموده‌اند که بهره‌وری آب آبیاری در روش‌های آبیاری بارانی برای محصول جو، ۰/۷۵ تا ۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب و میزان بهره‌وری آب آبیاری در آبیاری سطحی ۰/۴۳ تا ۱/۴۲ کیلوگرم بر متر مکعب بود. رضانی اعتدالی و آبابایی (Ramezani-Etedali and Ababaei, 2016) در تحقیقی به برآورد اجزاء ردپای آب مجازی در تولید جو در مقیاس ملی و استانی پرداختند. نتایج نشان داد مجموع ردپای آب در اراضی جو آبی در استان‌های منتخب بین ۲۰۸۱ متر مکعب بر تن در استان کرمانشاه تا ۴۹۸۴ متر مکعب بر تن در استان خراسان متفاوت بود. میانگین ردپای آب در تولید جو آبی در استان‌های منتخب برابر با ۳۲۰۹ متر مکعب در تن بود. جناب و نظری (Jenab and Nazari, 2019) در تحقیقی به بررسی تعیین شکاف بهره‌وری آب در استان قزوین پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد شکاف عملکرد محصول جو در استان قزوین ۵/۴ تن در هکتار و شکاف بهره‌وری آب در تولید جو ۰/۴۷ کیلوگرم بر متر مکعب بود. میانگین شاخص بهره‌وری نسبی آب (نسبت بهره‌وری فعلی به بهره‌وری پتانسیل) برای محصول جو برابر ۰/۵۴ برآورد گردید. رضانی اعتدالی و آبابایی (Ramezani-Etedali and Ababaei, 2017) در تحقیقی به بررسی رد پای آب در تولید جو در سطح ایران پرداختند. نتایج نشان داد رد پای آب برای تولید محصول جو در سطح ایران ۷۹۷۵ میلیون متر مکعب در سال بوده است. اکبری و جاسمی (Akbari and Jasemi, 2008) در تحقیقی، بهره‌وری آب در لاین‌های امیدبخش جو متحمل به خشکی آخر فصل با آبیاری قطره‌ای را بررسی نمودند. بر اساس نتایج این تحقیق در آبیاری کامل

خشک)، عبدالواحد (Abd El-Wahed et al., 2016) میزان عملکرد و بهره‌وری آب آبیاری بارانی در کشت جو را به‌ترتیب، ۵/۵۰ تن بر هکتار و ۰/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کردند. پارادو و همکاران (Pardo et al., 2020) طی یک مطالعه مزرعه‌ای سه‌ساله (۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷) در منطقه کاستیا-لامانچا^۱ اسپانیا با اقلیم نیمه‌خشک، اثر اعمال کم‌آبیاری بر عملکرد جو و بهره‌وری آب را مورد بررسی قرار دادند. تیمارهای آبیاری، شامل آبیاری کامل و تأمین ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد نیاز آبیاری خالص جو (۲۵۰ میلی‌متر) (به‌ترتیب، تیمارهای T1 تا T5) بودند. عمق آب کاربردی بین تیمارهای مختلف بین ۱۷۵ تا ۳۲۹ میلی‌متر، عملکرد جو بین ۶/۳ تا ۹/۱ تن بر هکتار و بهره‌وری آب آبیاری بین ۲/۸ تا ۳/۶ کیلوگرم بر مترمکعب (به‌ترتیب در تیمارهای T1 و T4) متغیر بود.

بررسی منابع نشان می‌دهد که پژوهش‌های انجام شده در خصوص ارزیابی حجم آب مصرفی و بهره‌وری آب در تولید جو در سطح کشور به‌طور عمده یا در مناطق محدود انجام شده و یا در چارچوب پروژه‌های پژوهشی در مقیاس پلات‌های آزمایشی انجام شده است. بنابراین گزارش جامعی از اندازه‌گیری و برآورد حجم آب مصرفی محصول جو برای بهره‌برداری در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی در سطح کشور گزارش نشده است.

بر مبنای بررسی منابع تحقیقات گسترده در زمینه مدیریت آب آبیاری و کاربرد روش‌های مختلف آبیاری در مزارع جو در کشور، نوآوری‌های این پژوهش عبارت بودند از: الف) اندازه‌گیری حجم آب مصرفی و تعیین بهره‌وری آب در تولید جو در سطح کشور، ب) به‌روز بودن اندازه‌گیری‌ها و نتایج و یافته‌های پژوهشی، ج) قابلیت کاربرد یافته‌ها برای بهره‌برداری در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی در سطح ملی و منطقه‌ای، د) قابلیت ترویج یافته‌ها در مزارع جو در سطح ملی برای بهبود بهره‌وری آب. در این پروژه تلاش گردید تا میزان آب کاربردی در مزارع جو کشور در مناطقی که بیشترین سطح کشت این محصول را دارند، مورد بررسی و اندازه‌گیری مستقیم قرار بگیرد. همچنین فرضیه‌های این پژوهش به شرح الف) حجم آب آبیاری جو در مناطق مختلف کشور تفاوت دارد، ب) میانگین آب کاربردی در مزارع جو کشور بیشتر از مقدار موردنیاز است، ج) بهره‌وری آب جو در مناطق اصلی تولید این گیاه متفاوت است، و د) حجم آب کاربردی جو در روش‌های مختلف آبیاری یکسان نیست. بنابراین هدف اصلی از اجرای این پروژه تعیین حجم آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید محصول جو در کشور است. اهداف فرعی این پروژه عبارت بودند از: اندازه‌گیری حجم آب داده شده به مزارع جو در مناطق عمده تولید این محصول در کشور، مقایسه حجم آب اندازه‌گیری شده در قطب‌های تولید با نیاز خالص آبیاری جو و تعیین بهره‌وری آب جو در مناطق عمده تولید این محصول در کشور

متوسط حجم آب آبیاری جو در روش قطره‌ای برابر با ۳۴۰۷ متر مکعب در هکتار و بهره‌وری آب ۱/۸۳ کیلوگرم بر متر مکعب بود. شریف و عبدالمحسن (Shrief and Abd El-Mohsen, 2014) در تحقیقی اثرات رژیم‌های مختلف آبیاری بر عملکرد و بهره‌وری آب در تولید جو در منطقه‌ای در لیبی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، آبیاری کامل معادل ۸۷۸۶ متر مکعب در هکتار و کم‌آبیاری با کاهش درصدهای مختلف در میزان آبیاری برای محصول جو اعمال گردید. نتایج نشان داد که در بین تیمارها، بالاترین بهره‌وری آب در تیمار آبیاری کامل به میزان ۰/۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب به دست آمد. حوس و کروگمان (Hobbs and Krogman, 1973) در تحقیقی نیاز آبی گندم، جو و یولاف را در آلبرتای کانادا تعیین نمودند. نتایج این تحقیق نشان داد که متوسط تبخیر و تعرق واقعی جو در سه فصل زراعی مورد اندازه‌گیری برابر با ۴۲۸ میلی‌متر بود. میانگین عمق آبیاری اعمال شده در این سه فصل برابر با ۲۵۳ میلی‌متر بوده و مابقی نیاز آبی گیاه از باران تأمین شده است. طی یک مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شیراز، قاسمی و سپاسخواه (Ghasemi-Aghbolaghi and Sepaskhah, 2018) اثر شیوه کشت، سطح کود ازت و آبیاری بخشی منطقه ریشه گیاه جو بر آب مصرفی و عملکرد جو را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد میزان بهره‌وری آب آبیاری در شیوه آبیاری جویچه‌ای معمولی بین ۰/۳۸ تا ۰/۷۷ کیلوگرم بر متر مکعب و در شیوه آبیاری جویچه‌ای یک‌درمیان متغیر بین ۰/۴۱ تا ۰/۸۶ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. حسین و الجالود (Hussain and Al-Jaloud, 1998) در آزمایش مزرعه‌ای دوساله در منطقه دیراب عربستان سعودی، عملکرد دانه جو و بهره‌وری آب را در شرایط آبیاری کامل و اعمال پنج تیمار کاربرد کود ازت مورد بررسی قرار دادند. میزان عملکرد دانه جو بین ۲/۱ تا ۵/۵ تن بر هکتار و بهره‌وری آب آبیاری کاربردی ۰/۳۴ تا ۰/۸۷ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش گردید. در یک مطالعه لایسیمیتری دوساله در منطقه باری، ایتالیا (با اقلیم مدیترانه‌ای)، کاترجی و همکاران (Katerji et al., 2009) اثر سطوح مختلف تنش خشکی و شوری بر عملکرد جو در خاک شور را مورد بررسی قرار دادند. میزان تبخیر-تعرق واقعی جو بین ۴۶۴ تا ۶۱۵ میلی‌متر، عملکرد دانه جو بین ۵/۹ تا ۷/۵ تن بر هکتار و بهره‌وری آب بین ۱/۲ تا ۱/۴۷ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. مورا و همکاران (Morell et al., 2011) طی یک مطالعه مزرعه‌ای دوساله در دره ابرو، اسپانیا (با اقلیم نیمه‌خشک)، اثر خاک ورزی و سطوح مختلف کود ازت (شامل کاربرد صفر، ۶۰ و ۱۲۰ کیلوگرم نیتروژن بر هکتار) را بر عملکرد جو و بهره‌وری آب آبیاری مورد بررسی قرار دادند. عملکرد دانه جو در بین تیمارهای مورد بررسی بین ۰/۳۱ تا ۴/۴ تن بر هکتار و بهره‌وری آب بین ۰/۱۲ تا ۰/۹۷ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. در تحقیقی در منطقه سبها در جنوب لیبی (با اقلیم

مواد و روش‌ها

مناطق منتخب برای اجرای پژوهش

در این پژوهش استان‌های خراسان رضوی، فارس، مرکزی، اصفهان، همدان، خوزستان، تهران، قزوین، آذربایجان شرقی، اردبیل، خراسان شمالی و سمنان به عنوان مناطق عمده تولید جو در کشور که سطح زیرکشت و میزان تولید جو در آن‌ها بخش مهمی از کل کشور را شامل می‌شود (Ahmadi et al., 2021)، به عنوان مناطق پایلوت

اجرای پژوهش انتخاب شدند. در جدول ۱ تعداد مزرعه انتخابی هر استان ارائه شده است. تعداد مزرعه در هر استان، بر اساس درصد سطح زیرکشت جو در آن استان نسبت به کل کشور انتخاب شده است. بعد از تعیین تعداد مزرعه در هر استان، مزارع مورد مطالعه (با هماهنگی مراکز خدمات و مدیریت‌های جهاد کشاورزی مناطق مورد مطالعه) طوری انتخاب شد که شرایط مختلف از نظر شوری آب‌و‌خاک، نوع مالکیت (بزرگ مالک و خرده‌مالک)، روش آبیاری را پوشش دهند و از پراکندگی مناسب در سطح منطقه برخوردار باشند.

جدول ۱- شهرستان‌های مورد مطالعه و تعداد مزرعه‌های انتخابی جو در استان‌های منتخب

Table 1- Studied counties with barley farms number in selected provinces

ردیف No	نام استان Province	شهرستان‌های مورد مطالعه Studied counties	مزارع انتخابی Farms number
1	خراسان رضوی Khorasan Razavi	سبزوار- نیشابور- مشهد- چناران- تربت جام Sabzvar, Neyshabour, Mashad, Chenaran, Torbate jam	47
2	فارس Fars	مرودشت- سپیدان- بوانات- شیراز- فسا Marvdasht, Sepidan, Bovanat, Shiraz, Fasa	43
3	مرکزی Markazi	اراک- زرندیه- ساوه Arak, Zarandieh, Saveh	25
4	اصفهان Isfahan	اصفهان- شاهین‌شهر- برخوار- اردستان- گلپایگان Isfahan, Shahinshahr, Barkhar, Ardestan, Golpayeghan,	26
5	همدان Hamedan	کبودرآهنگ- همدان- بهار Kabadarhang, Hamedan, Bahar	28
6	خوزستان Khuzestan	اهواز- هویزه- شادگان Ahvaz, Hoveyze, Shadghan	29
7	تهران Tehran	ورامین- شهرری- پاکدشت Varamin, Shahrrey, Pakdasht	26
8	قزوین Ghazvin	بوئین‌زهره Boueen Zahra	13
9	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	سراب- بناب- اسکو Sarab, Bonab, Osku	23
10	اردبیل Ardabil	اردبیل- کوثر Ardabil, Kosar	18
11	خراسان شمالی North Khorasan	شیروان Shirvan	12
12	سمنان Semnan	سمنان- شاهرود- دامغان Semnan, Shahroud, Damghan	6
	جمع Total		296

۲۵ درصد بهره‌برداران دارای سواد دانشگاهی (فوق‌دیپلم به بالا) و بقیه به‌ترتیب ۳۱ درصد تحصیلات متوسطه، ۱۷ درصد سطح راهنمایی، ۲۴ درصد سواد ابتدایی و فقط ۳ درصد بی‌سواد بودند.

عامل‌ها یا فراسنچ‌های برآورد شده در پژوهش

بارندگی مؤثر به روش SCS بر اساس داده‌های روزانه برآورد شد (SCS, 1972). نیاز آبی گیاه مرجع به روش پنمن-مانتیت با استفاده از داده‌های ۱۰ سال اخیر برای منطقه موردنظر از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی برآورد گردید. نیاز آبی گیاه مرجع با اعمال ضریب گیاهی (Allen et al., 1998) به نیاز آبی خالص گیاه تبدیل شد. عملکرد محصول در پایان فصل زراعی نیز اندازه‌گیری و بهره‌وری آب در هر یک از مزارع و مناطق مورد مطالعه محاسبه و مقایسه گردید. فراسنچ بهره‌وری آب از رابطه (۲) تعیین شد:

$$WP = \frac{CY}{CW} \quad (2)$$

در رابطه ۲: WP = بهره‌وری فیزیکی آب در تولید جو (کیلوگرم بر متر مکعب آب)، CY = عملکرد جو (کیلوگرم در هکتار)، و CW = مجموع حجم آب داده شده و بارندگی مؤثر در تولید جو (متر مکعب در هکتار) است. بالاتر بودن این شاخص، نشان‌دهنده بهره‌وری فیزیکی بهتری است. از این شاخص هم می‌توان برای مقایسه بهره‌وری فیزیکی آب در یک نوع محصول معین در مناطق مختلف و هم برای یک منطقه (مزرعه) خاص ولی طی زمان استفاده کرد. برای بررسی تغییرات عملکرد، حجم آب آبیاری و شاخص بهره‌وری آب جو از تحلیل واریانس استفاده شد.

نتایج و بحث

بررسی کفایت اندازه‌گیری‌های حجم آب آبیاری و عملکرد جو

برای تشخیص قابلیت اعتماد تحلیل آماری، کفایت تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای کمیت‌های حجم آب آبیاری و عملکرد جو در مزرعه‌های منتخب از رابطه ۱ برآورد و شاخص‌های آماری داده‌ها شامل میانگین، انحراف معیار محاسبه گردید، که نتایج حاصل از این بررسی‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طوری‌که در جدول مذکور نشان داده شده است، تعداد اندازه‌گیری‌های حجم آب آبیاری و عملکرد جو در این پژوهش به‌ترتیب ۲۹۶ و ۲۸۳ مورد بود که به‌مراتب بیشتر از تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای حجم آب آبیاری (۴۱ داده) و عملکرد (۵۰ داده) بود. بنابراین کفایت داده‌ها برای تحلیل آماری این کمیت قابل اعتماد و محرز بود.

برای بررسی کفایت تعداد مزارع انتخابی و سایر فراسنچ‌ها، از رابطه (۱) استفاده شد:

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{(\bar{x} - \mu)^2} \quad (1)$$

در رابطه ۱: n = تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای تحلیل واریانس عملکرد و حجم آب آبیاری جو در سطح کشور، z = سطح اعتماد (برای سطح اعتماد ۹۵ درصد، مقدار آن ۱/۹۶ در نظر گرفته شد)، σ^2 = واریانس جمعیت، μ میانگین جمعیت و $\bar{x}$ میانگین اندازه‌گیری‌ها است.

عامل‌های اندازه‌گیری شده در پژوهش

عامل‌های اصلی اندازه‌گیری شده در این پژوهش حجم آب مصرفی و عملکرد محصول جو بود و فراسنچ بهره‌وری آب در تولید محصول بر مبنای این دو عامل تعیین گردد. مقدار تبخیر و تعرق گیاه جو در هر منطقه با استفاده از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای پروژه در دوره ۱۰ ساله اخیر (۱۴۰۰-۱۳۹۱) و سال انجام تحقیق (سال ۱۴۰۰) با استفاده از روش پنمن-مانتیت محاسبه شد. نتایج نیاز آبی محاسبه شده با مقادیر ارائه شده در سند ملی آب مقایسه گردید. با توجه به این‌که هدف اصلی از اجرای پروژه حاضر، اندازه‌گیری حجم آب آبیاری محصول جو در مناطق مختلف کشور بوده است، آب داده‌شده توسط کشاورزان برای تولید جو در طول فصل زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ بدون دخالت در مدیریت آبیاری، و در سطح مزارع بهره‌برداران و کشاورزان اندازه‌گیری شده است. حجم آب آبیاری ورودی به مزرعه، با اندازه‌گیری مقدار دبی از منبع آب (رودخانه، چاه، قنات، چشمه) با وسیله مناسب (فلوم دوزنقه‌ای) به داخل هر مزرعه اندازه‌گیری شد.

در هر کدام از مزرعه‌های مورد مطالعه، مشخصات بهره‌برداران (پیشرو یا معمولی)، آدرس محل اجرا، نوع اقلیم، مختصات جغرافیایی، نوع منبع آب (سطحی یا زیرزمینی)، نوع شبکه (مدرن یا سنتی)، دبی و شوری آب آبیاری، سطح کل اراضی و سطح زیرکشت مزرعه جو، بافت و شوری عصاره اشباع خاک، روش آبیاری مورد استفاده (در صورت وجود سامانه نوین آبیاری شامل روش‌های بارانی و قطره‌ای، نوع و دبی قطره‌چکان یا آبپاش، فاصله نوارهای آبیاری قطره‌ای یا باله‌های آبیاری، تعداد نوبت‌های آبیاری و ساعت آبیاری در هر نوبت)، نوع و میزان کود مصرفی، تعداد دفعات کوددهی در هر مزرعه مشخص و در برگه‌ها ثبت شد.

روش آبیاری مزارع منتخب جو سطحی، بارانی و قطره‌ای بود. البته در برخی استان‌های مورد مطالعه از جمله خوزستان، تهران و آذربایجان شرقی همه مزارع به روش سطحی آبیاری می‌شدند. در مجموع، ۷۵ درصد مزارع مورد مطالعه به روش سطحی، ۲۲ درصد به روش بارانی و تنها ۳ درصد به روش قطره‌ای آبیاری می‌شدند. بهره‌برداران مزارع منتخب جو در این پروژه دارای سطوح مختلف سواد بودند. خوشبختانه

جدول ۲- میانگین، انحراف معیار و کفایت اندازه‌گیری‌ها در مزارع تولید جو

Table 2- Mean, standard deviation and adequacy of measurements in barley production fields.

شاخص آماری Statistical indicators	حجم آب آبیاری Irrigation water (m ³ ha ⁻¹)	عملکرد جو Barley yield (kg ha ⁻¹)
میانگین (حسابی) Average (arithmetic)	4755	3863
انحراف معیار Standard deviation	1544	1388
تعداد اندازه‌گیری لازم Measurements required	41	50
تعداد اندازه‌گیری‌های انجام‌شده Number of measurements	296	283

کشور بسیار زیاد می‌باشد، به‌طوری‌که متوسط عملکرد مزرعه‌ها از ۷۰۵۰ کیلوگرم در هکتار تا ۱۶۳۰ کیلوگرم در هکتار متغیر بوده است. این دامنه تغییرات عملکرد محصول در استان‌ها و مزارع مختلف بیانگر تأثیر عوامل متعدد فنی و مدیریتی در عملکرد محصول جو است. به نظر می‌رسد مدیریت آبیاری، مدیریت زراعی، مدیریت تغذیه گیاه، اقلیم منطقه، نوع سامانه آبیاری، تاریخ کاشت، مدیریت دفع آفات و بیماری‌های گیاهی، رقم گیاه از عوامل مهم در تغییرات عملکرد محصول در استان‌ها و مزارع مختلف، باشند. میانگین کل عملکرد محصول جو در کشور در شکل ۱ ارائه شده‌اند. بر این اساس میانگین وزنی عملکرد جو در مزارع کشور ۳۹۸۵ کیلوگرم در هکتار و در مزرعه‌های با روش آبیاری سطحی ۳۷۳۵ کیلوگرم در هکتار، با روش آبیاری بارانی ۴۲۲۰ کیلوگرم در هکتار و با روش آبیاری قطره‌ای ۴۸۱۵ کیلوگرم در هکتار بود. عبدالواحد و همکاران (Abd El-Wahed et al., 2016) میزان عملکرد جو تحت آبیاری بارانی را در منطقه سه‌ها در جنوب لیبی (با اقلیم خشک)، حدود ۵۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار گزارش کرده‌اند. حسین و الجالود (Hussain and Al-Jaloud 1998) در آزمایش مزرعه‌ای دوساله عملکرد دانه جو را در شرایط آبیاری کامل و اعمال پنج تیمار کاربرد کود ازت را در منطقه دیراب عربستان سعودی، مورد بررسی قرار داده و میزان عملکرد دانه جو بین ۲۱۰۰ تا ۵۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار گزارش نموده‌اند. همچنین کاترجی و همکاران (Katerji et al., 2009) اثر سطوح مختلف تنش خشکی و شوری بر عملکرد جو در خاک شور را مورد بررسی قرار داده و عملکرد دانه جو را بین ۵۹۰۰ تا ۷۵۰۰ کیلوگرم بر هکتار اعلام نموده‌اند. مورل و همکاران (Morell et al., 2011) طی یک مطالعه مزرعه‌ای دوساله در اسپانیا با بررسی اثر خاک‌ورزی و سطوح مختلف کود ازت بر عملکرد جو، مقدار این عامل را بین ۳۱۰ تا ۴۴۰۰ کیلوگرم بر هکتار گزارش نموده‌اند.

تحلیل تغییرات عملکرد، آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید جو

برای بررسی تغییرات عملکرد، آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید جو در استان‌های منتخب شامل خوزستان، آذربایجان شرقی، اردبیل، خراسان شمالی، فارس، خراسان رضوی، تهران، سمنان، مرکزی، اصفهان، همدان و قزوین از تحلیل واریانس استفاده گردید. تحلیل نشان داد تفاوت عملکرد محصول، آب آبیاری، آب کاربردی و بهره‌وری آب در استان‌های یادشده در سطح احتمال کمتر از یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در سطح احتمال موردقبول، میانگین عملکرد جو در استان‌های کشور مقایسه گردید. بر مبنای میانگین عملکرد محصول می‌توان استان‌های کشور را به چهار خوشه تقسیم نمود. در خوشه اول عملکرد محصول در استان‌های خوزستان (۲۱۴۹ کیلوگرم در هکتار)، آذربایجان شرقی (۲۵۳۹ کیلوگرم در هکتار) و اردبیل (۲۹۷۱ کیلوگرم در هکتار)، در خوشه دوم عملکرد در استان‌های خراسان شمالی (۳۴۵۳ کیلوگرم در هکتار)، فارس (۳۷۴۴ کیلوگرم در هکتار)، خراسان رضوی (۳۸۰۵ کیلوگرم در هکتار) و تهران (۴۰۹۷ کیلوگرم در هکتار)، در خوشه سوم عملکرد در استان‌های سمنان (۴۲۰۰ کیلوگرم در هکتار)، مرکزی (۴۴۴۶ کیلوگرم در هکتار)، اصفهان (۴۸۰۰ کیلوگرم در هکتار)، و در خوشه چهارم عملکرد در استان‌های همدان (۵۲۶۷ کیلوگرم در هکتار) و قزوین (۵۷۸۰ کیلوگرم در هکتار) قرار داشت (جدول ۴). بنابراین، حداقل و حداکثر عملکرد جو از استان‌های خوزستان و قزوین به دست آمد. برای محاسبه میانگین وزنی کشوری، میانگین عملکرد جو در هر استان در سطح زیرکشت جو در همان استان ضرب شده و حاصل جمع به دست آمده از کلیه استان‌ها بر سطح زیرکشت کل، تقسیم شده است. دامنه تغییرات مقادیر عملکرد جو در مزارع مختلف هر استان و نیز کل

جدول ۳- تحلیل واریانس عملکرد، آب آبیاری، آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید جو

Table 3- Analysis of variance for yield, irrigation water, applied water and water productivity in barley production

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	نسبت F	مقدار P
Source of variations	Sum of squares of	Degrees of freedom	Mean of squares	F-ratio	P-value
تحلیل واریانس عملکرد محصول جو Analysis of variance for yield					
بین استان‌ها Between Provinces	2.6 E7	11	2.4 E7	22.6	≤0.01
درون استان‌ها Within Provinces	2.8 E8	271	1.1 E6		
کل کشور Total	5.4 E8	282			
تحلیل واریانس آب آبیاری در تولید جو Analysis of variance for irrigation water					
بین استان‌ها Between Provinces	2.6 E8	11	2.4 E7	15.6	≤0.01
درون استان‌ها Within Provinces	4.4 E8	284	1.5 E6		
کل کشور Total	7.0 E8	295			
تحلیل واریانس آب کاربردی در تولید جو Analysis of variance for applied water					
بین استان‌ها Between Provinces	2.0 E8	11	1.8 E7	11.2	≤0.01
درون استان‌ها Within Provinces	4.5 E8	284	1.6 E6		
کل کشور Total	6.5 E8	295			
تحلیل واریانس بهره‌وری آب در تولید جو Analysis of variance for water productivity					
بین استان‌ها Between Provinces	16.2	11	1.48	17.3	≤0.01
درون استان‌ها Within Provinces	22.8	267	0.09		
کل کشور Total	39.0	278			

متر مکعب در هکتار)، در خوشه چهارم حجم آب آبیاری در استان‌های تهران (۵۸۹۰ متر مکعب در هکتار)، اصفهان (۵۹۷۲ متر مکعب در هکتار)، سمنان (۵۹۹۲ متر مکعب در هکتار)، مرکزی (۶۰۴۴ متر مکعب در هکتار) قرار داشت. حداقل و حداکثر حجم آب آبیاری داده شده به مزارع جو در استان‌های خراسان شمالی و مرکزی به دست آمد. به نظر می‌رسد نیازآبی گیاه، مقدار آب مورد دسترس کشاورز، مدیریت آبیاری، اقلیم منطقه، نوع سامانه آبیاری، مقدار بارش، راندمان آبیاری و رقم گیاه از عوامل مهم در تغییرات حجم آب مصرفی مزارع مختلف، باشند. نقدیزادگان و همکاران (Naghdyzadegan et al., 2016) مقدار

میانگین حجم آب آبیاری جو در استان‌های کشور در سطح احتمال موردقبول، مقایسه گردید. بر مبنای میانگین آب آبیاری، می‌توان مزارع جو در استان‌های کشور را به چهار خوشه تقسیم نمود. در خوشه اول حجم آب آبیاری در استان خراسان شمالی (۲۶۰۲ متر مکعب در هکتار)، در خوشه دوم حجم آب آبیاری در استان‌های اردبیل (۳۷۴۷ متر مکعب در هکتار)، فارس (۳۷۹۴ متر مکعب در هکتار)، خوزستان (۴۰۷۱ متر مکعب در هکتار) و آذربایجان شرقی (۴۱۸۴ متر مکعب در هکتار)، در خوشه سوم حجم آب آبیاری در استان‌های همدان (۴۴۹۱ متر مکعب در هکتار)، قزوین (۵۱۶۸ متر مکعب در هکتار) و خراسان رضوی (۵۲۲۷

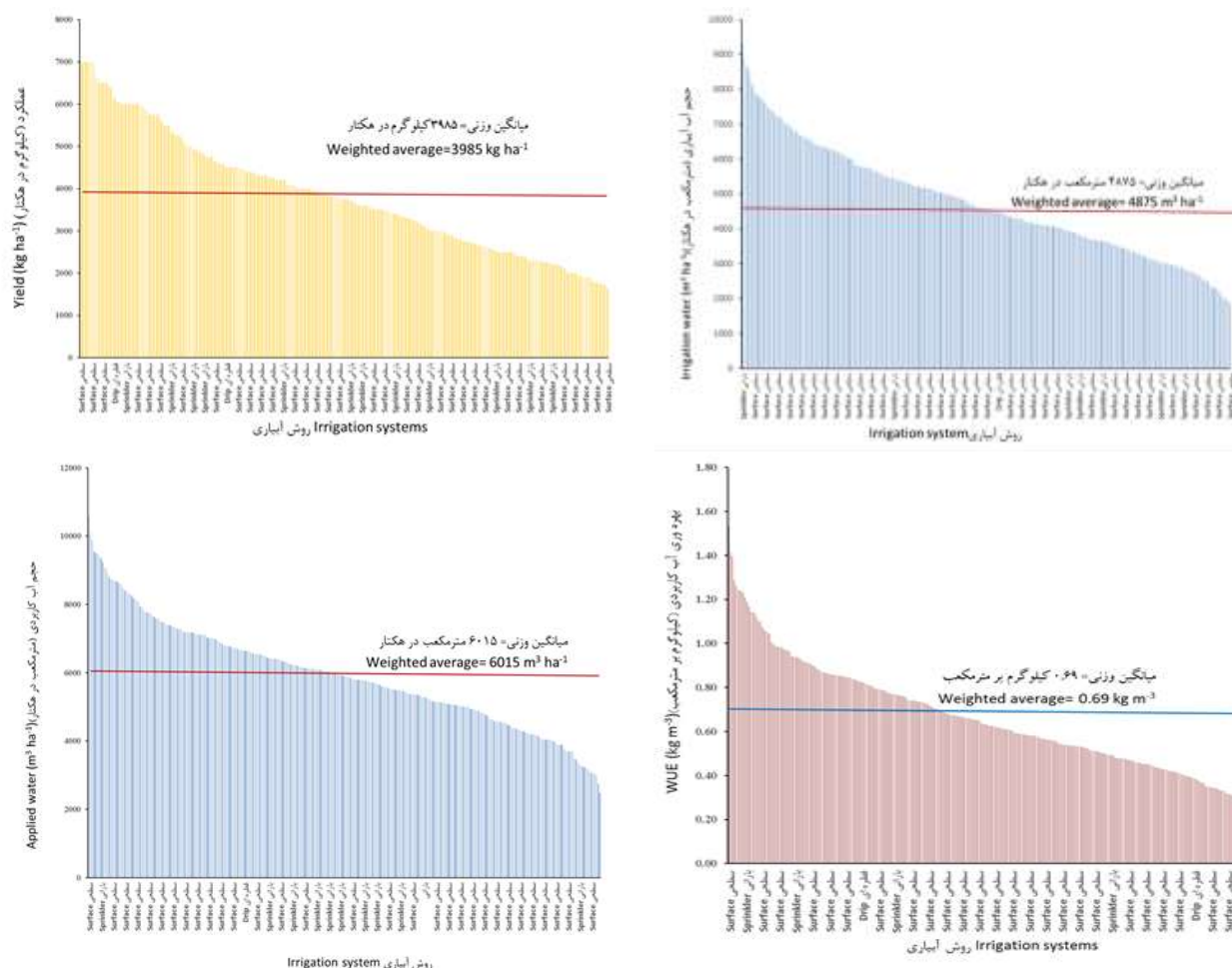
آن، دامنه تغییرات حجم آب آبیاری بین ۱۸۸۳ تا ۹۳۰۰ متر مکعب در هکتار است. همچنین میانگین وزنی آب آبیاری جو در مزرعه‌های منتخب برابر ۴۸۷۵ متر مکعب در هکتار به‌دست آمد. بر اساس نتایج به دست آمده، حدود ۵۶ درصد مزارع منتخب کشور حجم آب آبیاری کمتر از این مقدار داشتند. همچنین حجم آب آبیاری در مزرعه‌های منتخب در سه روش آبیاری مطابق شکل ۱ مورد مقایسه قرار گرفته است. از مجموع ۲۹۶ مزرعه انتخاب شده، ۲۲۵ مزرعه تحت سامانه آبیاری سطحی (حدود ۷۶ درصد)، ۶۲ مزرعه تحت سامانه آبیاری بارانی (حدود ۲۱ درصد) و فقط ۹ مزرعه به روش آبیاری قطره‌ای (حدود ۳ درصد) بودند که میانگین حجم آب آبیاری با سامانه‌های سطحی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر ۴۷۶۰، ۴۶۵۵ و ۵۲۸۰ متر مکعب در هکتار به دست آمد. بالاتر بودن حجم آب آبیاری جو در روش قطره‌ای را می‌توان به مصرف آب بیش از نیاز در آبیاری نوبت اول (خاکاب) و محدودیت زارعین در تغییر دور و زمان آبیاری نسبت داد.

مصرف آب آبیاری در تیمارهای تأمین ۱۰۰٪ نیاز آبی در سال اول و دوم برابر ۴۴۰۰ و ۴۸۰۰ مترمکعب در هکتار تعیین نموده است. پیراسته و همکاران (Pirasteh-Anosheh *et al.*, 2017) میانگین آب مصرفی توسط گیاه جو در کرت‌های شاهد (با شوری آب آبیاری ۲ دسی‌زیمنس بر متر) معادل ۷۳۰۰ متر مکعب در هکتار و در کرت‌های شور (با شوری آب ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) برابر با ۶۲۰۰ متر مکعب در هکتار گزارش نموده است. اکبری و جاسمی (Akbari and Jasemi, 2008) میانگین حجم آب آبیاری جو در روش قطره‌ای را برابر با ۳۴۰۷ متر مکعب در هکتار اعلام نموده‌اند. شریف و عبدالمحسن (Shrief and Abd El-Mohsen, 2014) میزان آب مصرفی جو در منطقه‌ای در لیبی را برای شرایط آبیاری کامل معادل ۸۷۸۶ متر مکعب در هکتار گزارش نموده‌اند. پاردو و همکاران (Pardo *et al.*, 2020) میزان آب آبیاری در تولید جو در اسپانیا را بین ۱۷۵۰ تا ۳۲۹۰ متر مکعب در هکتار گزارش نموده‌اند. تغییرات حجم آب آبیاری در مزرعه‌های منتخب جو در تمام استان‌های مورد مطالعه سطح کشور در شکل ۱ ارائه شده‌است که در

جدول ۴- میانگین عملکرد، آب آبیاری، آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید جو در استان‌های کشور

Table 4- Average yield, irrigation water, applied water and water productivity in barley production in the provinces of the Iran

ردیف No	استان Province	عملکرد Yield (kg ha ⁻¹)	آب آبیاری Irrigation water (m ³ ha ⁻¹)	آب کاربردی Applied water (m ³ ha ⁻¹)	بهره‌وری آب Water productivity (kg m ⁻³)
1	خوزستان Khuzestan	2149 ^a	4071 ^{bc}	5371 ^{bc}	0.56 ^a
2	آذربایجان شرقی East Azarbaijan	2539 ^{ab}	4184 ^{bc}	5662 ^{bcd}	0.61 ^{ab}
3	اردبیل Ardabil	2971 ^{bc}	3747 ^b	4785 ^b	0.84 ^{cd}
4	خراسان شمالی North Khorasan	۳۴۵۳ ^{cd}	2602 ^a	3602 ^a	1.31 ^g
5	فارس Fars	3744 ^d	3794 ^b	5236 ^b	1.02 ^{ef}
6	خراسان رضوی Khorasan Razavi	3805 ^d	5227 ^e	6212 ^{cde}	0.82 ^{cd}
7	تهران Tehran	4097 ^{de}	5890 ^{fg}	7024 ^g	0.70 ^{abc}
8	سمنان Semnan	4200 ^{def}	5992 ^{fg}	6533 ^{fg}	0.79 ^{bcd}
9	مرکزی Markazi	4446 ^{ef}	6044 ^g	6561 ^{fg}	0.75 ^{bcd}
10	اصفهان Isfahan	4800 ^{fg}	5972 ^{fg}	6899 ^g	0.88 ^{de}
11	همدان Hamadan	5267 ^{gh}	4491 ^{cd}	6387 ^{ef}	1.37 ^g
12	قزوین Ghazvin	5780 ^h	5168 ^{def}	6588 ^{fg}	1.19 ^{fg}
میانگین وزنی Weighted mean		3985	4875	6015	0.90



شکل ۱- تغییرات عملکرد، آب آبیاری، آب کاربردی و بهره‌وری آب در تولید جو در استان‌های کشور

Figure 1- changes in yield, irrigation water, applied water and water productivity in barley production in the provinces of the Iran

وزنی حجم آب آبیاری داده شده (۴۸۷۵) و حجم آب کاربردی (۶۰۱۵) که همان مقدار بارش مؤثر است، برابر با ۱۱۳۹ متر مکعب در هکتار معادل حدود ۱۱۴ میلی‌متر باران مؤثر است. بیشترین میزان بارش مؤثر در کشت محصول جو مربوط به استان همدان (۱۹۰ میلی‌متر) و کمترین میزان بارش مؤثر در استان مرکزی (۵۲ میلی‌متر) اتفاق افتاده است. نتایج نشان داد دامنه تغییرات مقادیر آب آبیاری جو در مزرعه‌های مختلف کشور بسیار متفاوت و از حدود ۱۰۵۷۰ تا ۲۴۹۰ مترمکعب در هکتار متغیر است. میانگین آب آبیاری کاربردی جو در کل مزارع منتخب در شکل ۱ ارائه شده است. بر این اساس میانگین وزنی آب آبیاری کاربردی جو در مزارع کشور ۶۰۱۵ و در مزارع با روش آبیاری سطحی ۶۰۲۵ مزارع با روش آبیاری بارانی ۵۵۵۰ و روش آبیاری قطره‌ای ۶۷۶۵ متر مکعب در هکتار است.

میانگین بهره‌وری آب آبیاری در تولید جو در استان‌های کشور در سطح احتمال ۵ درصد، مقایسه گردید. بر مبنای میانگین بهره‌وری آب

در سطح احتمال موردقبول، میانگین حجم آب کاربردی جو در استان‌های کشور مقایسه گردید. بر مبنای میانگین آب کاربردی، می‌توان مزارع جو در استان‌های کشور را به سه خوشه تقسیم نمود (جدول ۴). در خوشه اول حجم آب کاربردی در استان خراسان شمالی (۳۶۰۲ متر مکعب در هکتار)، در خوشه دوم حجم آب کاربردی در استان اردبیل (۴۷۸۵ متر مکعب در هکتار)، فارس (۵۲۳۶ متر مکعب در هکتار)، خوزستان (۵۳۷۱ متر مکعب در هکتار)، آذربایجان شرقی (۵۶۶۲ مترمکعب در هکتار)، در خوشه سوم حجم آب کاربردی در استان‌های خراسان رضوی (۶۲۱۲ متر مکعب در هکتار)، همدان (۶۳۸۷ متر مکعب در هکتار)، سمنان (۶۵۳۳ متر مکعب در هکتار)، مرکزی (۶۵۶۱ متر مکعب در هکتار)، قزوین (۶۵۸۸ متر مکعب در هکتار)، اصفهان (۶۸۹۹ متر مکعب در هکتار) و تهران (۷۰۲۴ متر مکعب در هکتار) قرار داشت. بنابراین، حداقل و حداکثر حجم آب کاربردی جو از مزارع استان‌های خراسان شمالی و تهران به عمل آمد. تفاوت میانگین

آبیاری، می‌توان استان‌های کشور را به چهار خوشه تقسیم نمود. در خوشه اول بهره‌وری آب آبیاری در استان‌های خوزستان ($0/56$ کیلوگرم بر متر مکعب)، آذربایجان شرقی ($0/61$ کیلوگرم بر متر مکعب) و تهران ($0/70$ کیلوگرم بر متر مکعب)، در خوشه دوم بهره‌وری آب آبیاری در استان‌های مرکزی ($0/75$ کیلوگرم بر متر مکعب)، سمنان ($0/79$ کیلوگرم بر متر مکعب)، خراسان رضوی ($0/82$ کیلوگرم بر متر مکعب)، اردبیل ($0/84$ کیلوگرم بر متر مکعب) و اصفهان ($0/88$ کیلوگرم بر متر مکعب)، در خوشه سوم بهره‌وری آب آبیاری در استان‌های فارس ($1/02$ کیلوگرم بر متر مکعب) و قزوین ($1/19$ کیلوگرم بر متر مکعب)، در خوشه چهارم بهره‌وری آب آبیاری در استان‌های خراسان شمالی ($1/31$ کیلوگرم بر متر مکعب) و همدان ($1/37$ کیلوگرم بر متر مکعب) قرار داشت. بنابراین حداقل و حداکثر بهره‌وری آب در تولید جو از استان‌های خوزستان و همدان به‌دست آمد (جدول ۴). حجم آب آبیاری و عملکرد محصول از مؤلفه‌های اساسی در بهره‌وری آب محسوب می‌شوند. بنابراین عوامل مؤثر در آب مصرفی و تشکیل عملکرد، می‌تواند مقادیر بهره‌وری آب را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج نشان داد دامنه تغییرات مقادیر بهره‌وری آب آبیاری جو در مزرعه‌های مختلف کشور بسیار متفاوت و از حدود $0/28$ تا $2/29$ کیلوگرم بر مترمکعب متغیر است. باین‌حال میانگین بهره‌وری آب محصول جو در کل مزارع مورد بررسی در استان‌های منتخب کشور در شکل ۱ ارائه شده‌اند. بر این اساس میانگین وزنی بهره‌وری آب جو در مزارع کشور $0/9$ و در مزرعه‌های با روش آبیاری سطحی $0/85$ ، با روش بارانی $1/01$ و با روش قطره‌ای $1/00$ کیلوگرم بر متر مکعب است.

نقدیادگان و همکاران (Naghdyzadegan et al., 2016) بیشترین بهره‌وری آب در تولید دانه جو از تیمار تأمین 75% نیاز آبی را برای دو سال متوالی به ترتیب $1/34$ و $1/27$ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش نموده‌اند. پیراسته و همکاران (Pirasteh-Anosheh et al., 2017) در تحقیقی به بررسی تأثیر شوری آب آبیاری بر بهره‌وری آب در تولید جو در مرکز ملی تحقیقات شوری یزد پرداختند. میانگین دوساله بهره‌وری آب محصول جو با شوری آب آبیاری 2 دسی‌زیمنس بر متر برابر $0/88$ کیلوگرم بر متر مکعب و با شوری آب 12 دسی‌زیمنس بر متر $0/64$ به دست آمد. غلامی و همکاران (Gholami et al., 2016) گزارش نموده‌اند که تغییرات بهره‌وری آب آبیاری در روش‌های آبیاری بارانی برای محصول جو، از $0/75$ تا $2/5$ کیلوگرم بر متر مکعب و میزان بهره‌وری آب آبیاری در آبیاری سطحی از $0/43$ تا $1/42$ کیلوگرم بر متر مکعب بود. اکبری و جاسمی (Akbari and Jasemi, 2008) در تحقیقی، بهره‌وری آب در لاین‌های امیدبخش جو متحمل به خشکی آخر فصل با آبیاری قطره‌ای را بررسی نموده و در آبیاری کامل تحت روش قطره‌ای، میانگین بهره‌وری آب را $1/83$ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش نموده‌اند. شریف و عبدالمحسن (Shrief and Abd El-

Morell et al., 2011) تغییرات بهره‌وری آب آبیاری در شرایط مختلف خاک ورزی و سطوح مختلف کود ازت در مزارع جو در اقلیم نیمه‌خشک اسپانیا از $0/12$ تا $0/97$ کیلوگرم بر متر مکعب بود.

آنچه از بررسی حاضر می‌توان نتیجه گرفت، این است که آب تنها عامل و نهاده تأثیرگذار بر عملکرد محصول نیست و عوامل متعددی در این مهم دخیل هستند. به عبارتی می‌توان عملکرد محصول را حتی با حجم آب آبیاری کمتر و مدیریت سایر نهاده‌ها و شرایط فنی و مدیریتی مزرعه افزایش داد. این موضوع در شرایط کم‌آبی کشور که اغلب متولیان و بهره‌برداران برای افزایش عملکرد بیشتر به مدیریت آب تمرکز می‌نمایند، دارای اهمیت زیادی است. در مجموع می‌توان گفت عملکرد محصول جو علاوه بر آب، تابع عوامل مختلف دیگری است که توجه به هر یک از آن‌ها می‌تواند نقش قابل توجهی در بهبود عملکرد و افزایش بهره‌وری آب داشته باشد.

نتیجه‌گیری

در این پروژه حجم آب آبیاری، عملکرد و بهره‌وری آب در تولید جو در قطب‌های تولید این محصول اندازه‌گیری و تحلیل شد. مزارع مورد مطالعه تحت مدیریت بهره‌برداران در استان‌های خوزستان، آذربایجان شرقی، اردبیل، خراسان شمالی، فارس، خراسان رضوی، تهران، سمنان، مرکزی، اصفهان، همدان و قزوین انتخاب شدند. بر اساس مجموعه بررسی‌ها و نتایج حاصل از این پژوهش نتیجه‌گیری‌های زیر قابل استناد است:

۱- با توجه به ماهیت این پژوهش و آنالیز آماری انجام شده تعداد

پیشنهادهای

۱. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که حجم آب آبیاری مزارع جو در استان‌های منتخب متفاوت است و بسته به روش آبیاری، تعداد نوبت‌های آبیاری، تاریخ کاشت، زمان قطع آبیاری در انتهای فصل، میزان حقاچه و منابع آب در دسترس و نحوه مدیریت مزرعه دارد. با توجه به اینکه اکثر مزارع به‌صورت حقاچه‌ای آب دریافت می‌کنند اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش مؤثر توجه ویژه‌ای نمی‌شود و میزان دبی دریافتی بیشترین تأثیر را در مصرف آب دارد. لذا گیاه در مقاطعی آب بیشتری دریافت و در مقاطعی آب کمتر از حد موردنیاز دریافت می‌کند و این باعث کاهش بهره‌وری آب می‌گردد. پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب، تحویل آب به مزارع در طول فصل مدیریت شود و حقاچه متناسب با نیاز آبی به آن‌ها تحویل داده شود. در این ارتباط آموزش به بهره‌برداران و ترویج یافته‌های علمی نقش کلیدی داشته و بسیار تأثیرگذار هستند.

۲. استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری با توجه به شرایط مزرعه و با اصول صحیح طراحی و بهره‌برداری و استفاده از روش‌های آبیاری سطحی با اعمال راهکارهای بهبود این روش (مانند آبیاری یک‌درمیان جویچه‌ها، ایجاد موج و کاهش دبی جریان)، به‌منظور کاهش تلفات آب و افزایش بهره‌وری در مزارع جو کشور پیشنهاد می‌گردد.

۳. در راستای بهبود عملکرد و تولید اقتصادی جو، ایجاد زیرساخت‌های لازم برای به‌کارگیری سامانه‌های نوین آبیاری امری مهم و ضروری است. اما باید توجه داشت که آب تنها یکی از چندین نهاده موردنیاز و مؤثر در تولید بهینه و اقتصادی جو است و در کنار آن باید به استفاده بهینه از سایر نهاده‌ها شامل: بذر، کود، سم، تجهیزات و ادوات، نیروی انسانی آموزش‌دیده توجه جدی بشود.

سپاسگزاری

این پژوهش با همکاری و حمایت مادی و معنوی معاونت آب‌و‌خاک وزارت جهاد کشاورزی به ثمر رسیده است. همچنین در اجرای این پژوهش همکاران گران‌قدری از سازمان‌های جهاد کشاورزی، مدیریت‌های جهاد شهرستان و مراکز خدمات جهاد کشاورزی استان‌ها، همچنین همکاران بخش‌های تحقیقات فنی و مهندسی مراکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان‌ها مشارکت و همکاری مؤثری داشته‌اند. بدین‌وسیله نویسندگان و مجریان پروژه مراتب سپاس و قدردانی خود را از زحمات و همکاری‌های این عزیزان اعلام می‌دارند.

مزارع انتخابی برای اندازه‌گیری‌های حجم آب آبیاری (۲۹۶ مزرعه در ۱۲ استان) و عملکرد جو (۲۸۳ مزرعه در ۱۲ استان) به‌مراتب بیشتر از تعداد اندازه‌گیری‌های لازم برای حجم آب آبیاری (۴۱ داده) و عملکرد (۵۰ داده) برای تعمیم نتایج به کل کشور بود. بنابراین داده‌های این تحقیق از نظر شاخص کفایت داده‌ها قابل اعتماد و مورد تأیید است.

۲- اندازه‌گیری میدانی حجم آب آبیاری، عملکرد و برآورد شاخص بهره‌وری آب و بهره‌وری آب آبیاری و بارش مؤثر در تولید جو در استان‌های منتخب نشان داد تفاوت حجم آب آبیاری، عملکرد و شاخص‌های بهره‌وری آب در استان‌های یادشده معنی‌دار بود.

۳- متوسط حجم آب آبیاری در استان‌های مورد مطالعه شامل خوزستان، آذربایجان شرقی، اردبیل، خراسان شمالی، فارس، خراسان رضوی، تهران، سمنان، مرکزی، اصفهان، همدان و قزوین به ترتیب برابر با ۴۰۷۱، ۴۱۸۴، ۳۷۴۷، ۲۶۰۲، ۳۷۹۴، ۵۲۲۷، ۵۸۹۰، ۵۹۹۲، ۶۰۴۴، ۵۹۷۲، ۴۴۹۱ و ۵۱۶۸ متر مکعب در هکتار تعیین شد.

۴- میانگین حجم آب آبیاری جو بر اساس کل مزارع منتخب برابر ۴۸۷۵ متر مکعب در هکتار و به تفکیک سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر ۴۷۶۰، ۴۶۵۵ و ۵۲۸۰ متر مکعب در هکتار تعیین شد. بدین‌ترتیب ملاحظه می‌شود تغییر روش آبیاری از سطحی به بارانی، موجب کاهش حدود ۲ درصد و از سطحی به قطره‌ای موجب افزایش حدود ۱۱ درصد در مصرف آب مزارع جو شده است.

۵- بر اساس تحلیل‌های انجام شده، میانگین وزنی عملکرد جو در مزارع کشور ۳۸۹۵ کیلوگرم در هکتار و در مزارع با روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر با ۳۷۳۵، ۴۲۲۰ و ۴۸۱۵ کیلوگرم در هکتار بود. بنابراین، با تغییر روش آبیاری از سطحی به بارانی حدود ۱۳ درصد و از سطحی به قطره‌ای حدود ۲۹ درصد عملکرد افزایش یافته است.

۸- دامنه تغییرات مقادیر بهره‌وری آب آبیاری جو در مزارع مختلف کشور بسیار متفاوت و از حدود ۰/۲۸ تا ۲/۲۹ کیلوگرم بر متر مکعب متغیر بود. باین‌حال میانگین بهره‌وری آب آبیاری محصول جو در کل مزارع کشور ۰/۹۰ و در مزارع با روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب ۰/۸۵، ۱/۰۱ و ۱/۰ کیلوگرم بر متر مکعب بود. به‌عبارتی با تغییر روش آبیاری از سطحی به بارانی و قطره‌ای حدود ۱۸ درصد بهره‌وری آب افزایش یافته است.

۹- درنهایت میانگین وزنی عملکرد جو ۳۹۸۵ کیلوگرم در هکتار، حجم آب آبیاری و حجم آب آبیاری + بارش مؤثر سال جاری به‌ترتیب ۴۸۷۵ و ۶۰۱۵ متر مکعب در هکتار به دست آمد. بهره‌وری آب آبیاری ۰/۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب، به دست آمد.

منابع

- Ababaei, B., & RamezaniEtedali, H. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural Water Management*, 179, 401–411. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.016>

2. Abd El-Wahed, M.H., Medici, M., & Lorenzini, G. (2016). Sprinkler irrigation uniformity: Impact on the crop yield and water use efficiency. *Journal of Engineering Thermophysics*, 25(1), 117-125.
3. Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Mohammadnia Afrozi, Sh., Esfandiaripour, A., & Abbas Taghani, R. (2021). *Agricultural statistics for 2019-2020*. Ministry of Jihad-e- Agriculture, Planning and Economic Deputy, Information and Communication Technology Center, Volume 1: Crops, page 20.
4. Ahmadi, K., Ebadzadeh, H.R., Hatami, F., Abdshah, H., & Kazemian, A. (2019). *Agricultural statistics for 2018-2019*. Volume 1: Crops. Ministry of Jihad-e- Agriculture, Planning and Economic Deputy, Information and Communication Technology Center,, pp. 7- 20
5. Akar, T., Avci, M., & Dusunceli, F. (2004). *BARLEY: Post-Harvest Operations*. The Central Research Institute for Field Crop, Ankara, Turkey.
6. Akbari, M., & Jasemi, Sh. (2008). *Determining the efficiency of water consumption in promising lines of barley tolerant to drought at the end of the season using the drip irrigation method*. The final report of the research project, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj.
7. Alikhasi, M., Kouchakzadeh, M., Tavakoli, A., & Tahmasebi, R. (2019). Evaluation of improving water productivity using rain water harvesting system and supplemental irrigation on barley. *Iranian Water Researches Journal*, 13(2), 81-90.
8. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109. ISBN 92-5-104219-5
9. Ghasemi-Aghbolaghi, S., & Sepaskhah, A.R. (2018). Barley (*Hordeum vulgare* L.) response to partial root drying irrigation, planting method and nitrogen application rates. *International Journal of Plant Production*, 12(1), 13-24. <https://doi.org/10.1007/s42106-017-0002-y>
10. Gholami, Z., Ebrahimian, H., & Noori, H. (2016). Investigation of irrigation water productivity in sprinkler and surface irrigation systems (case study: Qazvin plain). *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 135-146. <https://doi.org/10.22055/jise.2016.12350>
11. Hobbs, E.H., & Krogman, K.K. (1973). Evapotranspiration of wheat, oats and barley. *Canadian Journal of Plant Science*, 54z, 23-27. <https://doi.org/10.4141/cjps74-004>
12. Hussain, G., & Al-Jaloud, A.A. (1998). Effect of irrigation and nitrogen on yield, yield components and water use efficiency of barley in Saudi Arabia. *Agricultural Water Management*, 36(1), 55-70. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(97\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(97)00045-0)
13. Jenab, M., & Nazari, B. (2019). The study of water productivity and yield gap of wheat, barley and maize in Qazvin province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(6), 1405-1417. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.253566.667865>
14. Katerji, N., Mastroianni, M., Van Hoorn, J.W., Lahmer, F.Z., Hamdy, A., & Oweis, T. (2009). Durum wheat and barley productivity in saline-drought environments. *Europ. Journal of Agronomy*, 31(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2009.01.003>
15. Morell, F.J., Lampurlanés, J., Álvaro-Fuentes, J., & Cantero-Martínez, C. (2011). Yield and water use efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research*, 117, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.09.002>
16. Naghdizadegan, M., Razzaghi, F., & Zand-Parsa, Sh. (2016). Barley water and nitrogen requirement to increase its sustainable production in semi-arid region. 2nd World Irrigation Forum, Chiang Mai, Thailand.
17. Pardo, J.J., Martínez-Romero, A., Lélis, B.C., Tarjuelo, J.M., & Domínguez, A. (2020). Effect of the optimized regulated deficit irrigation methodology on water use in barley under semiarid conditions. *Agricultural Water Management*, 228, 105925. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105925>
18. Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., Kazemini, S.A., & Dehghany, F. (2017). Effect of irrigation water salinity on soil moisture and salinity during growing season, barley yield, and its water productivity. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(2), 155-166. <https://doi.org/10.22092/ijsr.2017.113097>
19. Ramezani-Etedali, H., & Ababaei, B. (2016). Estimation of water footprint components in barley production at national and provincial scales. *Iranian Journal of Water Research in Agriculture*, 30(3), 431-443. <https://doi.org/10.22092/jwra.2016.107161>
20. Shrief, A.S., & Abd El-Mohsen, A.A. (2014). Effect of different irrigation regimes on grain and protein yields and water use efficiency of barley. *Scientia Agriculturae*, 8(3), 140-147. <https://doi.org/10.15192/PSCP.SA.2014.4.3.140147>
21. Sohrabi, Sh. (2015). Barley cultivation program for 2015-2016 for Isfahan Province. Management of Agriculture Affairs, Agricultural Organization of Isfahan Province.
22. Zohary, D., & Hopf, M. (2000). *Domestication of plants in the old world: The origin and spread of cultivated plants in west Asia, Europe, and the Nile Valley*. Oxford University Press. pp. 59-69. ISBN 978-0-19-850357-6



Research Article

Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 673-683

Evaluation of Elasticity-Based Methods in Estimating Contribution of Climate Change and Human Activities on Rivers' Discharge (Case Study: Gharehsoo River)

H. Norouzzadeh¹ - M. Hasanpour Kashani^{2*} - A. Rasoulzadeh³

1, 2 and 3- Master's Degree, Assistant Professor and Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author: m.hkashani@uma.ac.ir)

Received: 03-07-2023
Revised: 15-10-2023
Accepted: 16-10-2023
Available Online: 21-10-2023

How to cite this article:

Norouzzadeh, H., Hasanpour Kashani, M., & Rasoulzadeh, A. (2023). Evaluation of Elasticity-Based Methods in Estimating Contribution of Climate Change and Human Activities on Rivers' Discharge (Case Study: Gharehsoo River). *Journal of Water and Soil*, 37(5), 673-683. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83229.1305>

Introduction

Climatic changes and human activities are among the important factors that affect the flow of rivers and it is very important to determine the contribution of these factors in order to better manage water resources. In recent years, there have been major changes in the watersheds, and the amount of runoff and river flow has decreased, or in some cases, the flow has increased due to the occurrence of floods. The issue of reducing the amount of runoff, especially in the arid and semi-arid regions of Iran, is one of the basic challenges related to the management of water resources. Hydrological changes primarily result from a combination of natural or climatic factors, including precipitation levels, air temperature, and overall warming of the Earth. Additionally, human activities, such as the construction of dams, creation of reservoirs, urbanization expansion, and indiscriminate harvesting, play a significant role. It is important to note that these factors are interconnected, and alterations in one can impact the others. The increase of greenhouse gases and climate change has caused a change in the hydrological cycle and the amount of runoff in the watersheds and has increased the number of climatic extreme events. The main purpose of this study is to determine the contribution of each of these factors on the discharge changes of the Gharehsoo River, one of the most important rivers of Ardabil province, using elasticity-based methods (non-parametric and Bodiko-based methods).

Materials and Methods

In this research, firstly, in order to determine the point of change in the amount of river runoff and to divide the base and change period, Petit's test was used during the statistical period of 1984-2019. This test was done using Xlstat software. According to the results of this test, there was a change in the annual flow time series in 1997, which was considered as the base period from 1984 to 1997 and from 1998 to 2019 as the period of changes. Then, the contribution of each of these factors was determined using elasticity-based methods.

Results and Discussion

In the elasticity-oriented method, the non-parametric method and the methods based on Bodiko's assumptions were used to calculate the elasticity coefficient. The results showed that in Samyan station, in the non-parametric method, the contribution of human activities is 88.26% and the contribution of climate change is 11.74%. The



©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.2023.83229.1305>

contribution of human activities and the contribution of climate change for the methods of Schreiber, Aldekap, Bodiko, Peek and Zhang, respectively 91.98 and 8.02, 90.02 and 9.97, 91.98 and 8.02, 90.80 and 9.20, 92.37 and 7.62 are estimated. In general, in the elasticity method, the contribution of human activities is 88.26 to 92.37 percent and the contribution of climate change is from 7.63 to 11.74 percent, depending on the non-parametric and Bodiko method. At the Dost-Beiglo station, employing the non-parametric method reveals that human activities account for 96.13% of the observed changes, while the remaining 3.87% is attributed to climate change. The contribution of human activities and the contribution of climate change for the methods of Schreiber, Eldekap, Bodiko, Pick and Zhang are 97.71 and 2.29, 97.42 and 2.58, 97.56 and 2.44, 97.48 and 2.52, 97.71 and 2.29 are estimated. In general, in the elasticity-oriented method, the contribution of human activities between 96.13 and 97.71 percent and the contribution of climate change from 2.29 to 3.87 percent, depending on the non-parametric and Boudico-oriented method, have been met.

Conclusion

In this research, different hydrometeorological data such as precipitation, evaporation and transpiration and monthly discharge from the Samyan and Dost Beiglo stations were used for the statistical period of 1982-2019. First, by using Pettitt's test, it was determined that the river flow rate has changed abruptly since 2016. Therefore, the entire statistical period was divided into two natural and change periods, and then, using elasticity-based methods, the contribution of human activities and the contribution of climate change were determined. According to the results obtained in both stations, the impact of human activities (more than 88%) on the basin's runoff is far more than climate change (less than 11%). Therefore, it seems necessary to prevent the effective human activities on reducing the river flow in solving and managing water problems in the basin.

Keywords: Climatic changes, Elasticity-based method, Human activities, Pettitt's test, Runoff flow

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۶۸۳-۶۷۳

ارزیابی کارایی روش‌های الاستیسیته محور در برآورد سهم تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در میزان دبی رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه قره‌سو)

هاجر نوروززاده^۱  - مهسا حسنیپورکاشانی^۲  - علی رسولزاده^۳ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴

چکیده

تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی از جمله عوامل مهمی هستند که بر جریان رودخانه تأثیر می‌گذارند. هدف این مطالعه، تعیین سهم هر کدام از عوامل تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تغییرات دبی رودخانه قره‌سو یکی از مهم‌ترین رودخانه‌های استان اردبیل در دو ایستگاه سامیان و دوست بیگلر با استفاده از روش‌های الاستیسیته محور (بودیکو محور و روش ناپارامتری) می‌باشد. در این تحقیق، ابتدا به‌منظور تعیین نقطه تغییر مقدار رواناب رودخانه و تقسیم‌بندی دوره پایه و تغییر از آزمون پتیت در طول دوره آماری ۱۳۶۱-۱۳۹۸ استفاده شد. این آزمون در نرم‌افزار Xlstat انجام شد. با توجه به نتایج این آزمون در سال ۱۳۷۶ یک تغییر در سری زمانی جریان سالانه رخ داد که از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۷۶ به‌عنوان دوره پایه و از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۸ به‌عنوان دوره تغییرات در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از روش‌های الاستیسیته محور سهم هر کدام از این عوامل تعیین گردید. نتایج نشان داد که در ایستگاه هیدرومتری سامیان سهم تغییرات اقلیمی برابر ۱۱/۷۴-۷/۶۳ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی برابر ۹۲/۳۷-۸۸/۲۶ درصد می‌باشد. در ایستگاه هیدرومتری دوست‌بیگلر نیز سهم تغییرات اقلیمی برابر ۳/۸۷-۲/۲۹ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی برابر ۹۷/۷۱-۹۶/۱۳ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل در هر دو ایستگاه، تأثیر فعالیت‌های انسانی (بیشتر از ۸۸ درصد) بر روی رواناب حوضه به مراتب بیشتر از تغییرات اقلیمی (کمتر از ۱۱ درصد) می‌باشد. بنابراین، جلوگیری از انجام فعالیت‌های انسانی مؤثر در کاهش دبی رودخانه، در حل و مدیریت مشکلات آبی حوضه ضروری بنظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: آزمون پتیت، تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی، روش الاستیسیته محور، رواناب

مقدمه

است. افزایش گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی موجب تغییر در چرخه هیدرولوژیک و مقدار رواناب در حوضه‌های آبریز شده و تعداد رویدادهای حدی اقلیمی را افزایش داده است (Sorokin & Mondello, 2017). اما مشاهدات در بیشتر مناطق در سراسر جهان نشان می‌دهد چرخه هیدرولوژیک علاوه بر تغییر اقلیم، تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیز قرار گرفته است (Huntingto, 2006). فعالیت‌های انسانی نظیر توسعه کشاورزی، توسعه شهرسازی، سدسازی و بهره‌برداری از مخازن، اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر چرخه هیدرولوژیک داشته و در نتیجه آن توزیع زمانی- مکانی منابع آب دچار

در سال‌های اخیر تغییرات عمده‌ای در حوضه‌های آبریز صورت گرفته و میزان رواناب و جریان رودخانه‌ها دچار کاهش شده و یا در برخی موارد به صورت وقوع سیلاب‌ها جریان افزایش یافته است (Hood, 2011). موضوع کاهش میزان رواناب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران یکی از چالش‌های اساسی در رابطه با مدیریت منابع آب می‌باشد و تغییرات هیدرولوژیکی به وجود آمده عمدتاً ناشی از عوامل طبیعی (اقلیمی) و انسانی بوده است (Yao et al., 2015). این عوامل مستقل از هم نیستند و هرگونه تغییر در آن‌ها بر یکدیگر نیز اثرگذار

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(*)- نویسنده مسئول (Email: m.hkashani@uma.ac.ir)

اصفهان و کیکالا در استان مازندران مورد بررسی قرار دادند. ایشان اعلام کردند اثرات خشکسالی ناشی از فعالیت‌های انسانی در هر دو حوضه بیشتر از تغییرات اقلیمی بوده است.

با توجه به مطالعات گسترده صورت گرفته در نقاط مختلف جهان در خصوص تعیین عوامل مؤثر در تغییر دبی رودخانه‌ها، در این تحقیق نیز به بررسی اثر عوامل یاد شده در میزان تغییرات رودخانه قره‌سو بعنوان یکی از مهمترین رودخانه‌های استان اردبیل پرداخته می‌شود. شایان ذکر است که استان اردبیل و حوضه آبریز رودخانه قره‌سو همانند بسیاری از نقاط دیگر جهان دچار تغییرات اقلیمی شده و نیز فعالیت‌های انسانی زیادی نظیر سدسازی، گسترش مناطق شهری و کشاورزی و ... در سطح استان و حوضه در طول سالیان انجام گرفته است.

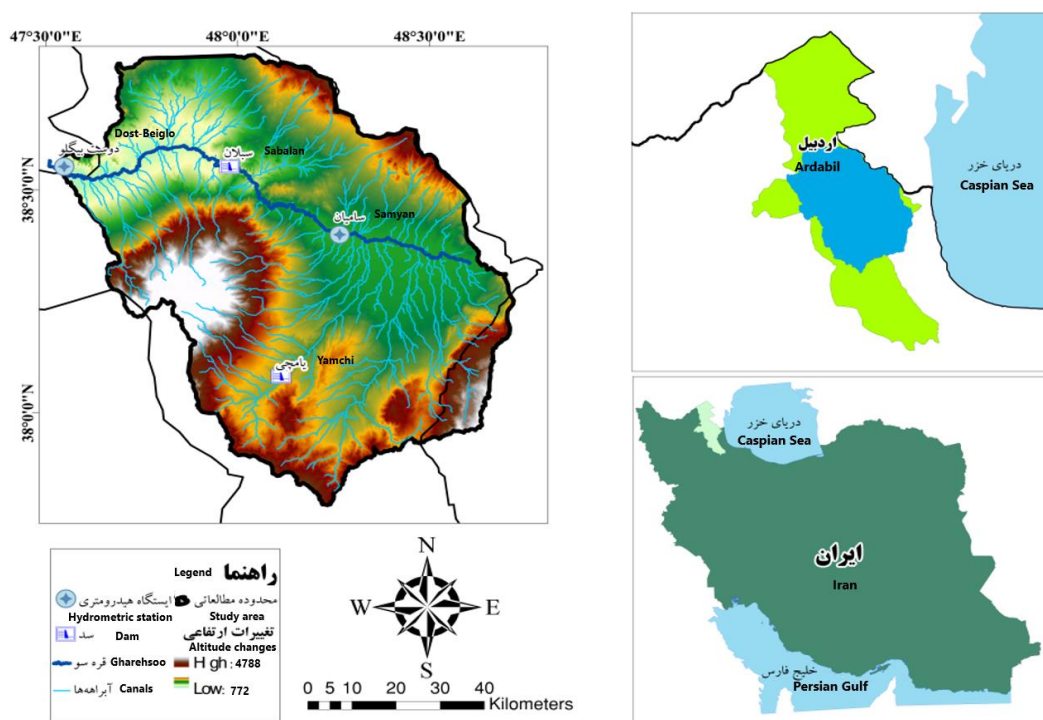
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه قره‌سو در مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 32'$ تا $41^{\circ} 41'$ طول شرقی و $47^{\circ} 37'$ تا $52^{\circ} 38'$ عرض شمالی و با مساحتی بالغ بر 4062 کیلومتر مربع در استان اردبیل واقع شده است. این رودخانه از ارتفاعات تالش سرچشمه گرفته و در مسیر خود ضمن عبور از دشت اردبیل، آب‌های جاری این منطقه از جمله بالیخلی چای را جمع‌آوری کرده و همراه با دره رود به رود مرزی ارس می‌ریزد. طول آبراهه اصلی 285 کیلومتر و با آبدهی سالانه 554 میلیون متر مکعب، پرآب‌ترین رودخانه داخلی استان اردبیل بشمار می‌رود. در این مطالعه، داده‌های بارش، دبی و تبخیر در مقیاس ماهانه مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری سامیان و ایستگاه دوست‌بیگلوی طی سال‌های 1361 تا 1398 از شرکت آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی استان اردبیل اخذ و استفاده شدند. در شکل ۱ موقعیت رودخانه قره‌سو و در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری مورد استفاده ارائه شده است. با توجه به شکل ۱ ملاحظه می‌شود که بر روی رودخانه قره‌سو، دو سد سیلان و یامچی قبل از ایستگاه دوست‌بیگلوی و سامیان به‌ترتیب در سال‌های 1385 و 1383 احداث و به بهره‌برداری رسیدند. شکل ۲ نقشه کاربری اراضی استان اردبیل را در سال‌های 1396 تا 1395 نشان می‌دهد که حاکی از افزایش اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی و پهنه‌های آبی و کاهش جنگل‌ها و مراتع در طول این سال‌ها و به‌عبارتی دیگر، انجام فعالیت‌های انسانی متنوع در سطح استان می‌باشد (*Kakehmami et al., 2021*). بنابراین، انتظار می‌رود فعالیت‌های انسانی تأثیر قابل توجهی بر میزان دبی رودخانه قره‌سو داشته باشند.

تغییر شده است (*Milly et al., 2005*). بنابراین، برای شناخت بهتر ارتباط بین اقلیم، هیدرولوژی و انسان‌ها، لازم است فعالیت‌های انسانی مؤثر بر رواناب نیز مورد بررسی قرار گیرد (*Rangecroft et al., 2016*).

مطالعات متعددی در رابطه با تغییرات جریان رودخانه‌ها توسط محققین صورت گرفته است. ما و همکاران (*Ma et al., 2008*) اثرات تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی را برای حوزه رودخانه‌ای در منطقه خشک در شمال غربی چین تحلیل و ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که تغییرات آب و هوایی (کاهش بارندگی) باعث کاهش بیش از 64 درصدی میانگین یک ساله جریان است و همچنین جریان این رودخانه به تغییرات بارش نسبت به تغییرات تبخیر و تعرق بسیار حساس است. ژائو و همکاران (*Zhao et al., 2014*) اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را بر روی جریان حوضه رودخانه Yellow در چین ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که به‌طور کلی فعالیت‌های انسانی نظیر پروژه‌های حفاظت از آب و خاک، بهره‌برداری از سدها و مخازن مصرف آب به عنوان عوامل حاکم بر کاهش چشمگیر جریان سالانه در 6 دهه گذشته شناخته می‌شود. گائو و همکاران (*Gao et al., 2016*) با استفاده از روش الاستیسیته پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌های مختلف Loess Plateau را به تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بین سال‌های 1961 تا 2009 تعیین کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در 10 حوضه از 15 حوضه مورد بررسی، سهم فعالیت‌های انسانی بیش از 60 درصد می‌باشد. وو و همکاران (*Wu et al., 2017*) با بررسی اثرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی با استفاده از روش‌های مدل هیدرولوژیکی SWAT، رگرسیون خطی، منحنی جرم مضاعف، الاستیسیته محور و روش بودیکو بر روی رودخانه Yanhe در چین اعلام کردند که تغییر اقلیم به‌طور متوسط موجب کاهش $54/1$ درصدی رواناب در حوضه مورد مطالعه شده است. زهرایی و همکاران (*Zahraie et al., 2017*) سهم اثرات تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی را در کاهش رواناب‌های ورودی به سد زاینده رود با استفاده از سه روش کشسانی، رگرسیون خطی و تثبیت-تغییر ارزیابی کردند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده سازگاری نتایج این روش‌ها با اطلاعات مربوط به توسعه کشاورزی به‌عنوان مهمترین مصرف‌کننده آب در منطقه بود. عباسی و ملکانی (*Abbasi & Malekani, 2021*) برای بررسی و برآورد میزان تغییرات رواناب در اثر عوامل اقلیمی و انسانی در حوضه سجاسرود واقع در استان زنجان از روش رگرسیون خطی و جهت شبیه‌سازی فرآیند هیدرولوژیکی از ابزار آب و خاک (SWAT) استفاده کردند که نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که سهم عوامل اقلیمی و عوامل انسانی در کاهش رواناب به‌ترتیب 33% و 67% می‌باشد. کاکایی و همکاران (*Kakaei et al., 2019*) اثرات خشکسالی ناشی از فعالیت‌های انسانی را بر منابع آب سطحی و رواناب در دو حوضه اسکندری در استان



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

جدول ۱- مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های هیدرومتری مورد مطالعه

Table 1- Geographical coordinates of studied hydrometric stations

محدوده مطالعاتی	نام رودخانه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت حوضه
Study area	Name of river	Station Name	Longitude	Latitude	Basin Area
اردبیل	قره‌سو	سامیان	48°14' 48 "	38°22' 49 "	4200 m ²
Ardabil	Gharehsoo	Samyan			
مشگین شهر	قره‌سو	دوست بیگلر	47°32' 02 "	38°32' 57 "	7300 m ²
Meshgin Shahr	Gharehsoo	Dost-Beiglo			

آزمون پتیت^۱

در مواقعی که زمان دقیق تغییر در یک سری زمانی مشخص نباشد برای تعیین نقطه تغییر و تمایز بین دوره پایه و تغییر جریان رودخانه از روش ناپارامتری پتیت که در سال ۱۹۷۹ توسط پتیت ارائه شده است استفاده می‌شود (Pettitt, 1979). برای تعیین این نقطه تغییر ابتدا باید پارامتر K_t محاسبه شود (Mwangi, 2016).

در مواقعی که زمان دقیق تغییر در یک سری زمانی مشخص نباشد برای تعیین نقطه تغییر و تمایز بین دوره پایه و تغییر جریان رودخانه از روش ناپارامتری پتیت که در سال ۱۹۷۹ توسط پتیت ارائه شده است استفاده می‌شود (Pettitt, 1979). برای تعیین این نقطه تغییر ابتدا باید پارامتر K_t محاسبه شود (Mwangi, 2016).

$$K_t = \max |U_{t,T}|, \quad 1 \leq t \leq T \quad (1)$$

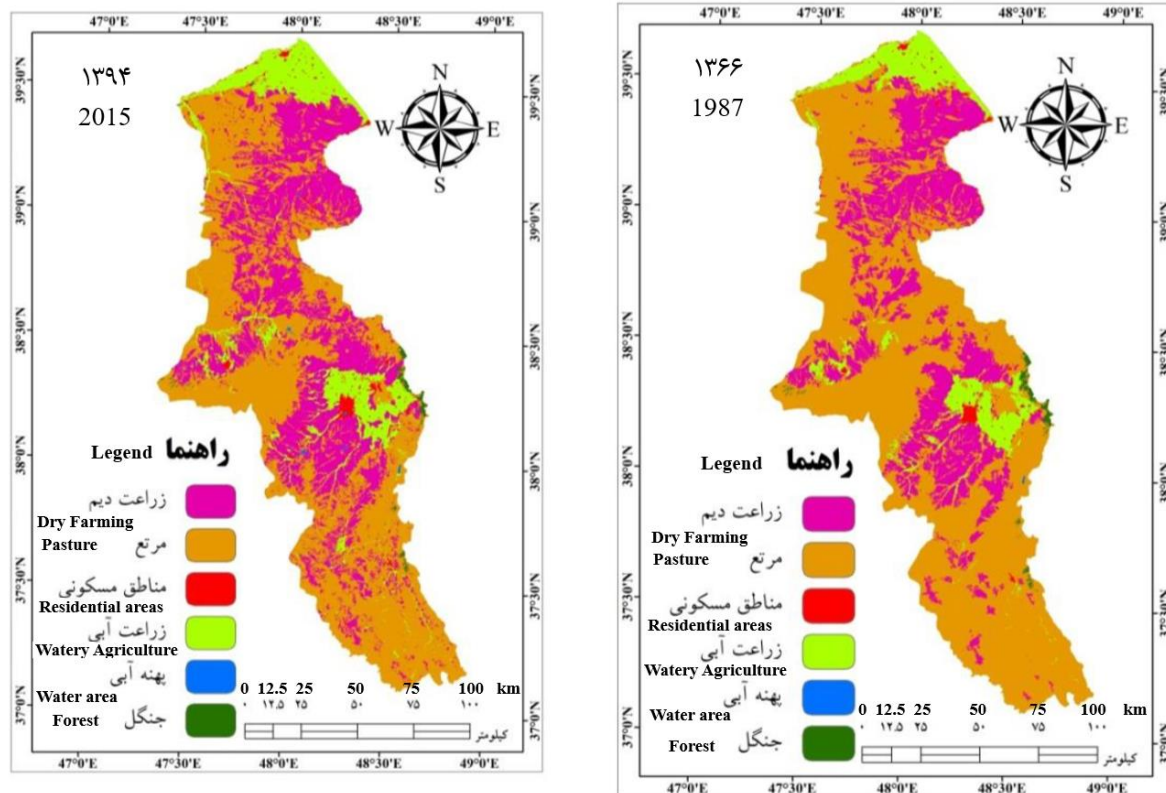
$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (2)$$

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

معنی‌داری K_t در سطح ۵ درصد به صورت زیر برآورد می‌گردد.

$$P \cong 2 \exp\left(\frac{-6K_t^2}{T^3 + T^2}\right) \quad (4)$$

جایی که مقدار P کمتر از ۰/۰۵ (سطح معنی‌داری) باشد آن نقطه به عنوان نقطه تغییر خواهد بود.



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی استان اردبیل در سال‌های ۱۳۶۶ و ۱۳۹۴ (Kakehmami et al., 2021)
Figure 2- Land use map of Ardabil province in 1987 and 2015 (Kakehmami et al., 2021)

می‌باشند. μ_{human} و $\mu_{climate}$ نیز به ترتیب درصد سهم عوامل اقلیمی و انسانی بر روی تغییرات دبی در نظر گرفته شده‌اند.

روش‌های الاستیسیته محور

رواناب در یک حوضه را می‌توان به صورت تابعی از عوامل اقلیمی و مشخصات حوضه به شکل زیر بیان نمود:

$$Q = f(P, ET_p, V) \quad (9)$$

که در آن، Q رواناب، P بارندگی، ET_p تبخیر- تعرق پتانسیل و V نشان‌دهنده تاثیرات یکپارچه مشخصات حوضه بر رواناب می‌باشد. بر اساس رابطه (۹) می‌توان تغییرات در رواناب را به صورت تابعی از تغییرات در بارش، تبخیر- تعرق و مشخصات حوضه به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta Q = f'_p \Delta P + f'_{ET_p} \Delta ET_p + f'_V \Delta V = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial ET_p} \Delta ET_p + \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V \quad (10)$$

تغییر در میزان بارندگی و تبخیر- تعرق پتانسیل ناشی از اثرات تغییر اقلیم و تغییرات در مشخصات حوضه نشان‌دهنده اثر فعالیت‌های انسانی در حوضه می‌باشد (Yao et al., 2015). بنابراین، رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر تفکیک کرد:

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب

برای بررسی تغییرات رواناب می‌توان طول دوره آماری را به دو دوره پایه و دوره تغییرات تقسیم‌بندی نمود. به عبارت دیگر، $\Delta \bar{Q}_{total}$ را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\Delta \bar{Q}_{total} = \bar{Q}_{variation} - \bar{Q}_{baseline} \quad (5)$$

که در آن، $\Delta \bar{Q}_{total}$ تغییرات کل میانگین سالانه رواناب و $\bar{Q}_{variation}$ و $\bar{Q}_{baseline}$ به ترتیب میانگین سالانه رواناب در دوره پایه و در دوره تغییرات می‌باشند. همانگونه که در بالا نیز اشاره شده می‌توان تغییرات در میزان رواناب را به صورت ترکیبی از تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی و درصد تغییرات هر یک را با روابط زیر نشان داد (Wu et al., 2017):

$$\Delta \bar{Q}_{total} = \Delta \bar{Q}_{climate} + \Delta \bar{Q}_{human} \quad (6)$$

$$\mu_{climate} = \frac{\Delta \bar{Q}_{climate}}{\Delta \bar{Q}_{total}} \times 100 \quad (7)$$

$$\mu_{human} = \frac{\Delta \bar{Q}_{human}}{\Delta \bar{Q}_{total}} \times 100 \quad (8)$$

که در آن، $\Delta \bar{Q}_{climate}$ و $\Delta \bar{Q}_{human}$ به ترتیب تغییرات در میانگین دبی سالانه به علت اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی

که P بارندگی بر حسب میلی‌متر، E تبخیر و تفرق واقعی و Q عمق رواناب بر حسب میلی‌متر می‌باشد.

بودیکو (Budyko, 1948) میانگین سالانه تبخیر و تفرق پتانسیل به میانگین سالانه بارش را به عنوان شاخص خشکی و تبخیر و تفرق واقعی را تابعی از شاخص خشکی معرفی نمود. به عبارت دیگر:

$$\varphi = \frac{ET_p}{P} \quad (17)$$

$$ET_a = P * F(\varphi) \quad (18)$$

ET_p میانگین تبخیر و تفرق پتانسیل دوره تغییرات، P میانگین بارش دوره تغییرات، ET_a میانگین تبخیر و تفرق واقعی دوره تغییرات و $F(\varphi)$ شاخص خشکی می‌باشد.

با توجه به جدول ۲ هر چقدر مقدار شاخص خشکی بیشتر باشد وضعیت اقلیمی منطقه خشک‌تر تلقی می‌شود.

ضریب الاستیسیته بارش و تبخیر و تفرق پتانسیل را به صورت زیر می‌توان بیان کرد (Fu et al., 2007).

$$\varepsilon_P = 1 + \frac{\varphi F'(\varphi)}{1 - F(\varphi)}, \quad \varepsilon_P + \varepsilon_{ET_P} = 1 \quad (19)$$

$F'(\varphi)$ مشتق تابع $F(\varphi)$ می‌باشد. برای محاسبه $F(\varphi)$ از روابطی که بر اساس فرضیات بودیکو ارائه شده است (جدول ۳) استفاده گردید. پس از انجام محاسبات فوق، سهم تغییر رواناب ناشی از اقلیم محاسبه می‌شود. با توجه به جدول ۳ مقدار ضریب آب موجود در گیاه (ω) در رابطه ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2001) با توجه به پوشش زمین و کاربری اراضی حوضه برآورد می‌شود که برای جنگل مقدار ۲ و برای مرتع ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

در این تحقیق، به منظور تعیین نقطه تغییر مقدار رواناب رودخانه و تقسیم‌بندی دوره پایه و تغییر از آزمون پتیت در طول دوره آماری ۱۳۶۱-۱۳۹۸ (۳۸ سال) استفاده شد. با توجه به نتایج این آزمون در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در سال ۱۳۷۶ یک تغییر در سری زمانی جریان سالانه رودخانه رخ داده است و مقدار p هم در این نقطه کمتر از ۰/۰۵ است. بنابراین، از سال ۱۳۶۱ تا ۱۳۷۶ به عنوان دوره پایه و از سال ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۸ به عنوان دوره تغییرات در نظر گرفته شد. این آزمون با استفاده از نرم‌افزار Xlstat انجام شد.

$$\Delta \bar{Q}_{climate} = \frac{\partial Q}{\partial P} \Delta P + \frac{\partial Q}{\partial ET_p} \Delta ET_p \quad (11)$$

برای تعیین سهم اثرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر رواناب ابتدا باید ضریب الاستیسیته رواناب (ε) برآورد شود (Schaake, 1990). ضریب الاستیسیته رواناب عبارتست از نسبت تغییرات رواناب به یک عامل اقلیمی مثل بارش و یا تبخیر-تفرق (X). به عبارت دیگر:

$$\varepsilon = \frac{\partial Q/Q}{\partial X/X} \quad (12)$$

بنابراین رابطه (۱۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\Delta \bar{Q}_{climate} = \left(\frac{\varepsilon_P \Delta P}{P} + \frac{\varepsilon_{ET_P} \Delta ET_P}{ET_P} \right) Q \quad (13)$$

که در آن، ε_P و ε_{ET_P} به ترتیب ضریب الاستیسیته رواناب نسبت به بارندگی و تبخیر-تفرق می‌باشد. بنابراین، برای محاسبه $\Delta \bar{Q}_{climate}$ ابتدا باید این دو ضریب محاسبه شوند که برای محاسبه آن از دو روش زیر استفاده می‌شود.

روش ناپارامتری

این روش یک تخمین ناپارامتری برای الاستیسیته اقلیمی می‌باشد که با استفاده از داده‌های مشاهداتی به دست می‌آید. ساختار کلی این روش به صورت زیر می‌باشد:

$$\varepsilon = \frac{\Delta Q_i / \bar{Q}}{\Delta X_i / \bar{X}} = \frac{(Q_i - \bar{Q}) / \bar{Q}}{(X_i - \bar{X}) / \bar{X}} \quad (14)$$

Q_i و X_i به ترتیب مقادیر رواناب سالانه و متغیر اقلیمی (بارش و تبخیر و تفرق پتانسیل)، $\bar{Q}$ و $\bar{X}$ متوسط رواناب سالانه و متغیر اقلیمی می‌باشد که برای حل این معادله می‌توان از آماره میانه استفاده کرد.

$$\varepsilon = \text{median} \frac{\frac{Q_i - \bar{Q}}{\bar{Q}}}{\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}}} \quad (15)$$

روش‌های بودیکو محور

با توجه به رابطه بیلان آب می‌توان الاستیسیته اقلیمی برای رواناب را ارزیابی کرد. به طور کلی فرض بر این است که تغییرات بلند مدت در ذخیره آب حوضه ناچیز است و رواناب به عوامل اقلیمی عمدتاً به بارش و تبخیر و تفرق پتانسیل بستگی دارد. معادله بیلان آب را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$Q = P - E \quad (16)$$

جدول ۲- تعیین وضعیت اقلیمی منطقه با استفاده از شاخص خشکی

Table 2- Determining the climatic condition of the region using the aridity index

بازه شاخص خشکی Dryness index range	0.375-0.75	0.75-2	2-5	5
وضعیت اقلیمی منطقه Climatic condition of the region	خشک Arid	نیمه خشک Semi-arid	نیمه مرطوب Sub-humid	مرطوب Humid

جدول ۳- توابع مختلف بر اساس فرضیات بودیکو

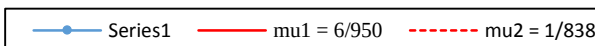
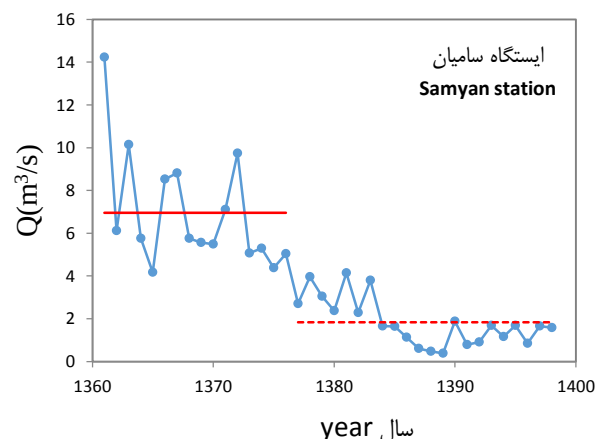
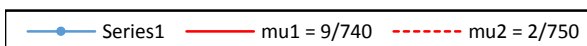
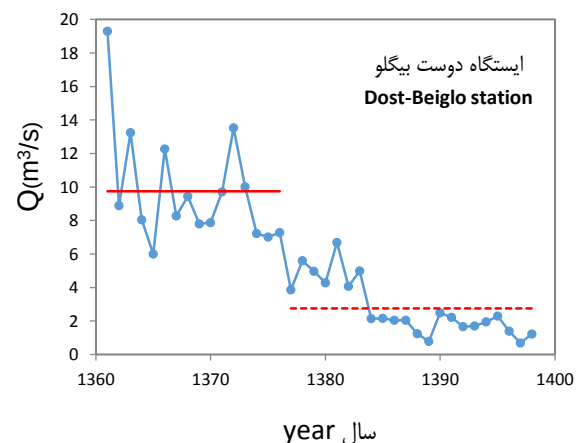
Table 3- Various functions based on Budyko assumptions

نام توابع Function names	$F(\varphi)$	$F'(\varphi)$
Schreiber, 1904	$1e^{-\varphi}$	$e^{-\varphi}$
Oldekop, 1911	$\varphi \tan h(1/\varphi)$	$\tan h(1/\varphi) - \frac{4}{\varphi(e^{-1/\varphi} + e^{1/\varphi})^2}$
Budyko, 1948	$[\varphi \tan h(1/\varphi)(1 - e^{-\varphi})]^{0.5}$	$0.5[\varphi \tan h(1/\varphi)(1 - e^{-\varphi})]^{-0.5} \times$ $\left[\left(\tan h(1/\varphi) - \frac{\sec h^2(1/\varphi)}{\varphi} \right) (1 - e^{-\varphi}) + \varphi \tan h(1/\varphi) e^{-\varphi} \right]$
Pike, 1964	$(1 + \varphi^{-2})^{-0.5}$	$\frac{1}{[\varphi^3(1 + (1/\varphi)^2)^{1.5}]}$
Zhang et al, 2001	$(1 + \omega\varphi) / (1 + \omega\varphi + 1/\varphi)$	$(\omega + 2\omega/\varphi - 1 + 1/\varphi^2) / (1 + \omega\varphi + 1/\varphi)^2$

و بهره‌برداری از سدهای سیلان و یامچی به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۳ است که منجر به کاهش دبی رودخانه شده است. دبی ایستگاه سامیان متأثر از ساخت سد یامچی و دبی ایستگاه دوست‌بیگلو متأثر از تأسیس هر دو سد سیلان و یامچی می‌باشد.

برای تعیین سهم اثرات اقلیمی و انسانی بر تغییرات رواناب از روش‌های الاستیسیته محور استفاده گردید که نتایج این روش‌ها در ایستگاه سامیان در جدول ۴ و در ایستگاه دوست بیگلو در جدول ۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۳، در ایستگاه سامیان، متوسط دبی رودخانه در دوره پایه برابر ۶/۹۵ متر مکعب در ثانیه و متوسط دبی رودخانه در دوره تغییرات برابر ۱/۸۳ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. در ایستگاه دوست‌بیگلو نیز متوسط دبی جریان در دوره پایه ۹/۷۴ متر مکعب در ثانیه و متوسط دبی در دوره تغییرات برابر ۲/۷۵ متر مکعب در ثانیه می‌باشد که این مقادیر کاهش قابل توجه دبی رودخانه را در هر دو ایستگاه هیدرومتری نشان می‌دهند که میزان کاهش دبی در ایستگاه دوست‌بیگلو بیشتر از ایستگاه سامیان است. همچنین، در این نمودارها، در ایستگاه سامیان بعد از سال ۱۳۸۳ و در ایستگاه دوست‌بیگلو نیز بعد از سال ۱۳۸۳ کاهش در مقادیر دبی دیده می‌شود که همانطور که گفته شد دلیل آن احداث



شکل ۳- نتایج آزمون پتیت در تعیین نقطه تغییر رواناب در ایستگاه سامیان و دوست بیگلو

Figure 3- Results of Petit's test in determining the point of change of runoff in Samyan and Dost-Beiglo stations

جدول ۴- سهم اثرات اقلیمی و انسانی با استفاده از روش الاستیسیته محور در ایستگاه سامیان

Table 4- Contribution of climatic and human effects using the elasticity-based method in Samyan station

نام روش Method name	φ	ε_P	ε_{ETP}	سهم تغییرات اقلیمی (%) Contribution of climate change	سهم فعالیت‌های انسانی (%) Contribution of human activities
روش ناپارامتری Nonparametric Method	-	1.640	-0.81	11.74	88.26
اسچریبر Schreiber	0.389	1.389	-0.389	8.02	91.98
الدکپ Oldekop	0.389	1.583	-0.583	9.97	90.03
بودیکو Budyko	0.389	1.383	-0.383	8.02	91.98
پیک Pike	0.389	1.348	-0.348	9.20	90.80
ژانگ Zhang	0.389	1.348	-0.348	7.63	92.37

جدول ۵- سهم اثرات اقلیمی و انسانی با استفاده از روش الاستیسیته محور در ایستگاه دوست بیگلو

Table 5- Contribution of climatic and human effects using the elasticity-based method in Dost-Beiglo station

نام روش Method name	φ	ε_P	ε_{ETP}	سهم تغییرات اقلیمی (%) Contribution of climate change	سهم فعالیت‌های انسانی (%) Contribution of human activities
روش ناپارامتری Nonparametric Method	-	0.149	4.790	3.87	96.13
اسچریبر Schreiber	0.469	1.461	-0.461	2.29	97.71
الدکپ Oldekop	0.469	1.724	-0.724	2.58	97.42
بودیکو Budyko	0.469	1.580	-0.580	2.44	97.56
پیک Pike	0.469	1.598	-0.598	9.20	97.48
ژانگ Zhang	0.469	1.395	-0.395	2.29	97.71

محور سهم فعالیت‌های انسانی بین ۹۶/۱۳ تا ۹۷/۷۱ درصد و سهم تغییرات اقلیمی از ۲/۲۹ تا ۳/۸۷ درصد بسته به روش ناپارامتری و بودیکو محور برآورده شده است.

نتایج حاصل از روش‌های مختلف در هر دو ایستگاه نشان داد که سهم تغییرات اقلیمی کمتر از ۱۱ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی بیشتر از ۸۸ درصد در کاهش جریان‌ات رودخانه قره‌سو می‌باشد که این نتایج با نتایج محققان قبلی همخوانی دارد. تحقیقات گائو و همکاران (Gao et al., 2016) نشان داد که بیشتر از ۶۰ درصد از کاهش رواناب در حوضه‌های مختلف لوس پلاتو^۴ به علت فعالیت‌های انسانی می‌باشد. نتایج مطالعات عباسی و ملکانی (Abbasi and Malekani, 2021) نیز بر روی حوضه سجا سرود واقع در استان زنجان نشان داد که سهم عوامل اقلیمی ۳۳ درصد و سهم فعالیت‌های انسانی ۶۷ درصد می‌باشد. مطالعات کنعانی و همکاران (Kanani et al., 2021) در حوضه رودخانه ليقوان که از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه می‌باشد، نشان داد که عوامل انسانی موجب کاهش ۶۵ تا ۸۴ درصد میزان رواناب می‌باشد. همچنین، با مقایسه نتایج دو ایستگاه سامیان و دوست بیگلو، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که تأثیر تغییرات اقلیمی بر روی دبی رودخانه

با توجه به جدول ۴، در ایستگاه سامیان از روش ناپارامتری و روش‌هایی که بر اساس فرضیات بودیکو می‌باشند، برای محاسبه ضریب الاستیسیته استفاده گردید که نتایج این روش‌ها در این جدول نشان داده شده است. در روش ناپارامتری، سهم فعالیت‌های انسانی ۸۸/۲۶ درصد و سهم تغییرات اقلیمی ۱۱/۷۴ درصد برآورده شده است. سهم فعالیت‌های انسانی و سهم تغییرات اقلیمی برای روش‌های اسچریبر^۱، الدکپ^۲، بودیکو^۳، پیک^۴ و ژانگ^۵ به ترتیب ۹۱/۹۸ و ۸/۰۲، ۹۰/۰۳ و ۹۰/۹۷، ۹۱/۹۸ و ۸/۰۲، ۹۰/۸۰ و ۹۲/۳۷ و ۷/۶۲ برآورد شده است. به طور کلی، در روش الاستیسیته محور، سهم فعالیت‌های انسانی ۸۸/۲۶ تا ۹۲/۳۷ درصد و سهم تغییرات اقلیمی از ۷/۶۳ تا ۱۱/۷۴ درصد بسته به روش ناپارامتری و بودیکو محور برآورده شده است.

با توجه به جدول ۵، در ایستگاه دوست بیگلو در روش ناپارامتری، سهم فعالیت‌های انسانی ۹۶/۱۳ درصد و سهم تغییرات اقلیمی ۳/۸۷ درصد برآورده شده است. سهم فعالیت‌های انسانی و سهم تغییرات اقلیمی برای روش‌های اسچریبر^۱، الدکپ^۲، بودیکو^۳، پیک^۴ و ژانگ^۵ به ترتیب ۹۷/۷۱ و ۲/۲۹، ۹۷/۴۲ و ۲/۵۸، ۹۷/۵۶ و ۲/۴۴، ۹۷/۴۸ و ۲/۵۲، ۹۷/۷۱ و ۲/۲۹ برآورد شده است. به طور کلی، در روش الاستیسیته

4- Pike

5- Zhang

6- Loess Plateau

1- Schreiber

2- Oldekop

3- Budyko

سپس با استفاده از روش‌های یادشده سهم فعالیت‌های انسانی و سهم تغییرات اقلیمی مشخص گردید. دو عامل اقلیمی یعنی کاهش بارندگی و افزایش تبخیر به‌عنوان عوامل موثر در تغییرات اقلیمی و انجام فعالیت‌هایی مانند احداث سد یامچی و سد سیلان و نیز توسعه و گسترش باغات و اراضی کشاورزی به‌عنوان فعالیت‌های انسانی در کاهش جریان رودخانه قره‌سو می‌توانند موثر باشند. با این‌حال، فعالیت‌های انسانی تأثیر بیشتری (بالای ۸۸ درصد) نسبت به عامل تغییر اقلیم (کمتر از ۱۱ درصد) در کاهش جریان این رودخانه داشته است. با توجه به زیاد بودن درصد فعالیت‌های انسانی می‌توان گفت که با ادامه همین روند تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، بنظر می‌رسد جریان رودخانه در سال‌های آینده دچار تغییرات و کاهش بیشتری خواهد شد. به منظور جلوگیری از کاهش بیشتر رواناب این رودخانه می‌بایست از افزایش فعالیت‌های انسانی انجام یافته در سطح استان نظیر سدسازی، گسترش اراضی کشاورزی و مناطق مسکونی و تخریب جنگل‌ها و مراتع جلوگیری کرده و آن را مدیریت نمود.

در نهایت، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی از سایر روش‌های ارزیابی سهم اثرات اقلیمی و انسانی بر دبی رودخانه قره‌سو و سایر رودخانه‌های جاری در سطح کشور استفاده شود و کارایی آنها بررسی شود. همچنین، پیشنهاد می‌گردد از یک مدل هیدرولوژیکی برای روندیابی جریان بین دو ایستگاه هیدرومتری حوضه قره‌سو و تعیین اثر تغییرات بارش و تبخیر و تعرق حوضه‌های بالادست هر ایستگاه استفاده گردد.

قره‌سو در ایستگاه سامیان (۹/۰۹٪) بیشتر از ایستگاه دوست‌بیگلو (۲/۶۶٪) می‌باشد و برعکس تأثیر فعالیت‌های انسانی بر روی دبی رودخانه در ایستگاه دوست‌بیگلو (۹۷/۳۳٪) بیشتر از ایستگاه سامیان (۹۰/۹۰٪) می‌باشد که علت آن می‌تواند تأثیر همزمان احداث دو سد یامچی و سیلان بر دبی ایستگاه دوست‌بیگلو باشد.

شایان ذکر است که در این تحقیق همانطور که گفته شد بدلیل عدم کافی بودن داده‌های بارش و تبخیر در نواحی بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری، از داده‌های بارش و تبخیر ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده گردیده است. بدیهی است در صورت کافی بودن آمار بالادست و اعمال نمودن اثرات بارش و تبخیر نقاط بالادست حوضه در دبی‌های خروجی از ایستگاه‌های هیدرومتری، نتایج قابل اعتمادتری حاصل می‌شد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای تعیین میزان اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر روی مقادیر دبی رودخانه قره‌سو واقع در استان اردبیل از روش‌های الاستیسیته محور استفاده گردید. بدین منظور، از داده‌های هیدرومترولوژیکی مختلف مانند بارش، تبخیر و دبی ماهانه مرتبط با ایستگاه سامیان و ایستگاه دوست‌بیگلو با دوره آماری ۱۳۹۸-۱۳۶۱ بهره گرفته شد. ابتدا با استفاده از آزمون پتیت مشخص گردید که از سال ۱۳۷۶ میزان جریان رودخانه دچار تغییرات معنی‌داری شده است. لذا کل دوره آماری به دو دوره پایه و تغییرات تقسیم‌بندی شد و

منابع

- Abbasi, H., & Malekani, L. (2021). Runoff Modeling and Estimation of Runoff Changes Due to Climatic and Human Factors. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2), 475-485. (In Persian with English abstract). doi:20.1001.1.20087942.1398.13.2.18.6
- Budyko, M.I. (1948). *Evaporation under Natural Conditions*. Translated from Russian by Israel Program.
- Gao, G., Fu, B., Wang, S., Liang, W., & Jiang, X. (2016). Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. *Science of the Total Environment*, 557-558, 331-342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.019>
- Fu, G., Charles, S.P., & Chiew, F.H.S. (2007). A two-parameter climate elasticity of runoff index to assess climate change effects on annual runoff. *Water Resources Research*, 43(11), 11-19. <https://doi.org/10.1029/2007WR005890>
- Hood, M. (2011). Increased flooding driven by climate change. *African Network of Environmental Journalists (ANEJ)*.
- Huntington, T.G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- Kakaei, E., Moradi, H.R., Moghaddam Nia, A.R., & Van Lanen, H.A.J. (2019). Quantifying positive and negative human-modified droughts in the Anthropocene: Illustration with two Iranian catchments. *Water*, 11(5), 884. <https://doi.org/10.3390/w11050884>
- Kanani, R., Fakheri, A., Ghorbani, A., & Dinpashoh, Y. (2021). Trend analysis of the streamflow in the Lighvan river hydrometric station (Upstream and Downstream). *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 11-19. (In Persian). <https://doi.org/10.52547/jwmr.11.22.11>
- Kakehmami, A., Ghorbani, A., Moameri, M., & Ghafari, S. (2021). Evaluation of land use changes in Ardabil province using satellite image processing. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(3), 537-550. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijdr.2021.125011>
- Ma, Z., Kang, S., Zhang, L., Tong, L., & Su, X. (2008). Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China. *Journal of Hydrology*, 352(3-4), 239-249.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.022>

- 11- Milly, P.C.D., Dunne, K.A., & Vecchia, A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350. <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- 12- Mwangi, H.M., Julich, S., Patil, S.D., McDonald, M.A., & Feger, K.H. (2016). Relative contribution of land use change and climate variability on discharge of upper Mara River, Kenya. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 5, 244-260. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.12.059>
- 13- Ol'dekop, E.M. (1911). *On Evaporation from the Surface of River Basins: Transactions on Meteorological Observations*. Lur-evskogo, report, University of Tartu, Estonia. (In Russian)
- 14- Pettitt, A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society*, 28(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- 15- Pike, J.G. (1964). The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate. *Journal of Hydrology*, 2(2), 116-123. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(64\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(64)90022-8)
- 16- Rangelcroft, S., Van Loon, A.F., Maureira, H., Verbits, K., & Hannah, D.M. (2016). Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth System Dynamics*, 57, 1-32. <https://doi.org/10.5194/esd-2016-57>
- 17- Schreiber, P. (1904). Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(10), 441-452.
- 18- Schaake, J.C. (1990). *From climate to flow*. P. 177-206. In: Waggoner, P.E., Wiley, J. (eds), *Climate Change and U.S. Water Resources*, New York.
- 19- Sorokin, L.V., & Mondello, G. (2017). *Entering the new +2 °C Global Warming age and a threat of World Ocean expansion for sustainable economic development*. In: Mal, S. et al. (eds.), *Climate Change Extreme Events and Disaster Risk Reduction*, Springer, Berlin, Germany.
- 20- Wu, J., Miao, C., Zhang, X., Yang, T., & Duan, Q. (2017). Detecting the quantitative hydrological response to changes in climate and human activities. *Science of the Total Environment*, 586, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.010>
- 21- Yao, H., Shi, C., Shao, W., Bai, J., & Yang, H. (2015). Impacts of climate change and human activities on runoff and sediment load of the Xiliugao Basin in the upper Yellow river. *Advances in Meteorology*, 481713. <https://doi.org/10.1155/2015/481713>
- 22- Zahraie, B., Kolbasi, A., & Salehabadi, H. (2017). *Estimating the contribution of the effects of climate change and human activities in the reduction of runoff entering the Zaindarud dam*. In International Climate Change Conference, Ministry of Power, Tehran. (In Persian)
- 23- Zhao, G., Tian, P., Mu, X., Jiao, J., Wang, F., & Gao, P. (2014). Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China. *Journal of Hydrology*, 519, 387-398. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.014>
- 24- Zhang, L., Dawes, W.R., & Walker, G.R. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701-708. <https://doi.org/10.1029/2000WR900325>



Research Article

Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 685-700

Consequence of Natural and Long Term Oil Pollution on Microbial Population and Urease Activity of Soil

Sh. Moradi¹, M.R. Sarikhani^{2*}, A. Beheshti Ale-Agha³, A. Reyhanitabar⁴, S.S. Alavi-kia⁵, A. Bandehagh⁶, R. Sharifi⁷

1, 2 and 4- Ph.D. Student of Soil Biology and Biotechnology, Associate Professor and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: rsarikhani@yahoo.com)

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

5 and 6- Associate Professors, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

7- Assistant Professor, Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran

Received: 06-02-2023
Revised: 12-07-2023
Accepted: 26-07-2023
Available Online: 01-08-2023

How to cite this article:

Moradi, Sh., Sarikhani, M.R., Beheshti Ale-Agha, A., Reyhanitabar, A., Alavi-kia, S.S., Bandehagh, A., & Sharifi, R. (2023). Consequence of oil pollution on microbial population and urease activity of soil. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 685-700. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80896.1250>

Introduction

Oil contamination affects the biological, physical, and chemical properties of soil. The abundance and diversity of soil microbial communities can significantly be influenced by petroleum hydrocarbons. Soil biological indicators including microbial population and enzyme activity, are highly sensitive to environmental stresses and respond to them quickly. Measuring the microbial population is one of the most common biological indicators which is used to study the quality and health of the soil. Also, measuring the activity of enzymes such as urease is one of the most sensitive indicators of oil-contaminated soils. There are some studies on the effects of oil contamination on microbial population and soil enzyme activity. Most of the studies have tested non-natural and short-term oil pollution and reported the adverse effects of oil hydrocarbons on microbial activities in soil. While the soil sample used in this research had natural and long-term contamination and the microorganisms are compatible with polluted conditions. The aim of this study was to investigate changes in the microbial population and urease activity in the presence of different levels of oil contamination, and how petroleum hydrocarbons can affect them. Petroleum hydrocarbons are toxic and persistent in soil, so it is necessary to study the pattern of changes in soil biological characteristics in effective soil management.

Material and Methods

In this study, 120 samples of oil-contaminated soils were collected from the oil-rich area of Naft-Shahr (located in the west of Kermanshah province) which had natural and long-term oil pollution. A nested design was used to analysis data in this research. The test factors included locations (4 locations) and 3 different levels of oil pollution: low (L), moderate (M), and high (H). Also, 10 replications were considered in the three levels of oil contamination. The collected soils were analyzed for physico-chemical (pH, EC, Θ_m , CCE, OC, soil texture) and biological



©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.2023.80896.1250>

properties (including urease activity, BR and SIR) using standard methods, and the concentration of oil pollutants was determined by the Soxhlet extractor. To determine the abundance of the culturable microbial population, bacterial counting was performed using nutrient agar (NA) and carbon-free minimal medium (CFMM) supplemented with crude oil as the media. Urease activity was measured by the indophenol blue method and finally, the results of measuring chemical, physical and biological properties were analyzed using principal component analysis (PCA).

Results and Discussion

The average percentage of oil measured by Soxhlet method was 4.03%, 9.95% and 22.50% respectively for L, M and H levels. The results showed that the microbial population increased with the increase of contamination intensity. The highest microbial population counted in NA culture medium was 9.54×10^5 CFU/g in H soils and the lowest population was 3.25×10^5 CFU/g in L soils. In the CFMM culture medium, the highest population in H soils was 11.3×10^5 CFU/g and the lowest population in L soils was 11.8×10^4 CFU/g. For both NA and CFMM mediums, location 1 had the highest population and location 4 had the lowest microbial population. Oil contamination of soil samples led to a decrease in urease activity in such a way that the highest enzyme activity in soils was obtained with low contamination ($594.90 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) and the lowest activity in heavily contaminated soils ($176.11 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$). Also, the lowest urease activity was observed in location 1 and the highest in location 4. Principal components analysis (PCA) was also performed and 71% of the variance of the samples could be explained by the first two components (biochemical component and physical component). The results of this research indicated an increase in the microbial population with an increasing of the intensity of oil pollution. It seems that the results obtained from the studies conducted on man-made pollution and natural pollution have differences in terms of the type of biological responses. Aged, long-term and natural oil pollution has caused the selection of oil-resistant microbial community, and therefore we see their positive response to the presence of oil compounds. Conversely, urease enzyme activity was found to be higher in soils with low pollution. This suggests that microbial activity, while influential, is not the sole determinant of urease activity, and various factors contribute to Soil Enzyme Activity (SEA). The type of petroleum pollutant, the direct effect of petroleum compounds on urease-producing microorganisms, as well as the non-microbial origin of urease in soil can be possible reasons for reducing urease activity in contaminated soils.

Conclusion

In areas where petroleum pollutants are naturally and long-term present in the soil, some oil-decomposing microbial groups use petroleum hydrocarbons as a source of carbon for their nutrition, so the abundance of oil-decomposing communities increases. The results showed an increase in the microbial population with an increase in the intensity of oil pollution. On the other hand, the activity of urease enzyme measured in soils with low pollution was higher because non-microbial factors may affect the activity of this enzyme and the increase in the microbial population is not related to the increase in the population of urease-producing microbes.

Keywords: Biological indicators, Enzyme activity, Microbial population, Oil pollution

پیامد آلودگی نفتی طبیعی و طولانی مدت بر جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم اوره‌آز خاک

شکوفه مرادی^۱، محمدرضا ساریخانی^{۲*}، علی بهشتی آل آقا^۳، عادل ریحانی تبار^۴، سیدسیامک علوی کیا^۵ - علی بنده

حق^۶ - روح اله شریفی^۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۴

چکیده

آلاینده‌های آلی از جمله ترکیبات نفتی، یک مشکل جهانی برای سلامت محیط‌زیست و موجودات زنده محسوب می‌شوند که می‌توانند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را تحت تأثیر قرار دهند. در این تحقیق، شاخص‌های زیستی از جمله جمعیت میکروبی و فعالیت آنزیم اوره‌آز در خاک‌های آلوده به نفت-شهر کرمانشاه مورد توجه بود. به منظور بررسی اثرات آلودگی نفتی طولانی مدت و طبیعی، ۱۲۰ نمونه خاک آلوده با سطوح مختلف نفت؛ آلودگی شدید (H:High)، متوسط (M:Moderate) و کم (L:Low) از عمق ۰-۱۵ سانتی‌متری از ۴ منطقه مختلف تهیه شد. پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌ها، شمارش میکروبی و اندازه‌گیری فعالیت اوره‌آز انجام شد. برای تعیین جمعیت میکروبی کل و باکتری‌های درگیر در تجزیه نفت، به ترتیب اقدام به شمارش میکروبی در محیط کشت‌های NA (Nutrient Agar) و CFMM (Carbon Free Minimal Medium) شد که رابطه مستقیمی با افزایش میزان نفت داشت. میانگین درصد نفت اندازه‌گیری شده به روش سوکسله، به ترتیب ۴/۰۳، ۹/۹۵ و ۲۲/۵۰ درصد به ترتیب برای سطوح L، M و H به دست آمد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت آلودگی، جمعیت میکروبی افزایش یافت. بالاترین جمعیت میکروبی شمارش شده در محیط کشت NA، در خاک‌های با آلودگی شدید 9.5×10^5 CFU/g و پایین‌ترین جمعیت در خاک‌های با آلودگی کم 3×10^5 CFU/g به دست آمد. در محیط کشت CFMM نیز بیشترین و کمترین جمعیت به ترتیب در خاک‌های با آلودگی شدید و کم با مقادیر 3.25×10^5 CFU/g و 3.11×10^5 CFU/g به دست آمد. میزان افزایش جمعیت میکروبی در دو محیط NA و CFMM با افزایش آلودگی به ترتیب ۲/۹ و ۳/۸ برابر بود. برای هردو محیط کشت، منطقه ۱ دارای بیشترین جمعیت و بیشترین درصد آلودگی نفتی و منطقه ۴ دارای کمترین جمعیت و کمترین درصد آلودگی نفتی بود. پایین‌ترین فعالیت اوره‌آز در منطقه ۱ و بالاترین آن در منطقه ۴ مشاهده شد. آلودگی نفتی نمونه‌های خاک منجر به کاهش فعالیت اوره‌آز شد به گونه‌ای که بیشترین فعالیت آنزیمی در خاک‌های با آلودگی کم ($594/90 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) و کمترین فعالیت در خاک‌های با آلودگی شدید ($\mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) (۱۷۶/۱۱) به دست آمد، میزان درصد کاهش فعالیت با افزایش سطح آلودگی ۷۰/۵ درصد بود. آنالیز مؤلفه‌های اصلی نیز انجام شد و ۷۱ درصد از واریانس تراکمی نمونه‌ها توسط دو مؤلفه اول (مؤلفه بیوشیمیایی و مؤلفه فیزیکی) قابل توجیه بود. یافته‌های این تحقیق نشان داد که آلودگی نفتی طولانی مدت و طبیعی باعث گزینش جامعه میکروبی مقاوم به نفت شده و بنابراین پاسخ مثبت آنها به حضور ترکیبات نفتی را شاهد بودیم اما فعالیت آنزیم اوره‌آز تحت تأثیر آلودگی نفتی کاهش یافت. به نظر اثرات بازدارندگی ترکیبات نفتی بر فعالیت اوره‌آز یا جامعه غالب میکروبی با فعالیت اوره‌آز محدود، سبب شده است تا فعالیت اوره‌آز واکنش منفی به حضور آلاینده نفتی نشان دهد.

واژه‌های کلیدی: آلاینده‌های نفتی، جمعیت میکروبی، شاخص‌های زیستی، فعالیت آنزیمی

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، دانشیار و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*)- نویسنده مسئول: Email: rsarikhani@yahoo.com

۳- دانشیار بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران
۵ و ۶- دانشیاران به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، گروه به‌نژادی و بیوتکنولوژی گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۷- استادیار بیماری‌شناسی گیاهی، گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

مقدمه

آلودگی‌های نفتی، در نتیجه اکتشاف نفت، حمل و نقل، ذخیره‌سازی یا کاربرد آن و در پاره‌ای موارد به خاطر حوادث رخ می‌دهد که یک مشکل جهانی برای سلامت محیط‌زیست و موجودات زنده محسوب می‌شود. هیدروکربن‌های نفتی، آلاینده‌های آلی و پایدار هستند و می‌توانند به مدت طولانی در محیط آلوده باقی بمانند. برخی از آلودگی‌ها در محیط‌زیست به صورت طبیعی بوده و برخی از آنها ناشی از فعالیت‌های انسانی است که در مورد مناطق نفتی و اکتشافات نفتی، رخداد چنین آلودگی اغلب به صورت طبیعی است. الگوی تغییر در ویژگی‌های خاک در نتیجه هر کدام از آلودگی‌های طبیعی یا انسانی متفاوت بوده (Liang et al., 2015) و نیاز به مطالعه بیشتری دارد. آلودگی نفتی، پیامدهای مختلفی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارد و در نهایت با به خطر انداختن سلامت و کیفیت خاک، تولید محصول را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Liang et al., 2015). هیدروکربن‌های نفتی بر فراوانی و تنوع جمعیت میکروبی خاک اثر می‌گذارند و گروه خاصی از ریزجانداران که با چنین شرایطی سازگارند، قادر به استفاده و تجزیه ترکیبات نفتی می‌باشند (Phillips et al., 2009). برای بررسی اثرات یک آلاینده در خاک، شاخص‌های زیستی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند زیرا ریزجانداران خاک به تنش‌های اکوسیستم بسیار حساس هستند و از طریق تنظیم فعالیت، زیست‌توده و تنوع ساختار جامعه خود به سرعت به عوامل تنش‌زا پاسخ می‌دهند (Moreno et al., 2011). شاخص‌های انتخابی در پاسخ به آلاینده‌ها باید دارای ویژگی‌های زیر باشند: ۱- حساسیت به حضور آلاینده ۲- توانایی واکنش به سطوح مختلف آلودگی ۳- ثبات در نوع پاسخ افزایشی یا کاهش در حضور آلاینده ۴- تمایز قائل شدن بین اثر آلاینده و اثر سایر عوامل مخرب (Trasar-Cepeda et al., 2000).

اگرچه از شمارش میکروبی نمی‌توان برای آنالیز زیست‌تخریب پذیری هیدروکربن‌ها استفاده کرد، اما تنوع و تعداد ریزجانداران در یک مکان معین می‌تواند به شناسایی آن منطقه باتوجه به اثر سمیت هیدروکربن‌ها روی جوامع میکروبی، سن و غلظت آلاینده کمک کند. علاوه بر این جوامع میکروبی که مدت‌ها در معرض هیدروکربن‌های نفتی بوده‌اند، پتانسیل بالایی برای تجزیه زیستی نفت از خود نشان می‌دهند و همچنین قابل ذکر است که نشأت تازه نفت در خاک اغلب بخش بزرگی از ریزجانداران را از بین می‌برد در حالی که در خاک‌هایی با سطوح پایین‌تر آلودگی و به ویژه آلودگی‌های قدیمی‌تر، تعداد و تنوع میکروبی بالاتر است (Saadoun et al., 2008).

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های زیستی در خاک‌های آلوده به نفت، فعالیت آنزیمی است. آنزیم‌های موجود در خاک از نظر منشأ می‌توانند

به جامعه میکروبی زنده یا مرده خاک (از قبیل باکتری‌ها، قارچ‌ها) ریشه گیاهان یا جانوران خاک مربوط باشند. آنزیم‌ها، کاتالیزورهایی هستند که بدون اینکه دچار تغییر شوند، سرعت واکنش‌های بیوشیمیایی را افزایش می‌دهند و جزء لازم چرخه عناصر غذایی در خاک می‌باشند. فعالیت آنزیمی خاک متأثر از شرایط خاک و مدیریت‌های اعمال شده بر آن می‌باشد و می‌تواند به عنوان معیاری برای ارزیابی فعالیت میکروبی خاک، باروری خاک و اثرات بازدارنده آلاینده‌ها مورد استفاده قرار گیرد (Tabatabai, 1994). آنزیم‌ها به عنوان حسگرهای زیستی، بسیار حساس هستند، که برای تشخیص و اندازه‌گیری مقدار و غلظت آلاینده‌ها مورد استفاده هستند به گونه‌ای که هم برای تشخیص نشانه‌های اولیه آلودگی مورد استفاده قرار می‌گیرند و هم میزان حذف مؤثر آلاینده و به دست آوردن سلامت و کیفیت مجدد خاک را ارزیابی می‌کنند (Rao et al., 2014). آنزیم اوره‌آز مسئول هیدرولیز کود اوره در خاک‌های کشاورزی می‌باشد و انجام این فرایند منجر به افزایش pH خاک می‌شود. این آنزیم دارای منشأ گیاهی، جانوری و میکروبی بوده و به صورت درون‌سلولی و برون‌سلولی یافت می‌شود (Tabatabai, 1994). با توجه به نوع پاسخ و نوسانات فعالیت اوره‌آز خاک به آلاینده‌ها از جمله آلاینده‌های نفتی، این موضوع باعث شده است که اندازه‌گیری این آنزیم، یک شاخص بیوشیمیایی حساس برای بررسی وضعیت خاک‌های آلوده به نفت باشد (Lee et al., 2008)، در حالی که پژوهشگران دیگر، سایر آنزیم‌ها را نیز به عنوان شاخص آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی مورد توجه قرار داده‌اند (Xu & Johnson, 1995) اما در مقایسه با سایر آنزیم‌های خاک، آنزیم اوره‌آز، نسبت به آلودگی خاک حساس‌تر است (Gue: Klamers-Iwan et al., 2015).

لیائو و همکاران (Liao et al., 2015) تأثیر آلودگی نفتی بر جمعیت میکروبی را بررسی کردند و دریافتند که آلودگی نفتی اثر کاهشی بر جمعیت باکتری‌های هتروتروف و تأثیر فزاینده‌ای بر جمعیت باکتری‌های تجزیه‌کننده نفت دارد. بسیاری از محققان از جمله دوس سانتوس و همکاران (Dos Santos et al., 2011)؛ مارژسین و همکاران (Margesin et al., 2007) در گزارش‌های مختلف به نتایج مشابهی دست یافتند. نتایج به دست آمده از پژوهش‌های انجام شده در خاک‌های با آلودگی مصنوعی و خاک‌های با آلودگی طبیعی با هم قابل مقایسه نیستند و نوع پاسخ‌های زیستی به دست آمده در آنها نیز تفاوت‌هایی دارند. در این پژوهش منطقه‌ای که برای نمونه‌برداری انتخاب شد، منطقه نفت‌شهر واقع در غرب استان کرمانشاه بود که خاک‌های آن سال‌های زیادی تحت تأثیر آلاینده‌های نفتی بوده است. به گونه‌ای که کشف نفت در این مکان در سال ۱۳۸۰ هجری شمسی صورت گرفته است. در مناطقی که آلاینده‌های نفتی به طور طبیعی و بلندمدت

استاندارد خاک‌های استفاده شده در این پژوهش خاک‌های با آلودگی شدید محسوب می‌شوند (Vincent et al., 2011) اما منطقه نمونه برداری به گونه‌ای بود که حتی خاک‌هایی که عاری از نفت به نظر می‌رسیدند نیز دارای درصدی از نفت بودند زیرا طی سالیان متمادی تحت تأثیر آلودگی نفتی قرار گرفته بودند. همچنین خاک دارای آلودگی صفر که بتوان به عنوان شاهد بدون آلودگی در نظر گرفت در آن وجود نداشت و لذا خاک‌های دارای آلودگی کم (Low) به عنوان شاهد برای مقایسه با خاک‌های دارای آلودگی متوسط و شدید مورد استفاده قرار گرفتند. از هر منطقه ۳۰ نمونه خاک برداشت شد که از این ۳۰ نمونه، ۱۰ نمونه خاک با آلودگی کم (L)، ۱۰ نمونه خاک با آلودگی متوسط (M) و ۱۰ نمونه خاک با آلودگی شدید (H) بود. در مجموع ۱۲۰ نمونه از لایه ۱۵-۰ سانتی متری برداشته شد و در دمای ۴ درجه سانتی گراد نگهداری شدند.

شمارش جمعیت میکروبی

فراوانی جمعیت میکروبی قابل کشت، در محیط کشت‌های NA و CFMM شمارش شد. ترکیبات محیط کشت CFMM بر حسب گرم بر لیتر شامل (۳) NH_4NO_3 ، $\frac{2}{2}$ Na_2HPO_4 ، $\frac{1}{8}$ KH_2PO_4 ، $\frac{1}{1}$ $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ، $\frac{5}{100}$ $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ، $\frac{7}{100}$ $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ و $\text{pH} = 7.2$ بود و در این محیط حداقل، به میزان ۱ درصد نفت خام افزوده شد. تنها منبع کربن در این محیط کشت، نفت بوده لذا کلنی‌های رشد یافته در آن معرف باکتری‌های تجزیه کننده نفت است، اما محیط کشت NA یک محیط عمومی برای رشد اکثر باکتری‌هاست. به دلیل آبریز بودن و عدم اختلاط نفت با سایر اجزای محیط کشت جامد، پس از ریختن محیط کشت در پلیت و جامد شدن آن به میزان تقریبی ۲۰۰ میکرولیتر از نفت خام بر سطح پلیت گسترده شد. برای شمارش و خالص سازی باکتری‌های بومی تجزیه کننده نفت سری‌های رقت تهیه شدند (10^{-5} تا 10^{-8}) و از هر رقت ۱۰۰ میکرولیتر به محیط جامد CFMM انتقال داده شد و در دمای ۲۸ درجه سانتی گراد گرماگذاری شدند (Ebrahimi et al., 2013). برای تهیه سری رقت‌ها ۱۰ گرم از هر نمونه خاک به ۹۰ میلی لیتر آب مقطر استریل افزوده و به مدت ۳۰ دقیقه شیک شد و سپس سایر سری‌های رقت تهیه شدند و بدین ترتیب سوسپانسیون میکروبی جهت شمارش جمعیت میکروبی آماده شدند. فرض آزمایش بر این بوده است که دانسیته خاک ۱ گرم بر سانتی متر مکعب بوده است (Deaker et al., 2011). کلنی‌های رشد یافته بر روی محیط کشت NA معرف کل باکتری‌های خاک و باکتری‌های رشد یافته بر روی محیط کشت CFMM تنها معرف باکتری‌های تجزیه کننده نفت بود.

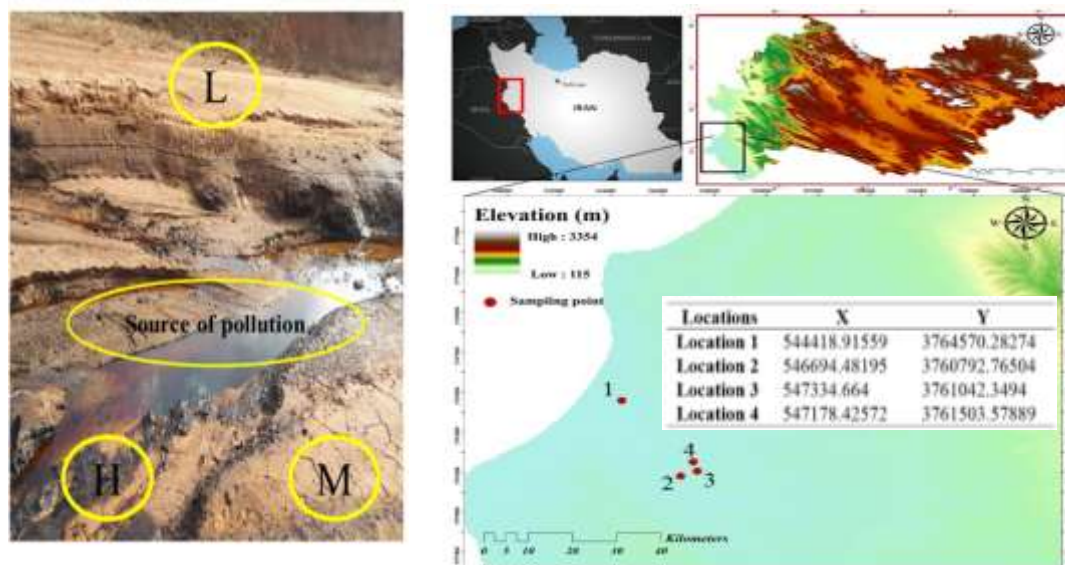
در خاک حضور دارند با گذشت زمان جوامع میکروبی خاک با شرایط آلودگی سازگار می‌شوند، بنابراین شاهد افزایش برخی فعالیت‌های میکروبی و همچنین فراوانی جمعیت میکروبی خواهیم بود. به عبارت دیگر برخی گروه‌های میکروبی که توانایی استفاده از نفت را دارند از هیدروکربن‌های نفتی به عنوان منبع کربن برای تغذیه خود بهره می‌گیرند در نتیجه فراوانی جوامع تجزیه کننده نفت افزایش می‌یابد (Sutton et al., 2013). با توجه به اثرات منفی آلاینده‌های نفتی بر جوامع میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی آنها، در این پژوهش تأثیرات آلودگی نفتی طبیعی و درازمدت بر برخی شاخص‌های زیستی مورد توجه قرار گرفت.

در این مطالعه پراکنش جمعیت باکتریایی و فعالیت آنزیم اوره آز به عنوان شاخص‌های زیستی مهم در خاک‌های آلوده به نفت، در ۱۲۰ نمونه خاک جمع آوری شده از منطقه نفت شهر استان کرمانشاه، مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این پژوهش بررسی چگونگی تغییرات جمعیت میکروبی در حضور آلودگی نفتی در خاک بود و همچنین با توجه به اهمیت آنزیم اوره آز در چرخه نیتروژن، فعالیت آنزیم اوره آز نیز مورد بررسی قرار گرفت. پاسخ به این سوالات که آیا حضور ترکیبات نفتی در خاک به صورت طبیعی و درازمدت موجب اختلال در فراوانی میکروبی و همچنین فعالیت اوره آزی در نمونه خاک‌های دارای غلظت‌های مختلف نفت خواهد شد یا نه؟ آیا تفاوتی بین مناطق نمونه برداری از نظر صفات مورد اندازه گیری وجود دارد؟ آیا روابطی بین جمعیت میکروبی و خصوصیات فیزیوشیمیایی خاک دیده می‌شود؟ از اهداف این پژوهش به شمار می‌رود.

مواد و روش‌ها

نمونه برداری و آماده سازی خاک

نمونه برداری از خاک‌های آلوده به نفت برای این پژوهش از منطقه نفت خیز نفت شهر واقع در غرب استان کرمانشاه در آبان ماه ۱۳۹۹ انجام شد (شکل ۱). خاک‌های این منطقه مدت زیادی (بیش از ۱۵۰ سال) تحت تأثیر آلودگی نفتی طبیعی بوده اند. باتوجه به اینکه در این منطقه منابع طبیعی نفتی، میدان‌های نفتی و به ویژه سفره‌های زیرزمینی نفت وجود دارند، آلودگی نفتی در خاک‌های سراسر منطقه فراگیر شده بود. ۴ منطقه برای نمونه برداری گزینش و نمونه‌ها با توجه به نزدیکی و دوری از منبع آلودگی و سطوح غلظت آلاینده نفتی به صورت چشمی از بخش‌های سه گانه با سطح آلودگی شدید (H:High)، متوسط (M:Moderate) و کم (L:Low) گزینش شدند و تفکیک درست آنها پس از اندازه گیری غلظت آلاینده در آزمایشگاه انجام شد. قابل ذکر است که از نظر استاندارد، خاک‌های دارای آلودگی نفتی بیش از ۳ درصد، خاک‌های با آلودگی شدید محسوب می‌شوند. بنابراین طبق این



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق چهارگانه نمونه‌برداری و محل جمع‌آوری خاک‌های H، M و L در هر منطقه
بخش‌های سه گانه با سطح آلودگی شدید (H:High)، متوسط (M:Moderate) و کم (L:Low).

Figure 1- Geographical location of the four sampling locations and the collection site of H, M and L soils in each location
Three sections with severe pollution level High (H), Moderate (M) and low (L).

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی

برخی ویژگی‌های عمومی خاک همچون بافت، pH، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، درصد رطوبت خاک (θ_m) و کربن آلی (OC) (Rowell, 1994)، کربنات کلسیم (CCE) (Martin and Reeve, 1995) و تنفس پایه و برانگیخته (Schinner, 2012) با استفاده از روش کارهای استاندارد، پس از هواخشک کردن و عبور دادن از الک ۲ میلی‌متری، با در نظر گرفتن سه تکرار اندازه‌گیری شدند. برای تعیین غلظت آلاینده‌های نفتی (% Oil) در نمونه‌های خاک برداشته شده از سه سطح آلودگی شدید (H)، متوسط (M) و کم (L)، از دستگاه سوکسله استفاده و براساس روش UNEP/IOC/IAEA سازمان محیط زیست آمریکا انجام شد (Christopher et al., 1988). در این روش برای تعیین غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک، ابتدا ۱۰ گرم از نمونه خاک را روی کاغذ صافی ریخته سپس کاغذ صافی از هر طرف به‌طور کامل بسته و وزن اولیه یادداشت شد (W1) و سپس در دستگاه سوکسله قرار گرفت. برای استخراج مواد نفتی از ۳۰۰-۴۰۰ میلی‌لیتر دی‌کلرومتان استفاده شد که تقریباً ۴ ساعت به طول انجامید، سپس ۷۲ ساعت در آن در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری و پس از تبخیر دی‌کلرومتان، وزن ثانویه (W2) یادداشت شد و در نهایت با استفاده از رابطه $B = 100 (W1 - W2) / W2$ درصد نفت در هر نمونه خاک محاسبه شد (B درصد نفت، W1 وزن اولیه و W2 وزن ثانویه).

اندازه‌گیری فعالیت آنزیم اوره‌آز

برای اندازه‌گیری فعالیت اوره‌آز از روش ایندوفنل-بلو^۱ استفاده شد (Tabatabai, 1994). ۲/۵ گرم از نمونه خاک (مرطوب) را به درون لوله‌های آزمایش حاوی ۹ میلی‌لیتر آب مقطر و ۱ میلی‌لیتر محلول اوره (۲۰۰ میلی‌مولار) ریخته و بعد از بهم زدن نمونه، برای فراهم ساختن دمای بهینه فعالیت آنزیم، لوله‌ها در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد در انکوباتور قرار گرفتند و به مدت ۲ ساعت در این شرایط نگهداری شدند. پس از انکوباسیون و خارج کردن نمونه‌ها از انکوباتور ۲۵ میلی‌لیتر KCl ۲ مولار به آنها اضافه شد و نیم ساعت شیک شده و سپس نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی، صاف شدند و از عصاره صاف‌شده، ۲۵ میلی‌لیتر برداشته و به آن ۲ میلی‌لیتر محلول فنل-سود و ۳ میلی‌لیتر هیپوکلریت سدیم ۲/۵٪ اضافه شد. مخلوط حاصل به مدت ۹۰ دقیقه به حال خود گذاشته شد تا تشکیل رنگ آبی تکمیل گردد. سپس مقدار جذب محلول های رنگی در طول موج ۶۳۰ نانومتر توسط دستگاه اسپکتروفتومتر مدل SU-6100 قرائت شد. با رسم منحنی کالیبراسیون برای محلول‌های استاندارد (تهیه شده از کلرید آمونیوم)، غلظت نمونه‌ها به دست آمد. محلول‌های مورد استفاده در این آزمایش (محلول فنل-سود و هیپوکلریت سدیم) بر اساس روش کار اندازه‌گیری فعالیت اوره‌آز به روش رنگ‌سنجی تهیه شد (Schinner, 2012).

تجزیه و تحلیل آماری

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی آشیانه‌ای (Nested) در سه تکرار انجام شد و داده‌ها از طریق نرم‌افزار آماری SPSS آنالیز شده و نمودارهای حاصله نیز از طریق نرم‌افزار Excel و SPSS ترسیم شدند. فاکتورهای در نظر گرفته شده در این پژوهش، ۴ منطقه نمونه‌برداری مختلف (Location 1، Location 2، Location 3 و Location 4) و ۳ سطح آلودگی (L، M و H) بود. ابتدا استانداردسازی داده‌ها انجام و داده‌های پرت حذف شدند. پیش از انجام هر آنالیز آماری ابتدا نرمال بودن داده‌های به دست آمده با استفاده از شاخص کلموگروف-اسمیرنوف (K-S) بررسی شد و برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده که دارای توزیع نرمال نبودند، با استفاده از روش تبدیل داده لگاریتمی نرمال شدند. به منظور بررسی تفاوت بین سطوح مختلف آلودگی (کم، متوسط و زیاد) و همچنین مناطق چهارگانه نمونه‌برداری از نظر تغییرات میزان ویژگی‌های اندازه‌گیری شده، تحلیل واریانس چندمتغیره و مقایسه میانگین با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۱٪ انجام شد. تحلیل همبستگی با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت. به منظور بررسی میزان تأثیرگذاری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده بر تنوع نمونه‌های خاک، از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با به کارگیری نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی

میانگین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است. غلظت نفت در نمونه‌های خاک از ۴/۰۳ درصد در خاک‌های L تا ۲۲/۵ درصد در خاک‌های H متغیر بود (جدول ۱). با توجه به درصدهای نفت اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک، به منظور تقسیم‌بندی ۱۲۰ نمونه خاک در سه گروه ۴۰ تایی (۴۰ نمونه L، ۴۰ نمونه M و ۴۰ نمونه H)، گروه بندی نمونه‌های خاک به صورت زیر انجام شد: ۷/۱-۰ درصد نفت، خاک‌های L، ۷/۱۲-۱۲/۹۴ درصد نفت، خاک‌های M و درصد نفت بیشتر از ۱۲/۹۴ درصد برای خاک‌های H در نظر گرفته شد. بیشترین میزان رطوبت (۱۴/۲۴ درصد) در خاک‌های منطقه ۴ و کمترین مقدار آن مربوط به خاک‌های منطقه ۱ (۶/۹۱ درصد) بود (جدول ۲). درصد Θ_m در خاک‌های H (۱۵/۷۹ درصد)، با اختلاف معنی‌دار بالاتر از خاک‌های L (۵/۵۷ درصد) و خاک‌های M (۱۱/۸۴ درصد) بود (جدول ۱). تجزیه و تحلیل پارامترهای فیزیکوشیمیایی نشان داد که میانگین pH خاک از ۷/۰۵ در خاک‌های L تا ۷/۳۶ در خاک‌های H متغیر بود (جدول ۱). بالاترین pH در منطقه ۳ (۷/۴۴) و پایین‌ترین آن در منطقه ۴ (۷/۰۷) اندازه‌گیری شد (جدول ۲). همانطور که نتایج نشان می‌دهد، EC در نمونه‌های خاک با آلودگی نفتی متفاوت از ۱/۷۱ dS/m (خاک H) تا

۷/۵۹ dS/m (خاک L) متغیر بود. حداکثر مقدار EC در منطقه ۳ و حداقل مقدار آن در منطقه ۲ مشاهده شد (جدول ۲). محتوای کربن آلی (OC) در نمونه‌های خاک از ۵/۰۵ تا ۲۰/۸۴ درصد بسیار متغیر بود (جدول ۱). همانطور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، درصد OC به طور قابل توجهی بین چهار منطقه مورد بررسی از ۸/۸۳ درصد در منطقه ۴ تا ۱۵/۹۶ درصد در منطقه ۱ متفاوت بود.

خاک‌های L دارای بالاترین درصد CCE (۹/۵۶ درصد) و خاک‌های H دارای پایین‌ترین درصد (۸/۷۴ درصد) بودند (جدول ۱). بیشترین میانگین درصد CCE در خاک‌های منطقه ۲ (۹/۹۱ درصد) و کمترین آن در خاک‌های منطقه ۱ (۸/۴۹ درصد) مشاهده شد. در ارزیابی بافت خاک‌های مورد بررسی، توزیع اندازه ذرات نشان داد که بین نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده در شیب آلودگی نفتی (L، M و H) از نظر درصد شن و سیلت تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و تنها درصد رس تفاوت معنی‌داری نشان داد (جدول ۱). درصد رس در خاک‌های L، (۲۳/۶۷ درصد) به طور معنی‌داری از خاک‌های H (۲۰/۷۹ درصد) بیشتر بود (جدول ۱).

تنفس پایه (BR) اندازه‌گیری شده نشان داد که منطقه ۳ با $0.052 \text{ mgCO}_2/\text{g.h}$ ، بیشترین و منطقه ۲ با $0.030 \text{ mgCO}_2/\text{g.h}$ ، کمترین مقادیر را به خود اختصاص دادند (جدول ۱) و همچنین چهار منطقه مختلف با هم اختلاف آماری معنی‌داری نشان دادند ($P < 0.01$) و در کلاس‌های آماری مختلف قرار گرفتند (جدول ۲). همچنین همبستگی مثبت و معنی‌داری بین تنفس پایه خاک و شمار جمعیت میکروبی رشدیافته در محیط کشت عمومی NA ($r = 0.684$ ، $P < 0.01$) و محیط کشت حاوی ترکیبات نفتی CFMM ($r = 0.502$ ، $P < 0.01$) مشاهده شد (جدول ۵). بالاترین میزان تنفس برانگیخته (SIR) نیز همانند تنفس پایه، متعلق به خاک‌های H بود. میزان تنفس برانگیخته، در خاک‌های با آلودگی زیاد (H)، متوسط (M) و کم (L) به ترتیب 0.234 ، 0.205 و $0.142 \text{ mgCO}_2/\text{g.h}$ بود. میانگین SIR اندازه‌گیری شده در هر سه غلظت آلاینده نفتی اختلاف آماری معنی‌داری ($P < 0.01$) نشان دادند (جدول ۱). مناطق ۱ و ۲ از نظر میزان SIR در یک کلاس آماری قرار گرفتند و بیشترین مقدار مربوط به منطقه ۱ ($0.210 \text{ mgCO}_2/\text{g.h}$) بود و منطقه ۳ با $0.184 \text{ mgCO}_2/\text{g.h}$ ، پایین‌ترین مقدار را به خود اختصاص داد اما به لحاظ آماری با منطقه ۴ اختلاف قابل توجهی نداشت (جدول ۲). نتایج به دست آمده نشان داد که SIR اندازه‌گیری شده با جمعیت میکروبی شمارش شده در محیط کشت عمومی NA ($r = 0.774$ ، $P < 0.01$) و همچنین با جمعیت میکروبی شمارش شده در محیط کشت CFMM نیز همبستگی مثبت و معنادار ($r = 0.845$ ، $P < 0.01$) وجود دارد (جدول ۵). در پژوهش حاضر نمونه خاک‌های مورد بررسی سال‌های زیادی تحت تأثیر آلاینده نفتی بوده‌اند و به عبارتی می‌توان گفت سازگاری لازم بین جوامع میکروبی و آلاینده نفتی ایجاد شده‌است. نتایج آزمایش

کشت عمومی برای رشد اکثر باکتری‌هاست، تعداد میکروب شمارش شده در آن بیشتر است اما محیط کشت CFMM محیط کشتی با حداقل عناصر غذایی است و تنها منبع کربن برای ریزجانداران خاک، کربن موجود در نفت افزوده شده در آن است و طبیعی است که شمار میکروبی کمتری در آن به‌دست آید زیرا باتوجه به تفاوت ذکر شده، تنها جوامع میکروبی با قابلیت تجزیه هیدروکربن‌های نفتی می‌توانند در آن رشد کنند. نتایج مطالعه ما نشان داد که جمعیت میکروبی در خاک‌های دارای آلودگی شدید بیشتر بود. تعداد کلنی‌های شمارش‌شده در خاک‌های با آلودگی شدید (H) با اختلاف آماری معنی‌دار ($P < 0.01$) بالاتر از خاک‌های دارای غلظت متوسط (M) و غلظت پایین نفت (L) بود (جدول ۳).

مربوطه در این پژوهش نشان داد که میزان CO_2 متصاعدشده ناشی از فعالیت تنفسی ریزجانداران (تنفس پایه و برانگیخته)، در حضور ماده نفتی بیشتر بود. همبستگی بالای بین تنفس پایه و میزان درصد نفت ($r = 0.766$ و $P < 0.01$) و همچنین همبستگی مثبت و معنی‌دار تنفس برانگیخته و درصد نفت ($r = 0.847$ و $P < 0.01$) گواهی بر این ادعاست (جدول ۵).

جمعیت میکروبی

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش نشان داد که جمعیت میکروبی شمارش شده در دو محیط کشت NA و CFMM، متفاوت بودند و مشاهده شد که فراوانی میکروبی در محیط کشت NA بیشتر از محیط کشت CFMM بود (جدول ۳). از آنجا که محیط کشت NA یک محیط

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی به دست آمده از نمونه‌های خاک با سه سطح آلودگی شدید (High)، متوسط (Moderate) و کم (Low)

Table 1- Some physicochemical and biological characteristics obtained from soil samples with three levels of high, moderate and low pollution

غلظت آلاینده نفتی Oil concentration	رطوبت Moisture Θ_m (%)	pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی OC (%)	کربنات-کلسیم معادل CCE (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	غلظت نفت Oil (%)	تنفس پایه BR ($mgCO_2/g.h$)	تنفس برانگیخته SIR ($mgCO_2/g.h$)
کم Low	5.57 ^c	7.05 ^c	7.59 ^a	5.05 ^c	9.56 ^a	44.96 ^a	28.67 ^a	23.67 ^a	4.03 ^c	0.023 ^c	0.142 ^c
متوسط Moderate	11.84 ^b	7.26 ^b	3.24 ^b	12.31 ^b	9.09 ^b	44.22 ^a	30.17 ^a	24.30 ^a	9.95 ^b	0.041 ^b	0.205 ^b
شدید High	15.79 ^a	7.36 ^a	1.71 ^c	20.84 ^a	8.74 ^b	49.35 ^a	28.2 ^a	20.79 ^b	22.5 ^a	0.053 ^a	0.234 ^a

درصد نفت (Oil)، تنفس پایه (Basal Respiration:BR)، تنفس برانگیخته (Substrate Induced Respiration:SIR)، درصد شن (Sand)، درصد رس (Clay)، درصد سیلت (Silt)، درصد کربنات کلسیم معادل (Carbonate Calcium Equivalent:CCE)، درصد کربن آلی (Organic Carbon:OC).

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی نمونه‌های خاک در چهار منطقه نمونه‌برداری

Table 2- Some physicochemical and biological characteristics of soil samples in four sampling locations

مناطق نمونه برداری Sampling locations	رطوبت Moisture Θ_m (%)	pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	کربن آلی OC (%)	کربنات-کلسیم معادل CCE (%)	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	غلظت نفت Oil (%)	تنفس پایه BR ($mgC O_2/g.h$)	تنفس برانگیخته SIR ($mgCO_2/g.h$)
منطقه ۱ Location 1	6.91 ^c	7.22 ^b	2.94 ^b	15.96 ^a	8.49 ^c	59.45 ^a	21.44 ^c	17.73 ^b	15.95 ^a	0.042 ^b	0.210 ^a
منطقه ۲ Location 2	10.31 ^b	7.20 ^b	2.67 ^b	14.63 ^a	9.91 ^a	48.69 ^b	30.29 ^b	16.32 ^b	12.62 ^b	0.030 ^d	0.200 ^a
منطقه ۳ Location 3	13.01 ^{ab}	7.44 ^a	5.43 ^a	12.57 ^b	9.44 ^b	43.92 ^b	27.02 ^{bc}	27.43 ^a	12.37 ^b	0.052 ^a	0.184 ^b
منطقه ۴ Location 4	14.24 ^a	7.07 ^c	5.31 ^a	8.83 ^c	8.69 ^c	33.31 ^c	37.01 ^a	29.68 ^a	8.78 ^c	0.034 ^c	0.186 ^b

درصد نفت (Oil)، تنفس پایه (Basal Respiration:BR)، تنفس برانگیخته (Substrate Induced Respiration:SIR)، درصد شن (Sand)، درصد رس (Clay)، درصد سیلت (Silt)، درصد کربنات کلسیم معادل (Carbonate Calcium Equivalent:CCE)، درصد کربن آلی (Organic Carbon:OC).

جدول ۳- جمعیت میکروبی شمارش شده (CFU/g) در محیط کشت های NA و CFMM در ۴ منطقه نمونه برداری و در سطوح مختلف آلودگی نفتی (High و Moderate، Low)

Table 3- Microbial population counted in NA and CFMM mediums in 4 sampling locations and at different levels of oil pollution (Low, Moderate and High)

مناطق نمونه برداری Sampling locations	محیط کشت Medium	غلظت آلاینده نفتی Oil concentration			
		کم Low	متوسط Medium	شدید High	میانگین Mean
منطقه ۱ Location 1	NA	5.06×10^5 d	1.13×10^6 a	1.12×10^6 a	9.37×10^5 A
منطقه ۲ Location 2		3.55×10^5 e	8.40×10^5 bc	9.46×10^5 ab	7.22×10^5 B
منطقه ۳ Location 3		2.85×10^5 e	7.07×10^5 c	8.12×10^5 bc	6.25×10^5 C
منطقه ۴ Location 4		1.60×10^5 f	3.67×10^5 e	6.98×10^5 c	3.31×10^5 D
میانگین Mean		3.28×10^5 C	6.48×10^5 B	9.54×10^5 A	
منطقه ۱ Location 1	CFMM	6.06×10^4 f	2.93×10^5 bc	4.54×10^5 bc	2.98×10^5 A
منطقه ۲ Location 2		1.81×10^5 d	6.61×10^5 a	2.52×10^5 c	3.34×10^5 A
منطقه ۳ Location 3		5.62×10^4 f	1.05×10^5 e	1.93×10^5 cd	1.26×10^5 B
منطقه ۴ Location 4		2.97×10^4 g	1.42×10^5 de	2.97×10^5 bc	1.20×10^5 C
میانگین Mean		8.11×10^4 C	2.53×10^5 B	3.11×10^5 A	

که در خاک های آلوده به نفت، تعداد OTU^۱ ها به طور قابل توجهی افزایش یافت. نتایج پژوهش آنها گویای این مطلب بود که برخی از گونه های تجزیه کننده هیدروکربن های نفتی در محیط آلوده به نفت، به دلیل انتخاب طبیعی غالب شده اند. محققان زیادی با بررسی تاثیرات آلاینده های نفتی بر جمعیت و فعالیت میکروبی نتایج مشابهی به دست آوردند (Hui et al., 2007; Margesin et al., 2007).

فعالیت آنزیم اوره آز

نتایج اندازه گیری فعالیت اوره آز حاکی از کاهش فعالیت این آنزیم در خاک های آلوده به نفت در مقایسه با خاک های دارای آلودگی کم بود. بالاترین فعالیت اوره آزی در خاک های L ($594/90 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) و پایین ترین میزان فعالیت در خاک های H ($176/11 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) به دست آمد (جدول ۴). در مقایسه ۴ منطقه مختلف نمونه برداری مشاهده شد که منطقه ۴ با $592/36 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$ بیشترین و منطقه ۱ با $242/36 \mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$ کمترین فعالیت اوره آزی را به خود اختصاص

جمعیت کل ریزجانداران خاک در اثر تنش های غیرزیستی نظیر آلاینده های نفتی و فقر غذایی، کاهش می یابند اما باکتری های تجزیه کننده نفت دچار تغییر نمی شوند. به عبارت دیگر آلودگی نفتی، موجب ایجاد شرایط انتخابی در خاک می شود به گونه ای که تنها ریزجاندارانی که قادر به استفاده از هیدروکربن های نفتی هستند از فراوانی بالاتری برخوردار باشند. در گزارشی (Liao et al., 2015) تاثیرات آلودگی نفتی بر ساختار و فعالیت میکروبی و عملکرد متابولیسم کربن توسط ریزجانداران را مورد مطالعه قرار دادند و بیان کردند که آلودگی نفتی طولانی مدت، به شدت ساختار و الگوی جامعه میکروبی خاک را تغییر داده و تغییرات میکروبی به لحاظ فراوانی، غنای باکتریایی، تنوع زیستی باکتریایی و عملکرد آنها به لحاظ آماری معنی دار بود. آنها دریافتند که بالا بودن فراوانی و تنوع میکروبی، رشد ریزجانداران هتروتروف که قابلیت تخریب هیدروکربن ها و استفاده از منابع غنی نفتی را دارند افزایش داده است. در تحقیقی که بر روی متاژنوم خاک های متأثر از آلودگی نفتی (Dos Santos et al., 2011) انجام شد، مشاهده کردند

بررسی فعالیت اوره‌آزی جدایه‌های میکروبی نشان داد که تنها ۶/۶ درصد آنها اوره‌آز مثبت بودند.

فعالیت اوره‌آز نسبت به سایر آنزیم‌های خاک، به آلودگی خاک حساس‌تر است و همچنین به‌عنوان حساس‌ترین شاخص بیوشیمیایی به‌منظور ارزیابی خاک‌های آلوده به نفت مورد توجه قرار گرفته‌است (Lee et al., 2012; Guo et al., 2015; Klamerus-Iwan et al., 2015). بنابراین مهار فعالیت اوره‌آز ممکن است نتیجه تأثیر مستقیم هیدروکربن‌های نفتی بر روی ریزجانداران تولیدکننده این آنزیم و یا یک نتیجه غیرمستقیم از خواص فیزیکی خاک باشد (Klamerus-Iwan et al., 2015). به‌عبارت دیگر این اثر منفی هیدروکربن‌های نفتی ممکن است به‌دلیل سرکوب یا کاهش جمعیت ریزجانداران درگیر در هیدرولیز اوره در خاک باشد زیرا هیدروکربن‌ها ممکن است سطوح آلی، معدنی و سلولی را بپوشانند و مانع از فعالیت آنزیم شوند (Guo et al., 2012; Labud et al., 2007). در پژوهش‌های زیادی نتایج مشابهی گزارش شده‌است و نتایج آنها بیانگر این است که آلودگی نفتی اثرات منفی بر فعالیت اوره‌آز خاک دارد (Labud et al., 2007; Guo et al., 2012; Klamerus-Iwan et al., 2015; Lipińska et al., 2012; Wyszkowska et al., 2012; Gianfreda et al., 2005). (2006).

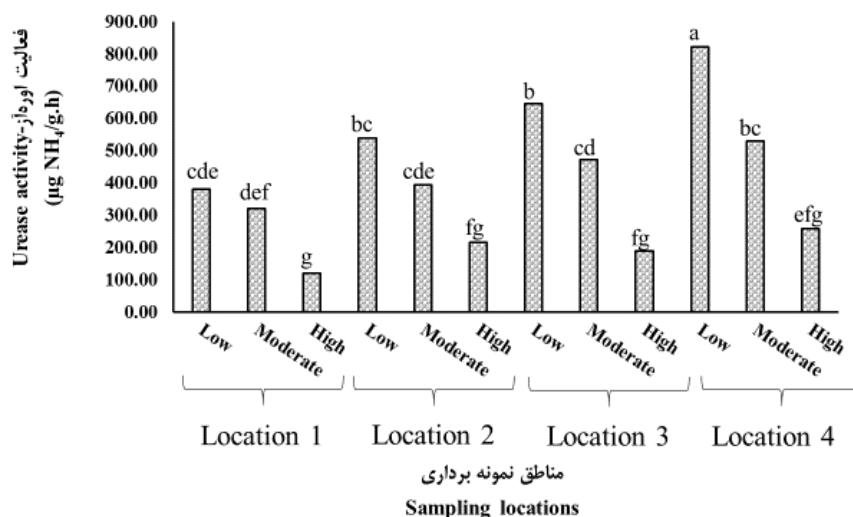
دادند (جدول ۴). در بخش اندازه‌گیری غلظت نفت نمونه خاک‌ها مشاهده شد که بالاترین درصد نفت به‌دست‌آمده متعلق به منطقه ۱ بود (جدول ۱) که پایین‌ترین میزان فعالیت اوره‌آزی را داشت.

همچنین اثرات متقابل غلظت آلودگی نفتی (Low, Moderate و High) و مناطق ۴ گانه نمونه‌برداری نشان داد که در همه مناطق خاک‌های L بالاترین و خاک‌های H پایین‌ترین فعالیت آنزیم اوره‌آزی را داشتند (شکل ۲). آنزیم اوره‌آز در خاک می‌تواند منشأ گیاهی، حیوانی و میکروبی داشته‌باشد (Andreoni et al., 2004). لذا فعالیت اوره‌آز در مناطقی که دارای پوشش گیاهی کم و یا فاقد پوشش گیاهی هستند کمتر است. نتایج آزمایش ما نشان داد که بین فعالیت اوره‌آز اندازه‌گیری شده و جمعیت میکروبی شمارش شده در هردو محیط کشت NA و CFMM با تنفس میکروبی پایه (BR) و برانگیخته (SIR)، همبستگی منفی معنی‌داری وجود دارد. این مطلب به وضوح نشان می‌دهد که فعالیت این آنزیم در این خاک‌ها تنها تحت تأثیر جوامع میکروبی خاک نیست و عوامل دیگری ممکن است نقش داشته‌باشند. هرچند در این آزمایش گونه‌های میکروبی رشد یافته در محیط CFMM جهت بررسی فعالیت اوره‌آزی مورد آزمون قرار نگرفتند اما به‌نظر می‌رسد که ریزجانداران غالب در حضور ترکیبات نفتی دارای فعالیت اوره‌آزی محدودی بوده و همین موضوع در نتایج این تحقیق نیز انعکاس یافته است. در مطالعه‌ای که با هدف جداسازی باکتری‌های اندوفیت محرک رشد گیاه از ریشه ذرت (Moradi et al., 2019) انجام شد، نتایج

جدول ۴- میانگین فعالیت آنزیم اوره‌آز در ۴ مکان نمونه‌برداری و سطوح مختلف آلودگی نفتی

Table 4- Average activity of urease in 4 sampling locations and different levels of oil pollution

مناطق نمونه‌برداری Sampling locations	فعالیت اوره‌آز ($\mu\text{gNH}_4/\text{g.h}$) Urease activity
منطقه ۱ Location 1	242.05 ^c
منطقه ۲ Location 2	368.80 ^b
منطقه ۳ Location 3	407.36 ^b
منطقه ۴ Location 4	592.36 ^a
غلظت آلاینده نفتی Oil concentration	
کم Low	594.90 ^A
متوسط Moderate	459.59 ^B
شدید High	176.11 ^C



شکل ۲- اثر متقابل مکان نمونه‌برداری و سطوح آلودگی نفتی بر فعالیت آنزیم اوره‌آز
Figure 2- Interaction of sampling location and oil pollution levels on urease enzyme activity

دیزل، آنزیم اوره‌آز است. همچنین در تحقیقی (Lipińska *et al.*, 2012) فعالیت اوره‌آز خاک‌های آلوده به PAH را مورد مطالعه قرار دادند که مشاهده کردند حضور PAHها موجب کاهش فعالیت اوره‌آز شده و افزایش غلظت این آلاینده‌ها در خاک، به دلیل نقش بازدارندگی، فعالیت اوره‌آز را کاهش داد.

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

در تحلیل مؤلفه‌های اصلی در این پژوهش، مقادیر ویژه بزرگ‌تر از ۱ در نظر گرفته شد و دو مؤلفه اول دارای مقدار ویژه بالاتر از ۱ بودند (شکل ۳) و نتایج تجزیه PCA نشان داد که ۷۱ درصد از واریانس تراکمی توسط دو مؤلفه اول (F_1 و F_2) قابل توجیه بود (شکل ۳ و جدول ۶). آنالیز PCA یک روش برای تجزیه و تحلیل داده‌های آماری چند متغیره است که در آن مجموعه‌ای از داده‌های خام به تعدادی از مؤلفه‌های اصلی (PCA) کاهش می‌یابد و بیشتر واریانس را در داده‌های اصلی حفظ می‌کند تا الگوها یا خوشه‌های احتمالی بین تیمارها و متغیرها را شناسایی کند (Cox *et al.*, 2003).

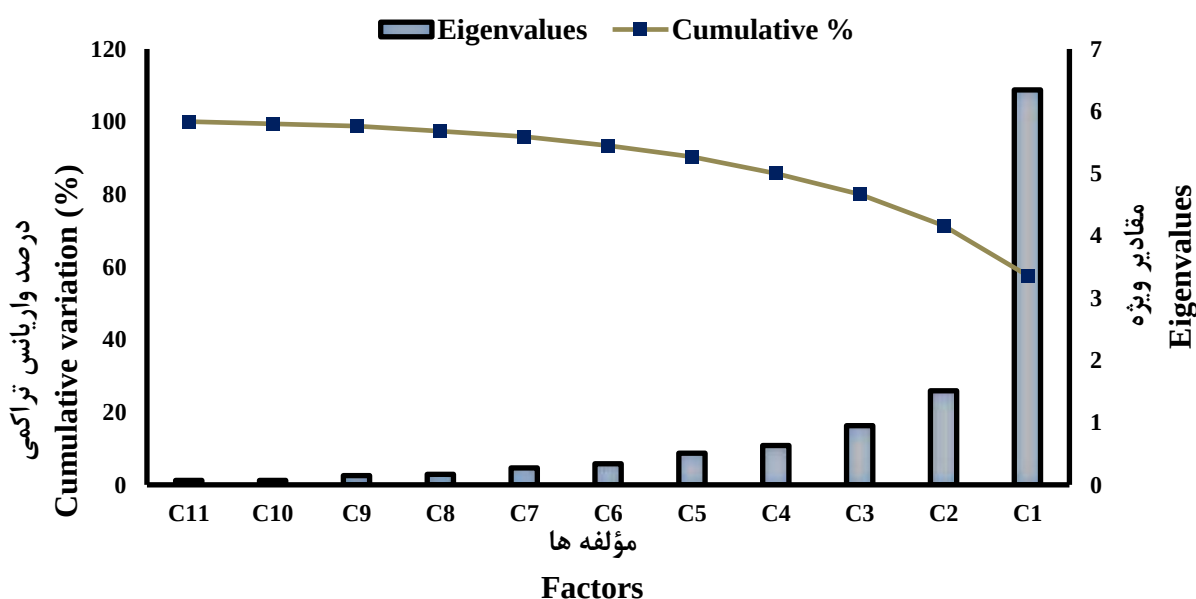
تحلیل PCA انجام شده در این پژوهش نشان داد که واریانس کل نمونه‌های خاک توسط ۱۱ مؤلفه به‌دست آمده قابل توجیه است به گونه‌ای که مؤلفه اول (F_1) به تنهایی ۵۷/۶۳ درصد از واریانس کل را توجیه کرد (جدول ۶). درصد واریانس تراکمی دو مؤلفه اول ۷۱/۳۲ درصد بود و به همین ترتیب برای سایر مؤلفه‌ها نیز در همین جدول قابل مشاهده است.

فعالیت اوره‌آز توسط عوامل مختلفی از جمله نوع آلاینده، مدت انکوباسیون خاک، pH، محتوای کربن آلی و تعداد حلقه‌های بنزن در هیدروکربن‌های نفتی تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Lipińska *et al.*, 2012). نوع آلاینده عامل بسیار مهمی در فعالیت اوره‌آز است. برخی محققان علی‌رغم نتایج به‌دست آمده در این پژوهش، افزایش فعالیت اوره‌آز را با افزایش غلظت نفت گزارش کرده‌اند. به عبارت دیگر سازگاری ریزجانداران خاک با آلودگی نفتی که طی مدت زیادی در خاک بوده است، منجر به انتخاب طبیعی و افزایش جمعیت میکروبی منتخب و استفاده از نفت به عنوان منبع کربن و انرژی شده‌است. بنابراین این افزایش جمعیت میکروبی ممکن است افزایش فعالیت اوره‌آز را نیز به دنبال داشته باشد. این نکته قابل ذکر است که افزایش جمعیت در نتیجه تطابق با شرایط آلودگی خاک، کل جمعیت میکروبی را شامل می‌شود در حالی که تنها بخشی از جوامع میکروبی فعالیت اوره‌آز دارند (Lipińska *et al.*, 2012). به نظر می‌رسد گرچه سازگاری جمعیت میکروبی در حضور آلاینده نفتی رخ داده است ولیکن جمعیت غالب از گونه‌های میکروبی غیرمولد اوره‌آز باشند، یا شاید ترکیبات نفتی به عنوان بازدارنده، اثر کاهشی بر فعالیت این آنزیم داشته‌اند. همچنین بسته به جرم مولکولی ترکیبات نفتی، فعالیت آنزیمی ممکن است مهار یا تحریک شود. ترکیباتی که ۲، ۳ یا ۴ حلقه بنزن دارند، به راحتی در دسترس ریزجانداران قرار می‌گیرند که موجب افزایش فعالیت آنها می‌شود (Lipińska *et al.*, 2012). گائو و همکاران (Guo *et al.*, 2012) تأثیرات آلودگی نفتی را بر فعالیت آنزیم اوره‌آز مورد بررسی قرار دادند. آنها به وضوح اثر منفی افزایش غلظت نفت را بر فعالیت اوره‌آز نشان دادند و گزارش کردند که حساس‌ترین شاخص زیستی به آلودگی نفت

جدول ۵- ضرایب همبستگی بین شاخص‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی اندازه‌گیری شده در نمونه‌های خاک
Table 5- Correlation coefficients between physicochemical and biological indicators measured in soil samples

	غلظت نفت Oil	محیط NA	محیط CFMM	تنفس پایه BR	تنفس برانگیخته SIR	فعالیت اوره‌آز UA	شن %Sand	رس %Clay	سیلت %Silt	کربنات- کلسیم معادل CCE	pH	قابلیت هدایت الکتریکی EC	کربن آلی OC
Oil	1												
NA	0.766	1											
CFM	0.707**	0.829**	1										
M	0.766**	0.684**	0.502**	1									
BR	0.766**	0.684**	0.502**	1									
SIR	0.847**	0.774**	0.845**	0.667**	1								
UA	-0.697**	-0.756**	-0.622**	-0.549**	0.562**	1							
Sand	0.041	0.223*	0.124	-0.072	0.104	-0.131	1						
Clay	-0.127	-0.370**	-0.441**	0.163	-0.230*	0.299**	-0.644**	1					
Silt	0.009	-0.146	-0.027	0.013	-0.023	0.094	-0.875**	0.370**	1				
CCE	-0.361**	-0.158	-0.093	-0.257**	-0.254**	0.186*	-0.004	-0.070	0.025	1			
pH	0.418**	0.478**	0.371**	0.615**	0.350**	-0.441**	0.016	-0.032	-	0.150	1		
EC	-0.769**	-0.728**	-0.664	-0.552**	-0.702**	0.718**	-0.167	0.291**	0.097	0.160	-0.502**	1	
OC	0.853	0.750**	0.660	0.611**	0.731**	-0.685**	0.153	-	0.265**	-0.299**	0.374**	-0.740**	1

درصد نفت (Oil)، تنفس پایه (Basal Respiration:BR)، تنفس برانگیخته (Substrate Induced Respiration:SIR)، درصد شن (Sand)، درصد رس (Clay)، درصد سیلت (Silt)، درصد کربنات کلسیم معادل (Carbonate Calcium Equivalent:CCE)، درصد کربن آلی (Organic Carbon:OC)، جمعیت میکروبی در محیط کشت NA (Microbial population counted in NA: NA)، جمعیت میکروبی در محیط کشت CFMM (Microbial population counted in CFMM: CFMM)، فعالیت آنزیم اوره‌آز (Urease activity:UA)، ** و * به ترتیب معنی‌دار در سطوح ۱ و ۵ درصد.



شکل ۳- نمودار واریانس تراکمی و مقادیر ویژه برای ۱۲۰ نمونه خاک از ۴ منطقه نمونه‌برداری
Figure 3- Cumulative and eigenvalues diagram for 120 soil samples from 4 sampling locations

این متغیر با سایر متغیرهای موجود در مؤلفه است و هرچه مقدار این متغیر افزایش یابد، تأثیرپذیری و اختلاف بین نمونه‌های خاک بر اثر آن متغیر کاهش می‌یابد. در حالی که علامت مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم با سایر متغیرهاست به عبارت دیگر با افزایش مقدار متغیری که ضریب مثبت دارد، تأثیرپذیری و اختلاف بین نمونه‌های خاک بر اثر آن

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود هر مؤلفه شامل تعدادی متغیر با ضرایب مختلف (بردارهای ویژه) است و هر متغیری که ضریب بالاتر از ۰/۵ داشته باشد در نظر گرفته می‌شود (Cox et al., 2003). در تحلیل PCA برخی از این متغیرها دارای ضریب منفی و برخی دارای ضریب مثبت هستند که علامت منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس بین

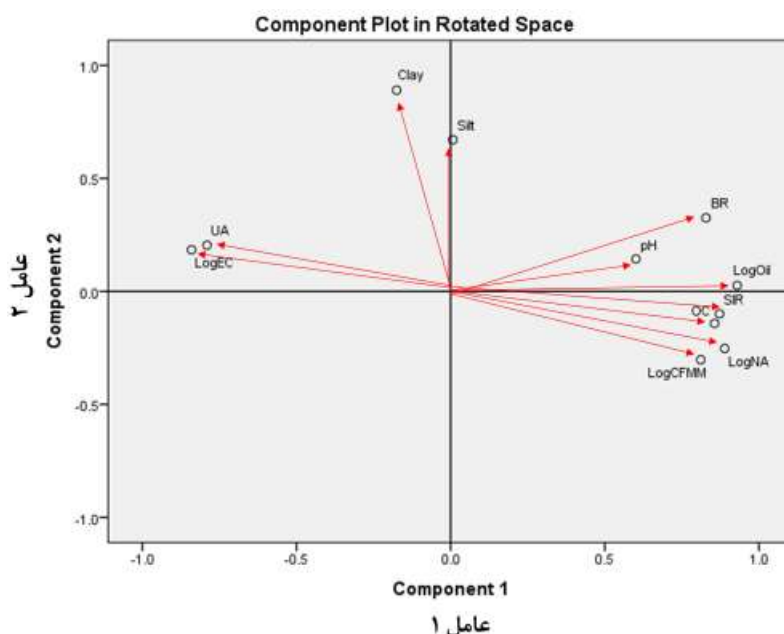
(Clay) و درصد سیلت (Silt) بالاترین تأثیر را به خود اختصاص دادند (جدول ۷). مؤلفه اول را می توان مؤلفه بیوشیمیایی نامید زیرا مقادیر بردارهای ویژه پارامترهای بیولوژیکی و شیمیایی بالا بودند و همچنین باتوجه به بالا بودن مقدار بردار ویژه درصد رس و سیلت، می توان مؤلفه دوم را مؤلفه فیزیکی نامید. همانطور که مشاهده می شود پارامترهای بیوشیمیایی به ویژه درصد نفت و جمعیت میکروبی منبع اصلی تنوع در داده ها هستند (جدول ۷). آنالیز PCA در پژوهش های زیادی در خاک های آلوده به نفت انجام شد که در اغلب آنها درصد نفت قوی ترین عامل تعیین کننده تنوع بین داده ها بود (Nie et al., 2009; Xiao et al., 2016).

متغیر نیز افزایش می یابد. در واقع می توان گفت منظور از تأثیرپذیری زیاد، اختلاف بیشتر بین مقادیر متغیرها در خاک های مختلف است که بیانگر تفاوت بین مناطق مختلف نمونه برداری است (جدول ۷). بر اساس نتایج به دست آمده، درصد نفت (Oil)، تنفس پایه (BR)، تنفس برانگیخته (SIR)، جمعیت میکروبی در محیط کشت NA و CFMM، میزان pH، EC، درصد کربن آلی (OC) و فعالیت اوره آز (UA) دارای بالاترین میزان بردار ویژه بودند و بیشترین تأثیر را در مؤلفه اول داشتند که همه این متغیرها به غیر از EC و UA دارای ضرایب مثبت بودند لذا می توان نتیجه گرفت که با افزایش این متغیرها، اختلاف بین نمونه های خاک نیز افزایش می یابد (جدول ۷). در مؤلفه دوم برخی ویژگی های فیزیکی اندازه گیری شده همچون درصد رس

جدول ۶- تجزیه به مؤلفه اصلی برای نمونه خاک های ۴ منطقه نمونه برداری

Table 6- PCA analysis for soil samples of 4 sampling locations

مؤلفه ها	درصد واریانس تراکمی	درصد واریانس
Factors	Cumulative	Variance (%)
F1	57.63	57.63
F2	71.32	13.69
F3	79.99	8.67
F4	88.71	5.72
F5	90.31	4.60
F6	93.43	3.12
F7	95.86	2.43
F8	97.38	1.51
F9	98.76	1.38
F10	99.40	0.64
F11	100	0.60



شکل ۴- پراکنش پارامترهای مورد بررسی بر اساس دو مؤلفه اول و دوم در تحلیل مولفه های اصلی

Figure 4- Distribution of investigated parameters based on the first and second components in principal components analysis

جدول ۷- مقادیر بردارهای ویژه پارامترهای مورد بررسی در تجزیه مولفه‌های اصلی (PCA)

Table 7- The values of the eigenvectors of the investigated parameters in the analysis of the PCA analysis

متغیرها Parameters	مؤلفه ۱ F1	مؤلفه ۲ F2
غلظت نفت Oil	0.913	0.175
تنفس پایه BR	0.766	0.454
تنفس برانگیخته SIR	0.877	0.042
جمعیت در محیط NA (NA)	0.914	-0.107
جمعیت در محیط CFMM (CFMM)	0.849	-0.169
رس %Clay	-0.316	0.851
سیلت %Silt	-0.100	0.663
pH	0.570	0.238
قابلیت هدایت الکتریکی EC	-0.859	0.047
کربن آلی %OC	0.868	-0.003
فعالیت اوره‌آز UA	-0.813	0.070

غلظت آلاینده روند کاهشی نشان داد و این بر خلاف سازگاری جمعیت میکروبی است، به نظر اثر کاهشی را یا می‌توان به اثر بازدارندگی ترکیبات نفتی بر فعالیت این آنزیم، یا به فقدان فعالیت اوره‌آزی در جمعیت غالب و حاکم در این خاکها نسبت داد. نوع آلاینده نفتی، تأثیر مستقیم ترکیبات نفتی بر ریزجانداران مولد اوره‌آز و همچنین منشأ غیرمیکروبی تولیدکننده اوره‌آز می‌تواند از دلایل احتمالی کاهش فعالیت اوره‌آز در خاک‌های آلوده باشند. نتایج آنالیزهای PCA نیز نشان داد که شاخص‌های بیوشیمیایی به‌ویژه درصد نفت، جمعیت میکروبی و فعالیت اوره‌آز، از مؤثرترین عوامل در تفاوت بین نمونه‌ها می‌باشد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه تبریز، دانشگاه رازی کرمانشاه و صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌شود.

همچنین (Klamerus-Iwan et al., 2015) اثرات آلودگی نفتی را بر فعالیت آنزیمی و خواص فیزیکی خاک مورد بررسی قرار دادند و در آنالیز مؤلفه‌های اصلی مشاهده کردند که ۷۱ درصد از تغییرات در مطالعه آنها به شدت با فعالیت آنزیم‌های دهیدروژناز و اوره‌آز و جمعیت میکروبی همبستگی داشت. همانطور که در شکل ۴ نیز مشاهده می‌شود، هر چه یک متغیر در نمودار بای‌پلات (Bi-plot)، فاصله بیشتری از مرکز داشته باشد، تأثیرگذاری بیشتری در تنوع داده‌های به‌دست آمده از نمونه‌های مختلف خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات صورت گرفته در این پژوهش که مربوط به یک آلودگی نفتی طبیعی و طولانی مدت بود، افزایش جمعیت باکتریایی را با افزایش شدت آلاینده نفتی نشان داد. به نظر در گذر زمان انتخاب طبیعی حاکم شده است و گونه‌های مقاوم و سازش یافته بر جمعیت حساس پیشی گرفته است. از طرف دیگر فعالیت اوره‌آز خاک با افزایش

منابع

1. Andreoni, V., Cavalca, L., Rao, M. A., Nocerino, G., Bernasconi, S., Dell'Amico, E., ... & Gianfreda, L. (2004). Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils. *Chemosphere*, 57(5), 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.06.013>
2. Christopher, S., Hein, P., Marsden, J., & Shurleff, A.S. (1988). Evaluation of methods 3540 (soxhlet) and 3550 (Sonication) for evaluation of appendix IX analyses from solid samples. S-CUBED, Report for EPA contract 68-03-33-75, work assignment No. 03, Document No (pp. 523-546). SSS.
3. Cox, J.F., Blackstone, J.H., & Schleier, J.G. (2003). *Managing operations: A focus on excellence*. North River Press.
4. Deaker, R., Kecskés, M.L., Rose, M.T., Amprayn, K., Ganisan, K., Tran, T.K.C., Vu, T.N., Phan, T.C., Nguyen, T.H., & Kennedy, I.R. (2011). *Practical methods for the quality control of inoculant biofertilisers*. Australian Centre for International Agricultural Research (ACIAR). Canberra. 101 pp
5. Dos Santos, H. F., Cury, J.C., Do Carmo, F.L., Dos Santos, A.L., Tiedje, J., van Elsas, J.D., ... & Peixoto, R.S. (2011). Mangrove bacterial diversity and the impact of oil contamination revealed by pyrosequencing: bacterial proxies for oil pollution. *PloS one*, 6(3), e16943. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016943>
6. Ebrahimi, M., Falah, M., & Sarikhani, M.R., (2013). Isolation and identification of some bacteria that decompose petroleum substances from soil contaminated with petroleum substances and checking their growth ability in the presence of gasoline. *Water and Soil Science*, 3(1), 109-121. (In Persian with English abstract)
7. Gianfreda, L., Rao, M.A., Piotrowska, A., Palumbo, G., & Colombo, C. (2005). Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment*, 341(1-3), 265-279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.10.005>
8. Guo, H., Yao, J., Cai, M., Qian, Y., Guo, Y., Richnow, H.H., ... & Ceccanti, B. (2012). Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic activity and urease activity. *Chemosphere*, 87(11), 1273-1280. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.034>
9. Hui, L.I., Zhang, Y., Kravchenko, I., Hui, X.U., & Zhang, C.G. (2007). Dynamic changes in microbial activity and community structure during biodegradation of petroleum compounds: a laboratory experiment. *Journal of Environmental Sciences*, 19(8), 1003-1013. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60163-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60163-6)
10. Klammerus-Iwan, A., Błońska, E., Lasota, J., Kalandyk, A., & Waligórski, P. (2015). Influence of oil contamination on physical and biological properties of forest soil after chainsaw use. *Water, Air, & Soil Pollution*, 226, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2649-2>
11. Labud, V., Garcia, C., & Hernandez, T. (2007). Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil. *Chemosphere*, 66(10), 1863-1871. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.08.021>
12. Lee, S.H., Oh, B.I., & Kim, J.G. (2008). Effect of various amendments on heavy mineral oil bioremediation and soil microbial activity. *Bioresource Technology*, 99(7), 2578-2587. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.04.039>
13. Liang, Y., Zhang, X., Zhou, J., & Li, G. (2015). Long-term oil contamination increases deterministic assembly processes in soil microbes. *Ecological Applications*, 25(5), 1235-1243. <https://doi.org/10.1890/14-1672.1>
14. Liao, J., Wang, J., Jiang, D., Wang, M.C., & Huang, Y. (2015). Long-term oil contamination causes similar changes in microbial communities of two distinct soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 10299-10310. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-6880-y>
15. Lipińska, A., Kucharski, J., & Wyszowska, J. (2013). Urease activity in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(5), 1393-1400.
16. Margesin, R., Hämmerle, M., & Tschierko, D. (2007). Microbial activity and community composition during bioremediation of diesel-oil-contaminated soil: effects of hydrocarbon concentration, fertilizers, and incubation time. *Microbial Ecology*, 53, 259-269. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9136-7>
17. Martin, A.E., & Reeve, R. (1955). A rapid manometric method for determining soil carbonate. *Soil Science*, 79(3), 187-198.
18. Moradi, S. H., Sarikhani, M. R., & Alliasgharzad, N. (2019). Isolation of endophytic bacteria from grasses root and assessing phosphate solubilization, potassium releasing and auxin production abilities of isolated bacteria. *Biological Journal of Microorganism*, 36(2020), 1-13. <https://doi.org/10.22108/bjm.2019.117674.1207>
19. Moreno, B., Nogales, R., Macci, C., Masciandaro, G., & Benitez, E. (2011). Microbial eco-physiological profiles to estimate the biological restoration of a trichloroethylene-contaminated soil. *Ecological Indicators* 11(6), 1563-1571. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.03.026>
20. Nie, M., Zhang, X.D., Wang, J.Q., Jiang, L.F., Yang, J., Quan, Z.X., ... & Li, B. (2009). Rhizosphere effects on soil bacterial abundance and diversity in the Yellow River Deltaic ecosystem as influenced by petroleum contamination and soil salinization. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(12), 2535-2542. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.012>

21. Phillips, L.A., Greer, C.W., Farrell, R.E., & Germida, J.J. (2009). Field-scale assessment of weathered hydrocarbon degradation by mixed and single plant treatments. *Applied Soil Ecology*, 42(1), 9-17. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.01.002>
22. Rao, M.A., Scelza, R., Acevedo, F., Diez, M. C., & Gianfreda, L. (2014). Enzymes as useful tools for environmental purposes. *Chemosphere* 107: 145-162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.12.059>.
23. Rowell, D.L. (1994). *Soil Science: Methods and Applications*. Longman, UK.
24. Saadoun, I., Mohammad, M.J., Hameed, K.M., & Shawaqfah, M.A. (2008). Microbial populations of crude oil spill polluted soils at the Jordan-Iraq desert (the Badia region). *Brazilian Journal of Microbiology*, 39, 453-456.
25. Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E., & Margesin, R. (Eds.). (2012). *Methods in soil biology*. Springer Science & Business Media.
26. Sutton, N.B., Maphosa, F., Morillo, J.A., Abu Al-Soud, W., Langenhoff, A.A., Grotenhuis, T., Rijnaarts, H.H., & Smidt, H. (2013). Impact of long-term diesel contamination on soil microbial community structure. *Applied and Environmental Microbiology*, 79(2): 619–630. <https://doi.org/10.1128/AEM.02747-12>
27. Tabatabai, M.A. (1994). Soil enzymes. *Methods of soil analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties*, 5, 775-833. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>
28. Trasar-Cepeda, C., Leiros, M.C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2000). Limitations of soil enzymes as indicators of soil pollution. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(13), 1867-1875. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00160-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00160-7)
29. Vincent, A.O., Felix, E., Weltime, M.O., Ize-iyamu, O.K., & Daniel, E.E. (2011). Microbial degradation and its kinetics on crude oil polluted soil. *Research Journal of Chemical Sciences*.
30. Wyszowska, J., Kucharski, M., & Kucharski, J. (2006). Application of the activity of soil enzymes in the evaluation of soil contamination by Diesel oil. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(3), 501-506.
31. Xiao, K.Q., Li, L.G., Ma, L.P., Zhang, S.Y., Bao, P., Zhang, T., & Zhu, Y.G. (2016). Metagenomic analysis revealed highly diverse microbial arsenic metabolism genes in paddy soils with low-arsenic contents. *Environmental Pollution*, 211, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.023>
32. Xu, J.G., & Johnson, R.L. (1995). Root growth, microbial activity and phosphatase activity in oil-contaminated, remediated and uncontaminated soils planted to barley and field pea. *Plant and Soil*, 173(1), 3-10. <https://doi.org/10.1007/BF00155512>

The Effect of Plantation Stands with Different Ages and Rangeland Cover on the Properties of Organic and Surface Soil Layer

Y. Kooch^{1*}, M. Tavakoli Feizabadi², K. Haghverdi³

1- Associate Professor, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

(*- Corresponding Author Email: yahya.kooch@modares.ac.ir)

2- Ph.D. Student of Forest Sciences, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran

3- Assistant Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran

Received: 04-05-2023
Revised: 27-09-2023
Accepted: 18-10-2023
Available Online: 21-10-2023

How to cite this article:

Kooch, Y., Tavakoli Feizabadi, M., & Haghverdi, K. (2023). The Effect of Plantation Stands with Different Ages and Rangeland cover on the Properties of Organic and Surface Soil Layer. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 701-720. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82251.1280>

Introduction

Soil, as habitat substrate, helps to regulate important ecosystem processes, including nutrient absorption, organic matter decomposition. Water availability and the well-being of humanity are directly linked to soil functions. On the other hand, vegetation with different species and ages have significant effects on the status of the surface soil layer through the creation of diverse environmental conditions and the production of different organic substances. However, few studies have been conducted in relation to the effect of the age of afforestation and the type of vegetation on the soil status. Considering that a practical, complete and effective assessment of soil condition should be the result of simultaneous measurement of physical, chemical and biological indicators, hereupon, the present study aimed to investigate the effect of 20-year old poplar stand, 20-year old maple stand, 10-year old poplar stand, 10-year old maple stand and rangeland cover, in plot 3 of Delak-Khil series of wood and paper forests in Mazandaran province, on the organic layer properties and physical, chemical and biological (including microbial activities, enzyme activity, earthworm population and biomass, the number of soil nematodes and root biomass) properties of the surface soil layer.

Materials and Methods

For this purpose, some parts of the study area were selected which are continuous with each other and have minimum height difference from the sea level, minimum change in percentage and direction of slope. Then, in order to take samples from the organic and surface layer of the soil, three one-hectare plots with distances of at least 600 meters were selected in each study habitats. From each of the one-hectare plots, 5 leaf litter samples and 5 soil samples (30 cm × 30 cm by 10 cm depth) were taken to the laboratory for analysis. In total, 15 litter samples and 15 soil samples were collected from each of the habitats under study. One part of the soil samples was passed through a 2 mm sieve after air-drying to perform physical and chemical tests, and the second part of the samples was kept at 4 °C for biological tests. One-way analysis of variance tests was used to compare the characteristics of organic layer and soil between the studied habitats. In the following, Duncan's test ($P > 0.05$) was used to compare the average parameters that had significant differences among different habitats.

Results and Discussion

The results of this research showed that afforested stands with different ages and pasture cover had a significant



©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.2023.82251.1280>

effect on the characteristics of the organic and surface soil layers. The results indicated the improvement of most of the characteristics of the organic and surface soil layer in the afforested stands, especially the 20-year old afforestation compared to the rangeland cover. The organic matter produced in 20-year old afforestation, especially with poplar species, had a higher quality (high nitrogen and carbon content and low carbon-to-nitrogen ratio) compared to organic matter produced in 10-year old afforestation and pasture cover. Most of the physicochemical characteristics of the soil under 20-year old afforestation were in a better condition than the other studied habitats. Also, according to the results of this research, the highest values of biological characteristics such as microbial activity, enzyme activity, and the population of earthworms and nematodes were observed in the subsoil of 20-year old afforestation especially with poplar species. Based on the results obtained from the principal component analysis, the higher values of nitrogen, phosphorus, calcium, magnesium and potassium content of the organic layer led to the improvement of soil fertility characteristics, microbial activities, enzyme activity, earthworm population, the number of soil nematodes and root biomass, respectively, under poplar and maple plantation for 20 years, meanwhile, 10-year old plantation, especially with maple species, and rangeland with the production of organic materials with high carbon content and carbon to nitrogen ratio, resulted in the reduction of organic matter decomposition (greater thickness of organic layer), and consequently the reduction of the mentioned properties of the surface soil layer.

Conclusion

According to the findings of this research, it can be concluded that plantation with poplar species, especially after 20 years, had a higher ability to improve the soil condition compared to maple, which can be considered by managers in future afforestation. Also, with the passage of time, the presence of tree covers (poplar and maple) had a higher priority than rangeland cover in improving the fertility status and suitable edaphological conditions of the soil.

Keywords: Enzyme activity, Maple, Organic acids, Poplar, Soil organisms

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۲۰-۷۰۱

اثر توده‌های جنگل کاری شده با سنین مختلف و پوشش مرتعی بر ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک

یحیی کوچ^{id*} - محمود توکلی فیض آبادی^۲ - کتابون حق وردی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۶

چکیده

پوشش‌های گیاهی با گونه‌ها و سنین متفاوت از طریق ایجاد شرایط محیطی متنوع و تولید مواد آلی مختلف اثرات قابل ملاحظه‌ای بر ویژگی‌های لایه سطحی خاک دارند. از این‌رو پژوهش حاضر به بررسی اثر توده‌های جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله، پلت ۲۰ ساله، صنوبر ۱۰ ساله، پلت ۱۰ ساله و پوشش مرتعی در قطعه ۳، سری دلاک خیل از جنگل‌های حوزه چوب و کاغذ مازندران بر ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک پرداخته است. بدین منظور در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه سه قطعه یک هکتاری انتخاب شدند و در هر یک از قطعات یک هکتاری، تعداد ۵ نمونه لاشبرگ و ۵ نمونه خاک (۱۵ نمونه لاشبرگ و ۱۵ نمونه خاک از هر رویشگاه) جهت تجزیه و تحلیل به آزمایشگاه منتقل شد. نتایج حاکی از بهبود اکثر ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک در توده‌های جنگل کاری شده به‌ویژه جنگل کاری‌های ۲۰ ساله در مقایسه با پوشش مرتعی بود. براساس نتایج مربوط به تجزیه مؤلفه‌های اصلی، مقادیر بالاتر محتوای نیتروژن، فسفر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم لایه آلی منجر به بهبود مشخصه‌های حاصلخیزی خاک، فعالیت‌های میکروبی، فعالیت آنزیمی، جمعیت کرم‌های خاکی، تعداد نماتدهای خاکی و زی‌توده ریزریشه، به‌ترتیب تحت جنگل کاری‌های صنوبر و پلت ۲۰ ساله شده است در حالی که جنگل کاری‌های ۱۰ ساله به‌ویژه با گونه پلت و پوشش مرتعی با تولید مواد آلی با محتوای بالای کربن و نسبت کربن به نیتروژن منجر به کاهش تجزیه مواد آلی (ضخامت بیشتر لایه آلی) و در نتیجه کاهش مشخصه‌های مذکور لایه سطحی خاک شدند. با توجه به یافته‌های این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که جنگل کاری با گونه صنوبر به‌ویژه پس از گذشت ۲۰ سال در مقایسه با پلت توانایی بالاتری در بهبود وضعیت خاک دارد که این موضوع می‌تواند در جنگل کاری‌های آینده مورد توجه مدیران قرار بگیرد. همچنین حضور پوشش‌های درختی (صنوبر و پلت) با گذشت زمان نسبت به پوشش مرتعی در بهبود وضعیت حاصلخیزی و شرایط مناسب اداپولوژیک خاک از الویت بالاتری برخوردارند.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی، پلت، صنوبر، فعالیت آنزیمی، موجودات خاکی

مقدمه

سلامت بشریت مستقیم با عملکردهای خاک گره خورده است (Page-
Dumroese, 2020). از طرفی انواع پوشش گیاهی درختی یا درختچه-
ای با ایجاد شرایط محیطی متفاوت و تولید مواد آلی با مقادیر و کیفیت
مختلف ویژگی‌های خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Kooch et al.,
2020). از این‌رو مطالعه ترکیب شیمیایی و میزان مواد آلی ورودی،
به‌منظور بررسی وضعیت خاک در رویشگاه‌های با پوشش‌های مختلف
اهمیت بسیاری دارد. ویژگی‌های مواد آلی اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های

شناخت روابط بین پوشش گیاهی و شرایط رویشگاهی در اکوسیستم‌های طبیعی، یکی از مهم‌ترین اهداف در مدیریت واحدهای اکوسیستم است (Grizzetti et al., 2019). خاک به‌عنوان بستر رویشگاه به تنظیم فرآیندهای مهم اکوسیستم شامل جذب مواد مغذی، تجزیه مواد آلی و قابلیت دسترسی آب کمک می‌کند و به‌زیستی و

۱- دانشیار گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: yahya.kooch@modares.ac.ir)

۲- دانشجوی مقطع دکتری علوم جنگل، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

۳- استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

میکروبی) برای تجزیه و تحلیل اثر عوامل محیطی و تنش‌های وارده بر جمعیت میکروبی خاک بهره‌گیری می‌شود (Vázquez et al., 2020). آنزیم‌ها، واکنش‌ها و فرآیندهای مختلف متابولیکی در چرخه زیست‌شیمیایی مواد غذایی خاک را کنترل می‌کنند (da Silva et al., 2012) و با توجه به اینکه در مقایسه با سایر ویژگی‌های خاک نسبت به تغییرات پوشش گیاهی و مدیریت اراضی سریعتر تغییر می‌کنند، به‌عنوان شاخصی از تغییرات بیولوژیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Meena & Rao, 2021). کرم‌های خاکی به‌عنوان مهم‌ترین ماکروفون خاک و جزء اصلی‌ترین موجودات خرده‌ریز خوار در اکوسیستم‌های طبیعی محسوب می‌شوند و بیشترین مقدار زی‌توده بی‌مهرگان خاک را به خود اختصاص می‌دهند (Edwards et al., 2004). کرم‌های خاکی با توجه به رفتارشان در خاک، محل زندگی شان، حفر بودن و تغذیه، به سه گروه اکولوژیک اپی‌ژئیک^۱، آنسئیک^۲ و اندوژئیک^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند (Lamandé et al., 2003). رویشگاه‌های با پوشش مختلف به‌طور مستقیم، از طریق تفاوت در محتوی مواد آلی خاک، کیفیت زیستگاه (میزان رطوبت، واکنش خاک، وضعیت عناصر غذایی)، اثر بر خاکشویی و شیوه مدیریت و به‌طور غیرمستقیم با تغییر ویژگی‌های خاک باعث تغییر فراوانی و ساختار جمعیت کرم‌های خاکی می‌شود (Tavakoli et al., 2018a). همچنین نماتدها نیز به‌عنوان فراوان‌ترین بی‌مهرگان از گروه مزوفون خاک هستند که در مطالعات مختلف جمعیت آن‌ها را شاخص ساختاری و عملکردی شبکه غذایی خاک معرفی کرده‌اند (Franco et al., 2017). توزیع و فراوانی نماتدهای خاکریز در رویشگاه‌های مختلف تحت تأثیر پارامترهای زیادی از جمله نوع پوشش گیاهی، مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، ضخامت لاشبرگ و نوع مدیریت قرار دارد (Sohrabi et al., 2022). بنابراین از آنجایی که موجودات خاکریز اهمیت بسزایی در فرآیندهای خاک دارند، جمعیت این موجودات شاخص مناسبی برای ارزیابی رویشگاه‌های مختلف به شمار می‌رود (Jochum et al., 2021). به‌طور کلی نوع کاربری و پوشش گیاهی بر ویژگی‌های خاک تأثیر می‌گذارند. از طرفی مطالعه تأثیر نوع کاربری و پوشش گیاهی بر نحوه عملکرد خاک در اکوسیستم از طریق ارزیابی شاخص‌های کیفیت خاک امکان پذیر است (Lal, 2004). با توجه به موارد مطرح شده، پژوهش‌های زیادی در ارتباط با اثر جنگل‌کاری‌ها بر کیفیت خاک انجام شده است. اما با توجه به اینکه موضوع کیفیت خاک یک امر پیچیده است، یک ارزیابی کاربردی، کامل و مؤثر کیفیت خاک باید حاصل از اندازه‌گیری همزمان شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی باشد (Sione et al., 2017)، که در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده است. همچنین با وجود اینکه سن توده جنگلی و نوع پوشش

خاک دارند به‌طوری که تغییرات ویژگی‌های فیزیکی خاک در اثر نوع پوشش اراضی و مواد آلی با ویژگی‌های مختلف نیازمند یک دوره بلند مدت می‌باشد (Soto et al., 2019). سرعت تغییرات ویژگی‌های شیمیایی خاک در رویشگاه‌های مختلف نیز وابسته به ویژگی‌های لایه آلی و سرعت آزادسازی مواد می‌باشد (Verma & Jayakumar, 2012). از این رو تفاوت گونه‌های گیاهی در جذب و تخصیص عناصر غذایی خاک به ذخیره زی‌توده خود موجب شده تا شناخت وضعیت تغذیه رویشگاه و نحوه چرخش مواد غذایی از فاکتورهای مهم در بررسی تغییر وضعیت کیفیت خاک تحت رویشگاه‌های مختلف باشد. اجزای ماده آلی خاک که شامل ترکیبات هیومیکی و غیر هیومیکی است نیز به‌عنوان یکی از مشخصه‌های مهم بیوشیمی خاک می‌تواند تحت تأثیر پوشش‌های گیاهی مختلف تغییرات معنی‌داری داشته باشد (Yesilonis et al., 2016). ترکیبات غیر هیومیکی، اشکال ناپایدار مواد آلی خاک را تشکیل می‌دهند که منبع اصلی انرژی برای میکروارگانیسم‌های خاک بوده و با تأثیر بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک، به‌ویژه تصاعد دی‌اکسید کربن، در پدیده گرمایش جهانی نقش بسیار مهمی دارند (Wang et al., 2013). ترکیبات هیومیکی از جمله اسیدهای فولیک و هیومیک نقش به‌سزایی در انحلال و آزادسازی عناصر غذایی ماکرو و میکرو خاک دارند و بخش قابل توجهی از کل کربن و نیتروژن آلی خاک را تشکیل می‌دهند (Guimaraes et al., 2013) و نسبت به ترکیبات غیر هیومیکی آلی ساختار پایداری دارند. در یک مطالعه (Kooch et al., 2022) به بررسی اثرات پنج کاربری مختلف شامل جنگل راش، جنگل کاری ون، جنگل کاری کاج سیاه، توده مخروطی و اراضی کشاورزی بر محتوای مواد آلی و ترکیبات هیومیکی آن پرداختند. نتایج آن‌ها حاکی از تفاوت معنی‌دار محتوای مواد آلی و ترکیبات هیومیکی در بین کاربری‌های مختلف بود.

خاک ارائه دهنده تنوع گسترده‌ای از خدمات اکوسیستمی است که تحت عنوان امکانات و خدمات اکوسیستمی تعریف می‌شود و به وسیله تعداد زیادی از موجودات زنده ارائه می‌شود. جامعه زنده خاک شامل دامنه وسیعی از موجودات از جمله، ماکروفون، مزوفون، میکروفون و میکروفولور است که در ارتباطی مستمر با یکدیگر، شبکه غذایی پیچیده خاک را تشکیل می‌دهند. در این بین، جمعیت میکروبی خاک نقش اساسی در چرخه عناصر غذایی، حاصل‌خیزی دراز مدت، جریان انرژی و حفظ سلامت و کیفیت خاک دارند (Cusack et al., 2011). از این رو ارزیابی ریزجانداران خاک می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای بررسی کیفیت بیولوژیک خاک به‌کار رود. برخی از ویژگی‌های میکروبی خاک شاخص‌های حساسی برای تعیین اثر متغیرهای محیطی بر فعالیت میکروبی خاک هستند و از این پارامترها (شامل تنفس میکروبی و زی‌توده

(سطح ۳۰ سانتی‌متر × ۳۰ سانتی‌متر تا عمق ۱۰ سانتی‌متری) در چهار گوشه و مرکز قطعه نمونه برداشت شد (Kooch & Noghre, 2020). به‌طور کلی در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه تعداد ۱۵ نمونه از لایه آلی و ۱۵ نمونه از لایه سطحی خاک برداشت و جهت انجام آزمایش به آزمایشگاه انتقال یافتند. بخشی از نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی، پس از هوا خشک شدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و بخش دوم نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های زیستی تا زمان آزمایش در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شد. ضخامت لایه آلی در عرصه با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد (Dechoum et al., 2015). محتوای کربن کل به روش احتراق (Nilsson et al., 1999) نیتروژن کل به روش معدنی‌سازی (Bremner, 1982)، فسفر لاشبرگ به روش السن (Olsen & Dean, 1965)، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لاشبرگ با استفاده از روش عصاره‌گیری مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند (Isaac & Johnson, 1975). روش توزین برای اندازه‌گیری رطوبت خاک مورد استفاده قرار گرفت (Tavakoli et al., 2018a). تخلخل خاک پس از اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Plaster, 2013) و جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتری (Blake & Hartge, 1986)، محاسبه شد (Pires et al., 2014). پایداری خاکدانه‌ها به روش یودر (Kemper & Rosenau, 1986) و بافت خاک به روش هیدرومتری (Jafari & Sarmadian, 2003) در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. واکنش و هدایت الکتریکی خاک به ترتیب با استفاده از pH متر و هدایت سنج اندازه‌گیری شد (Ghazanshahi, 2006). پس از اندازه‌گیری کربن آلی به روش والکی بلک (Allison, 1975) و نیتروژن کل به روش میکروکجدال (Bremner, 1982)، میزان ترسیب کربن از رابطه (۱) و ترسیب نیتروژن از رابطه (۲) (Wang & Dalal, 2006) به‌دست آمد.

$$\text{Cseq} = 10000 \times \%OC \times Pb \times E \quad (۱) \text{ معادله}$$

$$\text{Nseq} = 10000 \times \%N \times Pb \times E \quad (۲) \text{ معادله}$$

در روابط فوق، Cseq میزان کربن ترسیب شده به ازای یک متر مربع، OC درصد کربن آلی، Nseq میزان نیتروژن ترسیب شده به ازای یک متر مربع، N درصد نیتروژن کل، Pb وزن مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب) و E عمق نمونه خاک به سانتی‌متر می‌باشد.

فسفر قابل دسترس به وسیله اسپکتوفوتومتر و با استفاده از روش اولسن (Chapman & Pratt, 1962) و کلسیم، پتاسیم و منیزیم قابل جذب با استفاده از دستگاه جذب اتمی (Bower et al., 1952)، اندازه‌گیری شد. کربن و نیتروژن آلی ذره‌ای با روش کاهش وزن (Nelson & Sommers, 1983) به وسیله سوزاندن تعیین شد. پس از تعیین مقدار خاکدانه‌های میکرو (ذرات کوچکتر از ۰/۲۵ میلی‌متر) و ماکرو (ذرات بزرگتر از ۰/۲۵ میلی‌متر) به روش الک تر (Elliott &

گیاهی (جنگلی و مرتعی) پیش‌بینی کننده مهمی از عملکردهای اکوسیستم است (Zeng et al., 2014) و ممکن است بر کیفیت خاک منطقه تأثیر بگذارد، پژوهش‌های اندکی در ارتباط با تأثیر سن جنگل کاری‌ها و نوع پوشش گیاهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک انجام شده است. از این‌رو در پژوهش حاضر، ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) تحت جنگل کاری‌ها با سنبلین مختلف و رویشگاه مرتعی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این تحقیق در قطعه ۳ سری دلاک‌خیل از جنگل‌های حوزه چوب و کاغذ مازندران در محدوده ۳۰' ۰۰" ۵۳° تا ۳۰' ۴۰" ۵۳° طول شرقی و ۲۱' ۰۸" ۳۶° تا ۲۷' ۱۵" ۳۶° عرض شمالی انجام شد. قطعه ۳ این سری دارای مساحت ۷۴ هکتار بوده که حداقل ارتفاع از سطح دریا در آن ۱۹۰ متر و حداکثر آن ۴۲۰ متر می‌باشد. از آنجایی که این سری فاقد ایستگاه هواشناسی است لذا اطلاعات ۱۰ ساله نزدیکترین ایستگاه (ریگ‌چشمه) مورد استفاده قرار گرفت. متوسط دمای سالیانه ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط دما در گرمترین ماه سال (مرداد) ۲۹/۸ و در سردترین ماه سال (دی) ۱/۸ درجه سانتی‌گراد و متوسط باران سالیانه ۸۰۸ میلی‌متر است. اقلیم منطقه با استفاده از روش‌های دوما رتن و آمبرژه از نوع مرطوب می‌باشد. تبخیر خاک، قهوه‌ای شسته شده با افق کلسیک به عمق ۱۰۰ تا ۱۱۰ سانتی‌متر است (Mojarabi et al., 2011). محدوده قطعه ۳، شامل اراضی جنگل کاری شده (با فاصله کاشت ۲×۲ متر) با گونه‌های بلندمازو، توسکاییلاقی، پلت، ون، صنوبر و کاج بروسیا است. در مجاورت جنگل کاری‌ها، محدوده‌ای فاقد پوشش درختی وجود دارد که از ۲۰ سال پیش با گونه‌های مرتعی مختلف پوشیده شده است. پوشش‌های اراضی مورد مطالعه در این تحقیق شامل جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر، جنگل کاری ۲۰ ساله پلت، جنگل کاری ۱۰ ساله صنوبر، جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و محدوده مرتعی (با پوشش گیاهی آمیخته با سرخس زنگی دارو، نعنای چمنی، هفت‌بند خزری، آق‌طی، پنیرک و سرخس عقابی) می‌باشند.

نمونه‌برداری، تجزیه نمونه‌ها

پس از بررسی‌های اولیه و بازدیدهای میدانی، بخش‌هایی از اراضی محدوده مورد مطالعه انتخاب شد که به صورت پیوسته با هم بوده و دارای حداقل اختلاف ارتفاع از سطح دریا، حداقل تغییر درصد و جهت شیب می‌باشند. سپس به منظور نمونه برداری از لایه آلی و سطحی خاک، در هر یک از رویشگاه‌های مورد مطالعه سه قطعه یک هکتاری با فواصل حداقل ۶۰۰ متر انتخاب شدند. در هر یک از قطعه‌نمونه‌های یک هکتاری تعداد ۵ نمونه از لایه آلی و ۵ نمونه از لایه سطحی خاک

نتایج و بحث

اثر رویشگاه‌های مورد مطالعه بر ویژگی‌های لایه آلی

مقایسه ویژگی‌های لایه آلی حاکی از وجود تفاوت آماری معنی‌دار در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه است (جدول ۱). به‌طوری‌که بیشترین ضخامت، کربن و نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی اندازه‌گیری شد و جنگل کاری‌های ۲۰ ساله پلت و صنوبر کمترین این مقادیر را به خود اختصاص دادند در حالی که بیشترین مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم متعلق به جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله است و جنگل کاری‌های پلت ۲۰ ساله، صنوبر ۱۰ ساله، رویشگاه مرتعی و پلت ۱۰ ساله به ترتیب در جایگاه بعدی قرار دارند (جدول ۱). بر اساس مطالعات گذشته، نوع پوشش گیاهی مقدار و کیفیت مواد آلی ورودی، چرخه مواد غذایی خاک و خدمات اکوسیستم را به مقدار قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند (Aguilar-Fernández et al., 2020). با توجه به مطالعات انجام شده توسط برنهارد رورسات و همکاران (Bernhard-Reversat et al., 2001) و پارساپور و همکاران (Parsapour et al., 2018)، کمیت و کیفیت مواد آلی ورودی در جنگل کاری‌ها تحت تأثیر سن توده نیز تغییر می‌کند. بنابراین تغییرات در ویژگی‌های مواد آلی ورودی تحت رویشگاه‌های مختلف در تحقیق حاضر می‌تواند به دلیل تفاوت در نوع گونه، پوشش گیاهی و سنین مختلف باشد. همسو با نتایج تحقیق حاضر گالیندو و همکاران (Galindo et al., 2022) بیان کردند که رویشگاه‌های مختلف به دلیل داشتن پوشش گیاهی متنوع با تولید مواد آلی با ویژگی‌های متفاوت، ویژگی‌های خاک را به‌طور معنی‌داری تغییر می‌دهند. همچنین تفاوت در محتوای مواد مغذی در خاک رویشگاه‌های مورد مطالعه باعث تفاوت در جذب این مواد توسط گیاهان و انباشت آن در اندام‌های درختان می‌شود (Palm et al., 2001)، بنابراین در تحقیق حاضر کیفیت بالاتر مواد آلی در جنگل کاری‌های مسن‌تر را می‌توان در ارتباط با بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک تحت این جنگل کاری‌ها دانست (ویژگی‌های خاک در جنگل کاری‌ها با سنین بالاتر به‌ویژه صنوبر از وضعیت بهتری برخوردار بودند). با توجه به این‌که بیشترین ضخامت در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی اندازه‌گیری شد، می‌توان نتیجه گرفت که کاهش کیفیت لایه آلی تحت این رویشگاه‌ها باعث کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و سرعت تجزیه شده (Jacob et al., 2010)، که می‌توان علت ضخامت بیشتر لایه آلی در این رویشگاه‌ها را این‌گونه توجیه کرد.

(Cambardella, 1991)، روش والکی بلک برای اندازه‌گیری مقادیر کربن و نیتروژن موجود در خاکدانه‌های میکرو و ماکرو مورد استفاده قرار گرفت (Page et al., 1975). کربن و نیتروژن آلی محلول به وسیله دستگاه تجزیه کربن آلی (Shimadzu TOC-550A) مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Jones & Willett, 2006). معدنی شدن نیتروژن خاک طی فرآیند انکوباسیون آزمایشگاهی در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد اندازه‌گیری شد (Robertson et al., 1999). برای اندازه‌گیری اسیدهای آلی (فولویک و هیومیک) خاک از روش وزنی استفاده گردید (Ghazanshahi, 2006).

تنفس پایه و برانگیخته خاک با استفاده از روش بطری دربسته (Alef & Nannipieri, 1995) و کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی خاک به روش تدخین - استخراج اندازه‌گیری شد (Brookes et al., 1985). ضریب متابولیک (qCO_2)، از نسبت میزان تنفس پایه به کربن زی‌توده میکروبی خاک، سهم میکروبی ($qmic$)، با تقسیم میزان کربن زی‌توده میکروبی بر کربن آلی خاک و شاخص دسترسی کربن نیز از تقسیم میزان تنفس میکروبی پایه بر تنفس برانگیخته به‌دست آمد (Jia et al., 2005). برای سنجش فعالیت آنزیم‌های اوره‌آز، اسید فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز خاک روش انکوباسیون آزمایشگاهی (Alef & Nannipieri, 1995) به‌کار گرفته شد. کرم‌های خاکی بر اساس ویژگی‌های ظاهریشان (گروه‌های اکولوژیک اپیژئیک، آنسئیک و اندوژئیک) شناسایی (Asshoff et al., 2010) و سپس زی‌توده آن‌ها به تفکیک هر گروه در آزمایشگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت (Heydari et al., 2014). نماتدهای خاکی با استفاده از تکنیک قیف بیرمن و سانترفیوژ، جداسازی شدند (Liang et al., 2009). و در نهایت مقدار زی‌توده ریزریشه‌ها در متر مربع برای هر رویشگاه به‌دست آمد (Neatrou et al., 2005).

تجزیه آماری داده‌ها

قبل از انجام تجزیه و تحلیل، نرمالیت و همگنی واریانس داده‌ها به ترتیب با استفاده از تست کولموگروف اسمیرنوف و آزمون لون بررسی گردید. برای مقایسه ویژگی‌های لایه آلی و خاک بین رویشگاه‌های مورد مطالعه، آزمون تجزیه واریانس یکطرفه به‌کار گرفته شد. در ادامه آزمون دانکن ($P > 0.05$) برای مقایسه میانگین پارامترهای که در بین رویشگاه‌های مختلف تفاوت معنی‌داری داشتند مورد استفاده قرار گرفت. تمامی تجزیه و تحلیل‌های آماری در بسته نرم‌افزاری SPSS نسخه ۲۳ انجام گرفت. برای تعیین ارتباط ویژگی‌های لایه آلی با مشخصه‌های خاک تحت رویشگاه‌های مورد مطالعه، از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، با ایجاد ماتریس حاصله در برنامه PC-ORD، ورژن ۵، تحت ویندوز استفاده شد.

جدول ۱- تجزیه واریانس ویژگی‌های لایه آلی در رویشگاه‌های مورد مطالعه
Table 1- ANOVA for organic layer characteristics in the studied habitats

ویژگی‌های لایه آلی Organic layer properties	رویشگاه Habitats				تجزیه واریانس ANOVA		
	صنوبر ۲۰ ساله 20-years-old poplar	پلت ۲۰ ساله 20-years-old maple	صنوبر ۱۰ ساله 10-year-old poplar	پلت ۱۰ ساله 10-years-old maple	مرتج Rangeland	مقدار F F value	معنی‌داری Sig.
ضخامت Thickness (cm)	0.92 b±9.51*	1.31 c±6.98	1.25 c±6.10	1.85 a±14.36	2 a±13.43	89.40	0.000
کربن Carbon (%)	4.39 bc±38.18	4.73 c±37.25	3.12 ab±43.98	4.95 a±47.41	3.97 ±44.52 ab	3.89	0.006
نیتروژن Nitrogen (%)	0.30 a±2.20	0.61 b±1.77	0.05 c±1.04	0.1 d±0.74	0.11 d±0.78	63.62	0.000
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	4.39 c±17.51	7.70 c±25.52	6.98 b±42.29	8.67 a±64.95	8.71 a±58.29	34.23	0.000
فسفر Phosphorus (%)	0.41 a±3.95	0.33 a±3.75	0.48 b±3.01	0.74 c±2.09	0.54 b±2.76	30.92	0.000
پتاسیم Potassium (%)	0.31 a±1.96	0.33 ab±1.83	0.40 b±1.59	0.22 b±1.23	0.44 c±1.06	18.05	0.000
کلسیم Calcium (%)	0.62 a±2.13	0.55 b±1.53	0.14 c±1.10	0.16 d±0.64	0.16 d±0.73	36.39	0.000
منیزیم Magnesium (%)	0.17 a±0.75	0.14 b±0.62	0.17 bc±0.59	0.08 d±0.43	0.12 cd±0.49	10.79	0.000

آلی (کمترین میزان ضخامت لایه آلی به ترتیب به جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر و پلت تعلق داشت) و به دنبال آن بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک در مقایسه با سایر رویشگاه‌ها شده است. در صورتی که فعالیت کم‌تر موجودات خاکزی و در نتیجه کاهش سرعت تجزیه مواد آلی به دلیل کیفیت پایین لایه آلی در جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و رویشگاه مرتعی، وضعیت فیزیکی نامناسب خاک را به همراه داشته است. در راستای نتایج به دست آمده در این تحقیق، مطالعات نشان داده‌اند که، ویژگی‌های فیزیکی خاک از جمله محتوی رطوبت، ساختمان و تخلخل تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی تغییر می‌کنند که دلیل آن می‌تواند با تغییر در وضعیت فون خاک در ارتباط باشد (Augusto et al., 2002). موجودات خاک‌زی با جابجایی در خاک و ایجاد حفرات متعدد منجر به جابجایی اجزای تشکیل دهنده بافت در لایه‌های مختلف خاک و کاهش جرم مخصوص ظاهری می‌گردند. موجودات خاک‌زی به خصوص کرم‌های خاکی با انتقال ذرات رس و یا حتی سیلت در اندازه‌های ریز به بخش‌های مختلف خاک، موجب تغییرات معنی‌داری در اجزای تشکیل دهنده بافت لایه‌های مختلف می‌شوند (Kooch et al., 2014).

همچنین نتایج پژوهش حاضر (جدول ۳) نشان داد که جنگل کاری‌های انجام شده به‌ویژه با گونه صنوبر پس از گذشت ۲۰ سال مقادیر واکنش خاک، هدایت الکتریکی، کربن و نیتروژن خاک را در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه به‌طور معنی‌داری افزایش داد. جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی بالاترین مقدار نسبت کربن به نیتروژن را داشت در حالی که جنگل کاری‌های ۲۰ ساله صنوبر و پلت به ترتیب کمترین میزان نسبت کربن به نیتروژن را به خود اختصاص دادند.

اثر رویشگاه‌های مورد مطالعه بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس نشان دهنده تفاوت آماری معنی‌دار اکثر ویژگی‌های فیزیکی خاک در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه است (جدول ۲). نتایج به دست آمده نشان داد میزان رطوبت خاک در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه کمتر بود. بیشترین مقدار چگالی ظاهری به خاک رویشگاه مرتج تعلق داشت که از نظر آماری با جنگل کاری‌ها تفاوت داشتند. بیشترین مقادیر خاکدانه‌ای ریز و درشت و درصد رس به ترتیب در جنگل کاری‌های صنوبر و پلت ۲۰ ساله اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار سیلت به خاک تحتانی جنگل کاری پلت ۱۰ ساله تعلق داشت. مطابق با نتایج پژوهش حاضر، تغییر وضعیت پوشش گیاهی در رویشگاه‌های مختلف و به دنبال آن تغییر کمیت و کیفیت مواد آلی ورودی باعث تغییرات ویژگی‌های خاک تحتانی رویشگاه‌های مورد مطالعه شده است (Emiru & Gebrekidan, 2013). به‌طوری که کاهش معنی‌دار رطوبت خاک در جنگل کاری ۱۰ ساله صنوبر را می‌توان با ضخامت کمتر لایه آلی در این رویشگاه در ارتباط دانست (Benscoter et al., 2011). در همین راستا (Asiedu et al., 2013) در مطالعه خود بیان داشتند که محتوی رطوبت خاک با انباشتگی لایه آلی همبستگی مثبت دارد. همچنین ورود مواد آلی با کیفیت بهتر (مقدار نیتروژن و مواد غذایی بالاتر و کربن و نسبت کربن به نیتروژن پایین‌تر) در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر با در دسترس قرار دادن منابع غذایی مناسب‌تر باعث افزایش جمعیت موجودات خاکزی و سرعت تجزیه مواد

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه
Table 2- ANOVA for soil physical characteristics in the studied habitats

ویژگی‌های خاک Soil properties	رویشگاه Habitats				تجزیه واریانس ANOVA		
	صنوبر ۲۰ ساله 20-years-old poplar	پلت ۲۰ ساله 20-years-old maple	صنوبر ۱۰ ساله 10-year-old poplar	پلت ۱۰ ساله 10-years-old maple	مرتج Rangeland	مقدار F F value	معنی‌داری Sig.
رطوبت Moisture (%)	36.47± 2.44 a	33.94± 1.97 ab	29.51± 1.39 b	39.28± 2.92 a	36.81± 1.06 a	3.19	0.018
چگالی ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.31± 0.02 b	1.35± 0.03 b	1.33± 0.04 b	1.33± 0.05 b	1.50± 0.05 a	3.11	0.020
چگالی حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	2.40± 0.03 a	2.43± 0.07 a	2.39± 0.03 a	2.46± 0.07 a	2.50± 0.06 a	0.62	0.647
تخلخل Porosity (%)	0.45± 0.01 a	0.43± 0.02 a	0.43± 0.01 a	0.45± 0.02 a	0.39± 0.02 a	1.43	0.232
پایداری Stability (%)	72.81± 1.24 a	72.48± 2.64 a	69.29± 2.29 a	71.79± 1.29 a	69.58± 2.04 a	0.695	0.597
خاکدانه درشت Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	46.26± 3.57 a	40.86± 2.56 ab	35.01± 3.19 bc	31.06± 2.33 cd	23.06± 2.72 d	9.38	0.000
خاکدانه ریز Micro-aggregate (g kg ⁻¹)	29.26± 2.58 a	29.13± 2.86 a	21.13± 2.52 b	21.73± 2.91 ab	18.20± 1.72 b	3.85	0.006
شن Sand (%)	20.53± 1.20 b	19.60± 2.09 b	25.73± 1.13 ab	33.13± 3.65 a	25.60± 3.79 ab	4.16	0.004
سیلت Silt (%)	42.26± 2.36 bc	48.93± 2.18 a	45.20± 1.07 ab	37.86± 2.32 c	41.20± 3.02 bc	3.35	0.014
رس Clay (%)	37.20± 1.75 a	31.46± 1.24 ab	29.06± 1.44 b	29± 2.69 b	33.20± 2.42 ab	2.91	0.027

کیفیت مواد آلی ورودی و همچنین رطوبت خاک می‌تواند به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم ویژگی‌های شیمیایی خاک به ویژه مواد غذایی خاک را در رویشگاه‌های مختلف تحت تاثیر قرار دهد (Kooch *et al.*, 2022).

نوع پوشش گیاهی و گونه‌های گیاهی با تولید اسیدهای آلی مختلف حاصل از تجزیه مواد آلی (McCauley *et al.*, 2009) و تفاوت در جذب و تخصیص کاتیون‌های خاک به ذخیره زی‌توده خود (Finzi *et al.*, 1998)، باعث تغییرات معنی‌دار میزان واکنش خاک تحت رویشگاه‌های مورد مطالعه شده است. در این تحقیق تغییرات هدایت الکتریکی می‌تواند به‌دلیل اختلاف در ترکیبات بقایای گیاهی باشد و بسته به این که پوشش گیاهی دارای چه نوع ترکیبات شیمیایی باشد هدایت الکتریکی خاک نیز تغییر می‌کند. نتایج تحقیقات (Haghdoust *et al.*, 2011) نشان داد که، تغییرات هدایت الکتریکی خاک تحت پوشش‌های درختی مختلف، به‌دلیل اختلاف در مشخصه‌های شاخ و برگ درختان و کیفیت لاشبرگ آن‌ها می‌باشد. مطابق با مطالعات (Ye *et al.*, 2009) نوع گونه گیاهی و کیفیت مواد آلی ورودی، نقش بسزایی در میزان عناصر غذایی موجود در خاک دارد. آنچه از نتایج این تحقیق مشخص می‌شود این است که پوشش گیاهی مختلف اثرات معنی‌داری بر حاصلخیزی خاک و کیفیت مواد آلی دارند. در همین راستا (Mohamed *et al.*, 2003) در ارزیابی عناصر پر مصرف و کم‌مصرف در گونه‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که میزان غلظت عناصر از

حداقل مقادیر ترسیب کربن و نیتروژن نیز در جنگل کاری ۱۰ ساله پلت اندازه‌گیری شد. خاک تحتانی جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله و پلت ۱۰ ساله به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم را دارا بودند. کربن آلی ذره‌ای و نسبت کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای به‌طور معنی‌داری در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله بیشترین مقادیر را داشت، در حالی که جنگل کاری با گونه صنوبر پس از ۲۰ سال نیتروژن آلی ذره‌ای را به‌طور قابل توجهی در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه افزایش داد. حداقل میزان کربن در خاکدانه‌های درشت تحت جنگل کاری پلت ۱۰ ساله اندازه‌گیری شد که با سایر رویشگاه‌ها اختلاف معنی‌داری نشان داد. رویشگاه‌های مورد مطالعه اثر معنی‌داری بر مقادیر کربن در خاکدانه‌های ریز، نیتروژن در خاکدانه‌های ریز و درشت، کربن آلی محلول و نسبت کربن به نیتروژن آلی محلول نداشتند. اما حداکثر میزان نیتروژن آلی محلول در خاک تحتانی جنگل کاری‌های ۲۰ ساله صنوبر و پلت به ثبت رسید. همچنین مقادیر بالاتر معدنی شدن نیتروژن، آمونیوم، نیتрат و اسیدهای آلی فولویک و هیومیک نیز به‌ترتیب به جنگل کاری‌های ۲۰ ساله صنوبر و پلت اختصاص یافت (جدول ۳). به‌طور کلی هم‌راستا با نتایج مطالعات پیشین نتایج این تحقیق نشان داد که جنگل کاری با سنین و گونه‌های مختلف و همچنین رویشگاه مرتعی ویژگی‌های شیمیایی خاک را به‌طور معنی‌داری تغییر داده است که می‌تواند به‌دلیل ورود مواد آلی با ویژگی‌های متفاوت باشد. تغییر در میزان تراکم و نوع پوشش گیاهی، کمیت و

ماده آلی به داخل خاک منجر به افزایش کارایی ریزجاندانان شده و اسیدهای فولویک و هیومیک خاک را افزایش می‌دهند. با توجه به اینکه طی مراحل تجزیه مواد آلی، ابتدا اسید فولویک تولید و سپس با ادامه فعالیت میکروبی اسید فولویک به اسید هیومیک تبدیل می‌شود، همین عامل باعث ایجاد روند تقریباً یکسان در افزایش هم‌راستای اسید فولویک و اسید هیومیک در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله شده است.

اثر رویشگاه‌های مورد مطالعه بر ویژگی‌های زیستی خاک

نتایج مربوط به آنالیز فعالیت‌های میکروبی خاک حاکی از اثر معنی دار رویشگاه‌های مختلف بر ویژگی‌های مورد بررسی، به جز ضریب متابولیک و شاخص دسترسی به کربن، بود (جدول ۴). به‌طوری‌که بیشترین مقدار تنفس پایه و برانگیخته به جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله تعلق داشت و رویشگاه مرتع کمترین این مقدار را داشت.

همچنین نتایج این تحقیق نشان داد که رویشگاه مرتعی باعث کاهش معنی‌دار مقدار کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی شده است در حالی که حداکثر مقدار کربن و نیتروژن زی‌توده میکروبی به‌ترتیب به جنگل کاری‌های ۲۰ ساله پلت و صنوبر تعلق داشت. مقدار نسبت زی‌توده میکروبی کربن به نیتروژن تحت جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر به‌طور معنی‌داری کاهش یافت و میزان سهم میکروبی در خاک تحتانی جنگل کاری پلت ۱۰ ساله در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه افزایش معنی‌داری داشت (جدول ۴). نتایج آنالیز فعالیت‌های آنزیمی حاکی از تفاوت آماری معنی‌داری فعالیت آنزیم اوره‌آز، اسید فسفاتاز و اینورتاز در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه بود در حالی‌که آنزیم آریل سولفاتاز از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری در بین رویشگاه‌های مورد بررسی نشان نداد (جدول ۴). مطابق با نتایج پژوهش حاضر، جنگل کاری با گونه‌های پهن برگ صنوبر و پلت با گذشت مدت زمان ۲۰ سال توانسته فعالیت‌های آنزیمی (اوره‌آز، اسید فسفاتاز و اینورتاز) خاک را به‌طور معنی‌داری بهبود دهد در حالی‌که در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی کاهش معنی‌دار فعالیت آنزیم‌های خاک مشاهده شد (جدول ۴). عوامل مختلفی می‌توانند در تغییرپذیری فعالیت‌های بیولوژیکی خاک در کاربری‌های مورد مطالعه به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذار باشند. جمعیت‌های میکروبی خاک به شدت تحت تأثیر نوع و میزان مواد آلی ورودی به خاک قرار دارند (Marzi et al., 2020) و از آنجایی که حساسیت زیادی به تغییرات وضعیت خاک (Luo et al., 2020) نشان می‌دهند، از آن‌ها به‌عنوان شاخص‌های عملکردی خاک در بسیاری از مطالعات استفاده شده است (Di Carlo et al., 2019; Ghosh et al., 2020; Stott, 2019).

یک گونه به گونه دیگر و در گونه‌های یکسان نیز با سنن مختلف، متفاوت می‌باشد. در یک مطالعه (Gilliam & Dick, 2010) نیز بیان داشتند که تنوع گیاهی و درصد پوشش رابطه معنی‌داری با میزان کلسیم، منیزیم و واکنش خاک دارند. افزایش ذخیره‌سازی کربن و نیتروژن می‌تواند بر حاصلخیزی خاک و باروری اکوسیستم تأثیر بسزایی داشته باشد. با توجه به نتایج حاصل از مطالعه (Garten, 2002)، ترسیب کربن خاک با ماده آلی، محتوی رطوبت و درصد سیلت و رس همبستگی دارد. همچنین (Vahedi et al., 2014) نسبت کربن به نیتروژن، فسفر قابل جذب، نیتروژن و مقدار رس را از مهم‌ترین عامل‌های مؤثر در پیش‌بینی ذخایر کربن خاک دانسته‌اند. بنابراین پایین بودن میزان ترسیب کربن در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله می‌تواند با مقادیر پایین درصد سیلت، رس، نیتروژن و فسفر در این رویشگاه در ارتباط باشد.

در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه، جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر بالاترین ذخیره نیتروژن را به خود اختصاص داد که به نوعی نشان دهنده تأثیر بهتر گونه صنوبر و گذشت زمان بر انباشتگی نیتروژن خاک است. این افزایش را می‌توان به دلیل بالا بودن میزان پوشش گیاهی و حجم زیاد ریشه در جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر دانست (Sharrow & Ismail, 2004). از طرفی کاهش ذخیره نیتروژن خاک در رویشگاه مرتعی و جنگل کاری پلت ۱۰ ساله به دلیل کاهش کیفیت و مقدار نیتروژن درمواد آلی ورودی تحت این رویشگاه بود. تغییرات مقادیر کربن آلی ذره‌ای، نیتروژن آلی ذره‌ای و نسبت کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای (POC/PON) می‌تواند به‌دلیل تغییر در کربن آلی و نیتروژن کل خاک و همچنین تغییرات عناصر غذایی تحت رویشگاه‌های مختلف باشد (Jiao et al., 2020). مطابق با مطالعه (Fouché et al., 2020) افزایش نیتروژن آلی محلول تحت جنگل کاری‌های ۲۰ ساله صنوبر و پلت می‌تواند با مقادیر بالای نیتروژن لایه آلی و سطحی در این رویشگاه‌ها در ارتباط باشد. نوع پوشش گیاهی همچنین می‌تواند اثرات معنی‌داری بر تغییرپذیری مقادیر آمونیوم و نترات خاک داشته باشد. در همین خصوص مرور منابع (Li et al., 2014; Wang & Wang, 2006) بیانگر اثرات مثبت پوشش‌های درختی بر انباشت محتویات آمونیوم و نترات خاک می‌باشد. با توجه به اینکه، این مشخصه‌های خاک در ارتباط مستقیم با مقادیر نیتروژن کل و واکنش خاک می‌باشند (Li et al., 2014)، بنابراین افزایش مقادیر آمونیوم و نترات در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه صنوبر، می‌تواند به واسطه تجمع بیشتر نیتروژن و مقادیر بالاتر واکنش خاک در خاک تحتانی این رویشگاه‌ها باشد. بالا بودن کیفیت لایه آلی و تجزیه شدیدتر آن، اسیدهای آلی خاک را به‌طور معنی‌داری در جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر افزایش داده است. در همین راستا، (Seighalani et al., 2015) بیان کردند که افزایش

جدول ۳- تجزیه واریانس ویژگی‌های شیمیایی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه
Table 3- ANOVA for soil physical characteristics in the studied habitats

ویژگی‌های خاک Soil properties	رویشگاه Habitats					تجزیه واریانس ANOVA	
	صنوبر ۲۰ ساله 20-years-old poplar	پلت ۲۰ ساله 20-years-old maple	صنوبر ۱۰ ساله 10-year-old poplar	پلت ۱۰ ساله 10-years-old maple	مرتع Rangeland	مقدار F F value	معنی‌دار ی Sig.
واکنش pH	7.17± 0.12 a	7± 0.31 ab	6.94± 0.24 ab	6.27± 0.87 b	6.69± 0.53 c	7.32	0.000
هدایت الکتریکی EC (dS/m)	0.31± 0.01 a	0.28± 0.01 a	0.22± 0.01 bc	0.18± 0.02 c	0.24± 0.01 b	13.16	0.000
کربن C (%)	4.67± 0.27 a	4.29± 0.30 a	4.62± 0.35 a	3.43± 0.44 a	4.38± 0.27 a	2.19	0.078
نیتروژن Total N (%)	0.49± 0.02 a	0.40± 0.02 b	0.40± 0.02 b	0.22± 0.02 d	0.29± 0.01 c	19.32	0.000
نسبت کربن به نیتروژن C/N ratio	9.49± 0.17 c	10.68± 0.45 bc	11.46± 0.67 b	14.85± 0.87 a	14.99± 0.68 a	16.28	0.000
ترسیب کربن C sequestration (Mg ha ⁻¹)	61.10± 3.33 ab	57.48± 3.73 ab	62.48± 5.71 ab	47.55± 8.32 b	66.12± 4.56 a	1.69	0.160
ترسیب نیتروژن N sequestration (Mg ha ⁻¹)	6.49± 0.34 a	5.42± 0.33 ab	5.52± 0.52 ab	3.03± 0.35 c	4.43± 0.28 b	12.12	0.000
فسفر قابل استفاده Available P (mg kg ⁻¹)	29.20± 2.06 a	22.30± 1.47 b	18.46± 1.39 b	12.18± 1.89 c	18.12± 1.30 b	14.36	0.000
پتاسیم قابل استفاده Available K (mg kg ⁻¹)	400.13± 18 a	345.91± 19.71 a	279.80± 13.72 b	202.66± 26.95 c	240.6± 27.51 bc	13.28	0.000
کلسیم قابل استفاده Available Ca (mg kg ⁻¹)	275.33± 22.73 a	218.90± 10.72 b	191.93± 10.2 bc	157.40± 15.19 c	203.40± 9.63 b	8.82	0.000
منیزیم قابل استفاده Available Mg (mg kg ⁻¹)	56.53± 1.74 a	54.03± 1.44 b	46.36± 1.52 b	38.40± 3.83 d	44.06± 1.73 c	10.68	0.000
کربن آلی ذره‌ای Particulate organic C (mg kg ⁻¹)	2.86± 0.22 b	3.14± 0.11 b	2.99± 0.20 b	3.87± 0.35 a	2.54± 0.24 b	4.18	0.004
نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic N (mg kg ⁻¹)	0.50± 0.01 a	0.44± 0.03 ab	0.37± 0.03 b	0.36± 0.05 b	0.37± 0.03 b	2.88	0.028
کربن به نیتروژن آلی ذره‌ای Particulate organic C/N ratio	5.88± 0.68 b	7.57± 0.54 b	9.10± 1.14 b	14.25± 2.55 a	7.31± 0.81 b	5.67	0.000
کربن در خاکدانه درشت C in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.37± 0.04 a	0.35± 0.03 a	0.34± 0.03 a	0.37± 0.04 a	0.23± 0.02 b	2.70	0.037
کربن در خاکدانه ریز C in Micro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.23± 0.06 a	0.22± 0.02 a	0.18± 0.04 a	0.20± 0.05 a	0.18± 0.01 a	0.94	0.451
نیتروژن در خاکدانه درشت N in Macro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.21± 0.02 a	0.14± 0.02 a	0.16± 0.04 a	0.20± 0.01 a	0.18± 0.02 a	0.91	0.461
نیتروژن در خاکدانه ریز N in Micro-aggregate (g kg ⁻¹)	0.11± 0.02 a	0.18± 0.03 a	0.11± 0.02 a	0.10± 0.05 a	0.10± 0.01 a	1.06	0.378
کربن آلی محلول Dissolved organic C (mg kg ⁻¹)	61.54± 4.10 a	60.46± 4.69 a	57± 5.85 a	58.50± 5.35 a	48.28± 4.18 a	1.15	0.336
نیتروژن آلی محلول Dissolved organic N (mg kg ⁻¹)	35.52± 1.60 ab	42.03± 2.10 a	30.51± 2.36 bc	29.40± 1.10 c	26.94± 1.98 c	5.37	0.000
کربن به نیتروژن آلی محلول Dissolved organic C/N ratio	1.80± 0.17 a	1.78± 0.21 a	2.24± 0.43 a	2.03± 0.21 a	2.09± 0.32 a	0.51	0.725
معدنی شدن نیتروژن N mineralization (mg N kg soil ⁻¹)	47.37± 2.39 a	39.36± 1.78 ab	38.85± 1.71 ab	35.71± 3.63 b	38.94± 3.73 ab	2.41	0.046
آمونیم NH ₄ (mg kg ⁻¹)	39.42± 3.14 a	31.35± 2.80 ab	26.97± 3.29 b	29.74± 3.73 b	29.92± 1.86 b	2.41	0.046
نیترات NO ₃ (mg kg ⁻¹)	39.54± 3.45 a	34.78± 2.53 a	26.30± 2.06 b	21.95± 1.71 b	27.27± 1.65 b	8.80	0.000
اسید فولوئیک Fulvic acid (mg g ⁻²)	456.40± 29.55 a	376.26± 37.4 ab	346.7± 28.02 bc	399.8± 34.77 ab	247.13± 33.82 c	4.18	0.004
اسید هیومیک Humic acid (mg g ⁻²)	261± 18.43 a	240.86± 35.40 a	101.06± 5.53 b	140.20± 13.89 b	126.26± 11.54 b	13.31	0.000

متابولیک و شاخص دسترسی به کربن) را به‌طور معنی‌دار تغییر داد. در تأیید نتایج این مطالعه، تحقیق (Palansooriya *et al.*, 2019) نشان

در همین راستا تغییرات در کمیت و کیفیت مواد آلی ورودی در رویشگاه‌های مورد مطالعه، فعالیت‌های میکروبی خاک (به جز ضریب

نیتروژن آلی محلول (DON)، فعالیت آنزیم‌های خاک را افزایش داده است، در حالی که ورود مواد آلی با کیفیت پایین با کاهش عناصر حاصلخیزی خاک باعث افت فعالیت‌های آنزیمی در جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و رویشگاه مرتعی شده است. همراستا با نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر، گزارش‌های مشابهی مبنی بر همبستگی قوی تغییرات فعالیت‌های آنزیمی با تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (Zhang *et al.*, 2021) و حاصلخیزی خاک (Wenxiang *et al.*, 2002) در رویشگاه‌های مختلف ارائه شده است.

مطابق با نتایج، در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله، به‌ویژه صنوبر، بیشترین تراکم و زی‌توده کرم‌های خاکی مشاهده شد که از لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با سایر رویشگاه داشت (شکل ۱). در بین گروه‌های اکولوژیک کرم خاکی، گروه اکولوژیک اپی‌ژئیک نسبت به گروه‌های اکولوژیک آنسئیک و اندوژئیک، تراکم و زی‌توده بالاتری در همه رویشگاه‌های مورد مطالعه داشت (شکل ۱). جمعیت نامندهای خاکزی نیز در بین رویشگاه‌های مختلف از نظر آماری معنی دار بود به‌طوری که بیشترین جمعیت نامندها در جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله و کمترین آن در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله ثبت رسید (شکل ۲).

داد که تفاوت در ویژگی‌های شیمیایی خاک، به‌ویژه pH، نیتروژن کل و مواد مغذی در دسترس خاک از دلایل تغییرات فعالیت‌های میکروبی خاک تحت رویشگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. به علاوه مطابق با نتایج (Tardy *et al.*, 2014)، کاهش حاصلخیزی خاک می‌تواند تأثیر منفی روی مقادیر تنفس پایه و تنفس برانگیخته داشته باشد که در نتایج این پژوهش نیز مشاهده شد. آنزیم‌ها در مقایسه با سایر ویژگی‌های خاک نسبت به تغییرات پوشش گیاهی و مدیریت اراضی سریعتر تغییر می‌کنند، از این رو به‌عنوان شاخصی از تغییرات بیولوژیک خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند (Lee *et al.*, 2020). با این حال همه آنزیم‌های خاک تحت تأثیر تغییر پوشش گیاهی به یک اندازه و در یک جهت تغییر نمی‌کنند و ممکن است برخی از آن‌ها در مقایسه با دیگر آنزیم‌ها تغییرات بیشتر یا کمتری را نشان دهند (Wang *et al.*, 2012). در همین راستا نتایج مطالعه حاضر نشان داد که فعالیت‌های آنزیمی خاک (به جز آنزیم آریل سولفاتاز) به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر نوع پوشش گیاهی اراضی تغییر می‌کنند. جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه با گونه صنوبر به‌دلیل ورود مواد آلی با کیفیت بالاتر و بهبود مقادیر واکنش خاک (Cheng *et al.*, 2013)، نیتروژن کل، مواد غذایی در دسترس (فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم)، نیتروژن آلی ذره‌ای (PON) و

جدول ۴- تجزیه واریانس فعالیت میکروبی/آنزیمی خاک در رویشگاه‌های مورد مطالعه
Table 4- ANOVA for soil microbial/ biochemical activity in the studied habitats

فعالیت میکروبی/ بیوشیمی خاک Soil microbial/biochemical activity	رویشگاه Habitats				تجزیه واریانس ANOVA		
	صنوبر ۲۰ ساله 20-years-old poplar	پلت ۲۰ ساله 20-years-old maple	صنوبر ۱۰ ساله 10-year-old poplar	پلت ۱۰ ساله 10-years-old maple	مرتج Rangeland	مقدار F F value	معنی‌داری Sig.
تنفس میکروبی BR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	0.47± 0.02 a	0.40± 0.01 a	0.38± 0.03 a	0.39± 0.04 a	0.29± 0.03 b	3.92	0.006
تنفس میکروبی برانگیخته SIR (mg CO ₂ g ⁻¹ day ⁻¹)	1.46± 0.04 a	1.31± 0.06 b	1.17± 0.02 b	1.18± 0.06 b	0.99± 0.04	11.37	0.000
کربن زی‌توده میکروبی MBC (mg kg ⁻¹)	573.46±36.63 ab	605.73± 30.01 a	511.46±21.78bc	532.60± 23.85 b	456.06± 28.28 c	4.05	0.005
نیتروژن زی‌توده میکروبی MBN (mg kg ⁻¹)	67.76± 1.36 a	55.95± 2.07 b	52.44± 2.94 b	44.10± 2.88 c	41.48± 2.87 c	17.38	0.000
کربن به نیتروژن زی‌توده میکروبی MBC/MBN ratio	8.58± 0.65 b	11.16± 0.84 a	10.16± 0.72 ab	12.52± 0.66 a	11.91± 4.59 a	3.42	0.012
ضریب متابولیک qCO ₂ (BR/MBC)	0.88± 0.08 a	0.68± 0.04 a	0.78± 0.08 a	0.76± 0.09 a	0.64± 0.07 a	1.43	0.232
سهم میکروبی Microbial ratio (MBC/C _{org})	126.16± 8.04 b	146.60± 7.81 b	120.44± 11.12 b	191.39± 24.03 a	110.69± 10.71 b	5.45	0.000
شاخص دسترسی به کربن CAI (BR/SIR)	0.32± 0.01 a	0.31± 0.01 a	0.33± 0.03 a	0.33± 0.04 a	0.30± 0.04 a	0.138	0.967
آنزیم اوره‌از Urease (μg NH ₄ ⁺ -N g ⁻¹ 2 h ⁻¹)	22.65± 1.21 a	22.60± 0.57 a	14.45± 0.74 b	14.14± 0.95 b	14.07± 0.86 b	26.30	0.000
آنزیم اسید فسفاتاز Acid phosphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	528.06± 44.26 a	457.8± 25.25 ab	415.13± 34.37 b	299.66± 16.76 c	306.2± 7.73 c	12.47	0.000
آنزیم آریل سولفاتاز Arylsulphatase (μg PNP g ⁻¹ h ⁻¹)	214.26± 17.95 a	175.26± 17.03 a	163.46± 16.82 a	184.06± 13.79 a	197.6± 20.14 a	1.30	0.277
آنزیم اینورتناز Invertase (μg Glucose g ⁻¹ 3 h ⁻¹)	281.66± 14.51 a	257.06± 17.12 a	231.2± 13.95 ab	191.33± 25.32 b	191.06± 12.64 b	5.34	0.000

مفید بوده و مواد آلی با کربن بالاتر منبع نامطلوبی برای نماتدها خاک به‌شمار می‌آیند. بر همین اساس کاهش جمعیت نماتدها در خاک تحتانی جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و رویشگاه مرتعی را می‌توان با کاهش کیفیت لاشبرگ در این رویشگاه‌ها در ارتباط دانست. مرور مطالعات قبلی (Hirschfeld *et al.*, 2020; Sánchez-Moreno *et al.*, 2006) نشان می‌دهد که علاوه بر ویژگی‌های لایه آلی و میکروکلیم، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک نیز می‌توانند جمعیت موجودات خاکزی را تحت تأثیر قرار دهند. در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله (به‌ویژه صنوبر)، جایی که خاک از نظر فیزیکی وضعیت مناسب‌تری داشت موجودات خاکزی تراکم بیشتری را نشان دادند در حالی که در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی این وضعیت کاملاً برعکس بود. همچنین مطالعات گذشته pH خاک و تغییرات آن را از عوامل مهم کنترل میزان فعالیت موجودات خاکزی معرفی کرده‌اند (Moslehi & Nazari, 2012; Peng *et al.*, 2022). نتایج این تحقیق نشان داد که فعالیت موجودات خاکزی در جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر با pH بالاتر، بیشتر از فعالیت آن‌ها در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی با pH پایین‌تر بود. در تأیید نتایج این تحقیق (Schelfhout *et al.*, 2017) عنوان کردند که برخی از مشخصه‌های خاک از جمله pH می‌تواند بر پراکنش و حضور کرم‌های خاکی اثرگذار باشند. همچنین افزایش pH خاک نقش مثبتی در افزایش تراکم نماتدها (Matute, 2013) در رویشگاه‌های مختلف دارد.

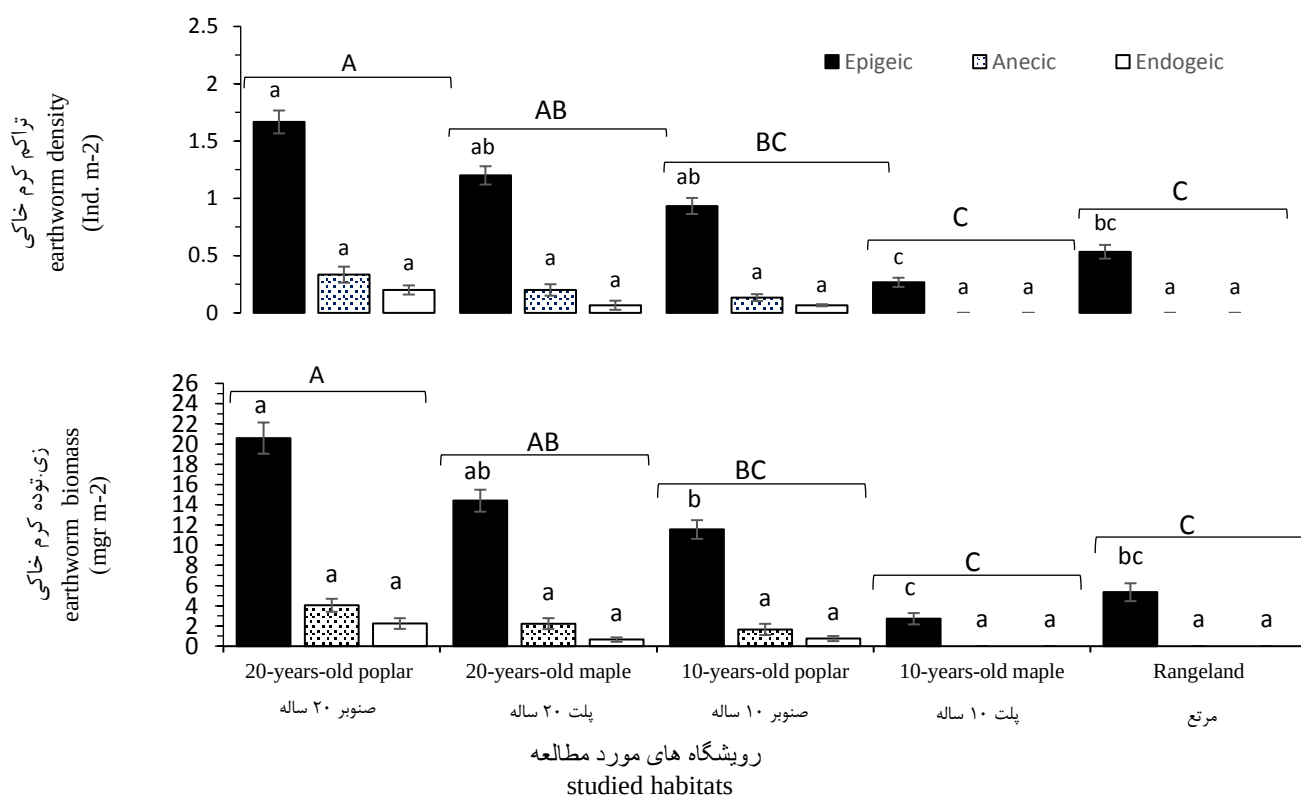
ویژگی‌های مربوط به حاصلخیزی خاک از جمله نیتروژن خاک، فسفر، کلسیم، پتاسیم و منیزیم قابل دسترس نیز می‌تواند بر تراکم و فعالیت موجودات خاکزی مؤثر باشند (Klimek *et al.*, 2015; Tao *et al.*, 2016). مطابق با نتایج مطالعه حاضر حاصلخیزی بالای خاک در جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر به دلیل ورود مواد آلی با کیفیت بالاتر، در مقایسه با جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و رویشگاه مرتعی با خاک فقیر (به دلیل ورود مواد آلی بی کیفیت)، تراکم موجودات خاکزی را به طور معنی داری افزایش داده است. بنابراین می‌توان عنوان کرد که تغییرات حاصلخیزی خاک یکی از فاکتورهای مهم تأثیرگذار بر تغییرات فعالیت کرم‌های خاکی (Crumsey *et al.*, 2014) و نماتدها (Sun *et al.*, 2013) در رویشگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. مطابق با نتایج این پژوهش زی‌توده ریز ریشه تغییرات معنی داری را در بین رویشگاه‌های مورد مطالعه نشان داد و به ترتیب در جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله، پلت ۲۰ ساله، صنوبر ۱۰ ساله، پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی بیشترین مقدار را داشت. تفاوت در نوع گونه، سن و نوع پوشش گیاهی از دلایل تغییرات مقدار ریز ریشه در رویشگاه‌های مورد مطالعه است (Yuan & Chen, 2010). به طوری که جنگل کاری‌های ۲۰ ساله با افزایش رشد و گسترش ریشه‌های خود در مقایسه با جنگل کاری‌های ۱۰ ساله، زی‌توده ریز ریشه بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند همچنین رویشگاه مرتعی

حداکثر زی‌توده ریشه نیز به ترتیب به جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله < پلت ۲۰ ساله < صنوبر ۱۰ ساله < پلت ۱۰ ساله < رویشگاه مرتع، تعلق داشت و تفاوت معنی داری از لحاظ آماری در بین رویشگاه‌ها مشاهده شد (شکل ۲). تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای تعیین ارتباط رویشگاه‌های مورد مطالعه و ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳). تمایز قابل ملاحظه‌ای در مشخصات خاک بین کاربری‌های مختلف مشاهده شد. مؤلفه‌های اول و دوم به ترتیب ۲۱/۱۳ و ۹/۰۳ درصد از تغییرات واریانس کل را توجیح می‌کند (شکل ۳). مشخصه‌های حاصلخیزی خاک و ویژگی‌های زیستی خاک در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه جنگل کاری با گونه درختی صنوبر بالاترین مقدار را دارند و در ارتباط مستقیم با مقادیر نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم لایه آلی بودند در حالی که با مقادیر کربن، نسبت کربن به نیتروژن و ضخامت لایه آلی رابطه منفی نشان داد. همچنین کاهش کیفیت لایه آلی (مقادیر بالای کربن، نسبت کربن به نیتروژن لایه آلی)، تجمع لایه آلی و کاهش کیفیت خاک در رویشگاه مرتع و جنگل کاری پلت ۱۰ ساله را به دنبال داشت (شکل ۳). لایه آلی به دلیل فراهم آوردن زیستگاه و منبع غذایی برای فعالیت موجودات خاکزی بسیار ضروری است (Sofa *et al.*, 2020) از این رو کیفیت مواد آلی، که یکی از عوامل مهم در چرخه عناصر غذایی می‌باشد، نقش بسزایی در میزان فعالیت موجودات خاکزی دارد (Erdmann *et al.*, 2012).

در همین راستا مطالعات مختلفی (Li *et al.*, 2014; Menta, 2019; Nanganoa *et al.*, 2012) تغییرات ویژگی‌های مواد آلی ورودی در رویشگاه‌های مختلف را از عوامل تغییرات جمعیت موجودات خاکزی دانسته‌اند. مطابق با نتایج جدول ۱، لایه آلی در جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله از کیفیت بالاتری (نیتروژن و مواد غذایی بالاتر، نسبت کربن به نیتروژن کمتر) در مقایسه با سایر رویشگاه‌ها برخوردار است، بنابراین انتظار می‌رود افزایش فعالیت موجودات خاکزی در جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر به دلیل کیفیت بالای لایه آلی به عنوان منبع غذایی تحت این رویشگاه باشد. در حالی که جنگل کاری ۱۰ ساله پلت و رویشگاه مرتعی به ترتیب با تولید مواد آلی با محتوای نیتروژن پایین و نسبت کربن به نیتروژن بالاتر، جمعیت موجودات خاکزی را به شدت کاهش داد. در تأیید نتایج تحقیق حاضر، (Tavakoli *et al.*, 2018a) به این نتیجه رسیدند که اکثر کرم‌های خاکی محیط‌های با مواد غذایی غنی و لاشبرگ‌هایی که کیفیت بالاتری دارند را ترجیح می‌دهند. بررسی کرم‌های خاکی در رویشگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که بیشترین جمعیت و زی‌توده کرم‌های خاکی متعلق به جنگل کاری صنوبر ۲۰ ساله بود که می‌تواند با مواد آلی با کیفیت تحت این رویشگاه در ارتباط باشد. مطابق با یافته‌های ژائو و همکاران (Zhao *et al.*, 2021)، مواد آلی خوش خوراک با مواد غذایی غنی‌تر برای نماتدهای خاکزی

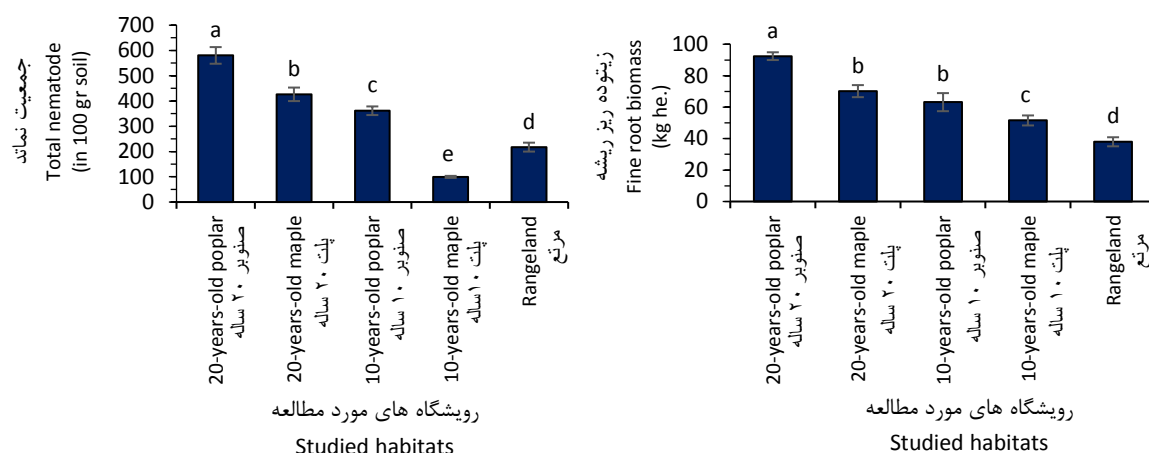
در خاک تحتانی رویشگاه مرتع و جنگل کاری پلت ۱۰ ساله از دیگر عوام کاهش زی توده ریزریشه در این رویشگاه‌ها می‌باشد. مطابق با نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی (شکل ۳) جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه با گونه صنوبر با تولید مواد آلی با کیفیت ویژگی‌های لایه سطحی خاک را به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده است در حالی که کیفیت پایین مواد آلی ورودی در جنگل کاری پلت ۱۰ ساله و رویشگاه مرتعی نتوانسته است ویژگی‌های حاصلخیزی و فعالیت‌های زیستی خاک را مشابه با جنگل کاری‌های ۲۰ ساله بهبود ببخشد. به‌طور کلی می‌توان عنوان کرد که تغییرات سن جنگل کاری‌ها، نوع گونه‌های گیاهی و پوشش‌های گیاهی متفاوت با ایجاد شرایط و تولید مواد آلی مختلف، اثرات معنی‌داری بر ویژگی‌های خاک به‌عنوان جزء مهمی از اکوسیستم دارد.

به دلیل عدم وجود گونه‌های درختی، زی توده ریزریشه به شدت کاهش یافته است. از دلایل دیگر مشاهده زی توده ریزریشه‌ها در لایه سطحی مورد بررسی خاک جنگل کاری صنوبر ممکن است واکنش ریشه در پاسخ به وفور عناصر غذایی در لایه بالایی خاک باشد، چراکه ریزریشه های گیاهان جهت دسترسی بیشتر به عناصر غذایی مورد نیاز خود در سطح بیشتری از خاک گسترش می‌یابند (Sayer et al., 2006). در تایید نتایج حاصل از این پژوهش، پژوهش‌های متعددی به نقش حاصلخیزی خاک در افزایش زی توده ریزریشه در خاک سطحی رویشگاه‌های مختلف اشار کرده‌اند (Augusto et al., 2015; Helmissaari et al., 2009; Noguchi et al., 2005; Qiu et al., 2015). همچنین برخی از مطالعات گزارش نموده‌اند که زی توده ریزریشه در عرصه‌های اسیدی در مقایسه با عرصه‌های متعادل تر کمتر است (Yuan & Chen, 2010). بنابراین کاهش معنی‌دار واکنش خاک



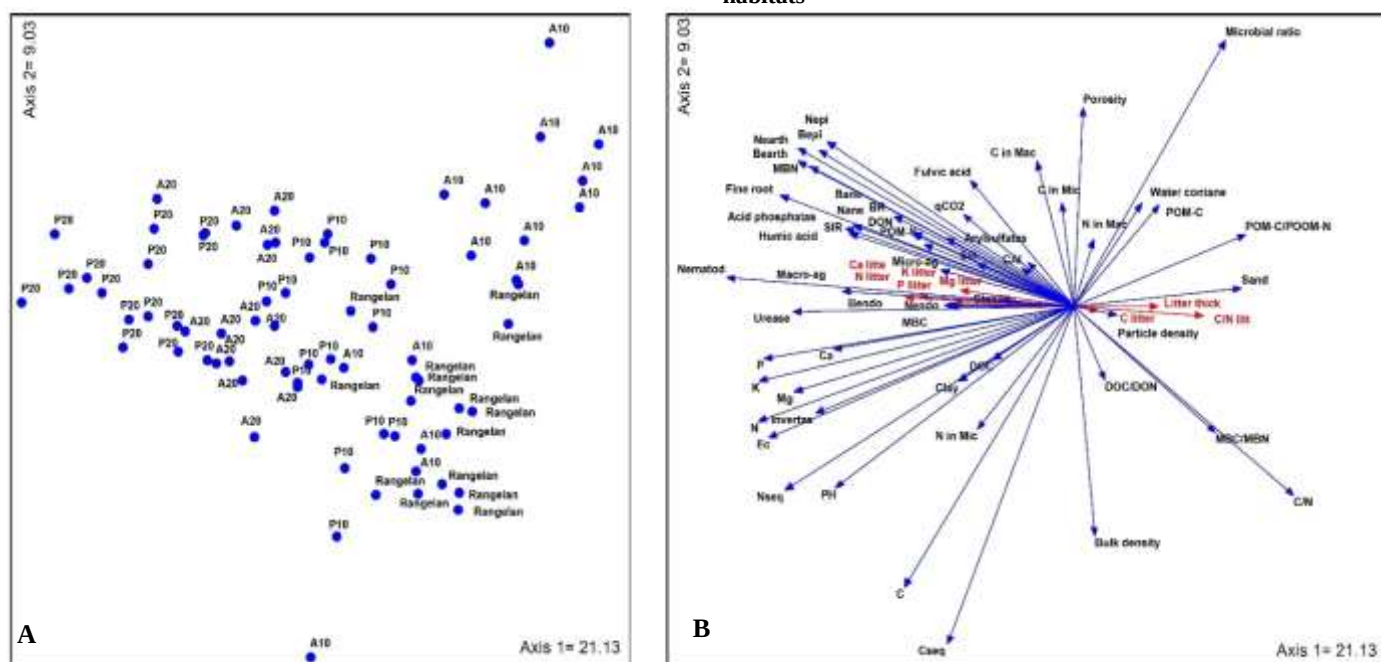
شکل ۱- میانگین تعداد کرم خاکی (تعداد کل (مقدار $F=6.88$ و معنی‌داری $=0.000$), تعداد اپی ژئیک (مقدار $F=4.87$ و معنی‌داری $=0.001$), تعداد اندوژئیک (مقدار $F=1.11$ و معنی‌داری $=0.355$), تعداد آنسئیک (مقدار $F=1.55$ و معنی‌داری $=0.194$) و زی توده کرم خاکی (زی توده کل (مقدار $F=6.13$ و معنی‌داری $=0.000$), زی توده اپی ژئیک (مقدار $F=5.14$ و معنی‌داری $=0.001$), زی توده اندوژئیک (مقدار $F=1.19$ و معنی‌داری $=0.320$), زی توده آنسئیک (مقدار $F=1.57$ و معنی‌داری $=0.191$)) در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Figure 1- Mean values of earthworms density (total number ($F=6.88$ and $P=0.000$), epigeic number ($F=4.87$ and $P=0.001$), number endogeic ($F=1.117$ and $P=0.355$), anecic number ($F=1.55$ and $P=0.194$)) and earthworm biomass (total dry mass ($F=13.6$ and $P=0.000$), epigeic biomass ($F=5.14$ and $P=0.001$), endogeic biomass ($F=1.19$ and $P=0.320$), anecic biomass ($F=1.572$ and $P=0.191$)) in studied habitats



شکل ۲- مقایسه میانگین جمعیت نماتد (مقدار $F=71.52$ و معنی داری $=0.000$) و زی توده ریزریشه (مقدار $F=28.96$ و معنی داری $=0.000$) در رویشگاه‌های مورد مطالعه

Figure 2- Mean values of total nematode ($F=71.52$ and $P=0.000$) and fine root biomass ($F=28.96$ and $P=0.000$) in studied habitats



شکل ۳- ارتباط جنگل‌کاری‌های صنوبر ۲۰ ساله (P20)، پلت ۲۰ ساله (A20)، صنوبر ۱۰ ساله (P10)، پلت ۱۰ ساله (A10) و پوشش مرتعی (Rangeland) (A)، با ویژگی‌های لایه آلی و سطحی خاک (B)، در آنالیز مؤلفه‌های اصلی

Figure 3- The relationship between plantation of 20-years-old poplar (P20), 20-years-old maple (A20), 10-years-old poplar (P10), 10-years-old maple (A10) and rangeland, with the characteristics of the organic and mineral soil layer (B), in principal component analysis

نتیجه‌گیری

آلی و سطحی خاک دارد. جنگل‌کاری‌های ۲۰ ساله، با تولید مواد آلی با کیفیت، توانستند ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در مقایسه با سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه بهبود ببخشند. نتایج حاکی از

به‌طور کلی نتایج این تحقیق نشان داد که توده‌های جنگل‌کاری شده با سنین مختلف و پوشش مرتعی اثر معنی داری بر ویژگی‌های لایه

و نمادهای خاکری در خاک تحتانی جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر مشاهده شد در حالی که حداقل مقادیر ویژگی‌های زیستی خاک در جنگلکاری پلت ۱۰ ساله و پوشش مرتعی مشاهده شد. به‌طور کلی، با توجه به نتایج حاصل از تجزیه مؤلفه‌های اصلی تولید مواد آلی با کیفیت بالا در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه با گونه صنوبر با ایجاد شرایط مناسب اکثر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در مقایسه با سایر رویشگاه‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود بخشیده است.

کیفیت بالای (محتوی نیتروژن بالا و کربن و نسبت کربن به نیتروژن پایین) مواد آلی تولید شده در جنگل کاری‌های ۲۰ ساله به‌ویژه با گونه صنوبر در مقایسه با مواد آلی تولید شده در جنگل کاری‌های ۱۰ ساله و پوشش مرتعی است. با توجه به نتایج، اکثر ویژگی‌های فیزیکی‌شیمیایی خاک تحت جنگل کاری ۲۰ ساله صنوبر نسبت به سایر رویشگاه‌های مورد مطالعه به‌طور قابل ملاحظه‌ای از وضعیت بهتری برخوردار بودند. همچنین مطابق با نتایج تحقیق حاضر، بیشترین مقادیر ویژگی‌های زیستی از جمله فعالیت‌های میکروبی، فعالیت آنزیمی و جمعیت کرم‌ها

منابع

1. Aguilar-Fernández, R., Gavito, M.E., Peña-Claros, M., Pulleman, M., & Kuyper, T.W. (2020). Exploring linkages between supporting, regulating, and provisioning ecosystem services in rangelands in a tropical agro-forest frontier. *Land*, 9(12), 511. <https://doi.org/10.3390/land9120511>
2. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry* (Issue 631.46 M592ma). Academic Press.
3. Allison, L.E. (1975). Organic carbon In: Black C.A. *Methods of Soil Analysis. American Society of Agronomy, Part, 2*.
4. Asiedu, E.K., Ampadu, B., Bonsu, M., & Abunyewa, A.A. (2013). *Hydrological and physical changes of soils under cocoa plantations of different ages during the dry season in the transition zone of Ghana*.
5. Asshoff, R., Scheu, S., & Eisenhauer, N. (2010). Different earthworm ecological groups interactively impact seedling establishment. *European Journal of Soil Biology*, 46(5), 330–334. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2010.06.005>
6. Augusto, L., De Schrijver, A., Vesterdal, L., Smolander, A., Prescott, C., & Ranger, J. (2015). Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. *Biological Reviews*, 90(2), 444–466. <https://doi.org/10.1111/brv.12119>
7. Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., & Rothe, A. (2002). Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3), 233–253. <https://doi.org/10.1051/forest:2002020>
8. Babur, E., Dindaroğlu, T., Roy, R., Seleiman, M.F., Ozlu, E., Battaglia, M.L., & Uslu, Ö.S. (2022). Relationship between organic matter and microbial biomass in different vegetation types. In *Microbial Syntrophy-Mediated Eco-enterprising* (pp. 225–245). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99900-7.00005-5>
9. Bending, G.D., Turner, M.K., Rayns, F., Marx, M.-C., & Wood, M. (2004). Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(11), 1785–1792. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.035>
10. Benschoter, B.W., Thompson, D.K., Waddington, J.M., Flannigan, M.D., Wotton, B.M., De Groot, W.J., & Turetsky, M.R. (2011). Interactive effects of vegetation, soil moisture and bulk density on depth of burning of thick organic soils. *International Journal of Wildland Fire*, 20(3), 418–429. <https://doi.org/10.1071/WF08183>
11. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73(4), 251–262.
12. Bremner, J.M. (1982). Total nitrogen. *Methods of Soil Analysis*, 595–624.
13. Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837–842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
14. Cardoso, E.J.B.N., Vasconcellos, R.L.F., Bini, D., Miyauchi, M.Y.H., Santos, C.A. dos, Alves, P.R.L., Paula, A.M. de, Nakatani, A.S., Pereira, J. de M., & Nogueira, M.A. (2013). Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? *Scientia Agricola*, 70, 274–289. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000400009>
15. Chapman, H.D., & Pratt, P.F. (1962). Methods of analysis for soils, plants and waters. *Soil Science*, 93(1), 68.
16. Cheng, F., Peng, X., Zhao, P., Yuan, J., Zhong, C., Cheng, Y., Cui, C., & Zhang, S. (2013). Soil microbial biomass, basal respiration and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. *PloS One*, 8(6), e67353. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353>
17. Crumsey, J.M., Le Moine, J.M., Vogel, C.S., & Nadelhoffer, K.J. (2014). Historical patterns of exotic earthworm distributions inform contemporary associations with soil physical and chemical factors across a northern temperate

- forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, 503–514. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.10.029>
18. Cusack, D.F., Silver, W.L., Torn, M.S., Burton, S.D., & Firestone, M.K. (2011). Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests. *Ecology*, 92(3), 621–632. <https://doi.org/10.1890/10-0459.1>
 19. da Silva Delabona, P., Pirota, R.D.P.B., Codima, C.A., Tremacoldi, C.R., Rodrigues, A., & Farinas, C.S. (2012). Using Amazon forest fungi and agricultural residues as a strategy to produce cellulolytic enzymes. *Biomass and Bioenergy*, 37, 243–250. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.006>
 20. Dechoum, M.S., Zenni, R.D., Castellani, T.T., Zalba, S.M., & Rejmánek, M. (2015). Invasions across secondary forest successional stages: effects of local plant community, soil, litter, and herbivory on *Hovenia dulcis* seed germination and seedling establishment. *Plant Ecology*, 216, 823–833. <https://doi.org/10.1007/s11258-015-0470-z>
 21. Di Carlo, E., Chen, C.R., Haynes, R.J., Phillips, I.R., & Courtney, R. (2019). Soil quality and vegetation performance indicators for sustainable rehabilitation of bauxite residue disposal areas: a review. *Soil Research*, 57(5), 419–446. <https://doi.org/10.1071/SR18348>
 22. Edwards, C.A. (2004). The importance of earthworms as key representatives of the soil fauna. *Earthworm Ecology*, 2, 3–11.
 23. Elliott, E.T., & Cambardella, C.A. (1991). Physical separation of soil organic matter. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34(1-4), 407–419. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90124-G](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90124-G)
 24. Emiru, N., & Gebrekidan, H. (2013). Effect of land use changes and soil depth on soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus contents of soils in Senbat Watershed, Western Ethiopia. *ARP Journal of Agricultural and Biological Science*, 8(3), 206–212.
 25. Erdmann, G., Scheu, S., & Maraun, M. (2012). Regional factors rather than forest type drive the community structure of soil living oribatid mites (Acari, Oribatida). *Experimental and Applied Acarology*, 57, 157–169. <https://doi.org/10.1007/s10493-012-9546-9>
 26. Finzi, A.C., Canham, C.D., & Van Breemen, N. (1998). Canopy tree–soil interactions within temperate forests: species effects on pH and cations. *Ecological Applications*, 8(2), 447–454. <https://doi.org/10.1890/1051-0761>
 27. Forghani, A. (2004). Study of biochemical changes and properties fulvic and humic acid in soil treated with different organic materials. *8th Iranian Soil Science Congress*, 78–79.
 28. Fouché, J., Christiansen, C.T., Lafrenière, M.J., Grogan, P., & Lamoureux, S.F. (2020). Canadian permafrost stores large pools of ammonium and optically distinct dissolved organic matter. *Nature Communications*, 11(1), 4500.
 29. Franco, A.L.C., Knox, M.A., Andriuzzi, W.S., de Tomasel, C.M., Sala, O.E., & Wall, D.H. (2017). Nematode exclusion and recovery in experimental soil microcosms. *Soil Biology and Biochemistry*, 108, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.001>
 30. Galindo, V., Giraldo, C., Lavelle, P., Armbrrecht, I., & Fonte, S.J. (2022). Land use conversion to agriculture impacts biodiversity, erosion control, and key soil properties in an Andean watershed. *Ecosphere*, 13(3), e3979. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3979>
 31. Garten Jr, C. T. (2002). Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. *Biomass and Bioenergy*, 23(2), 93–102. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00033-8](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00033-8)
 32. Ghazanshahi, J. (2006). *Soil and plant analysis*. Homa publication, 272p.
 33. Ghosh, A., Singh, A.B., Kumar, R.V., Manna, M.C., Bhattacharyya, R., Rahman, M.M., Sharma, P., Rajput, P.S., & Misra, S. (2020). Soil enzymes and microbial elemental stoichiometry as bio-indicators of soil quality in diverse cropping systems and nutrient management practices of Indian Vertisols. *Applied Soil Ecology*, 145, 103304. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.06.007>
 34. Gilliam, F.S., & Dick, D.A. (2010). Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use. *Plant Ecology*, 209, 83–94.
 35. Grizzetti, B., Lique, C., Pistocchi, A., Vigliak, O., Zulian, G., Bouraoui, F., De Roo, A., & Cardoso, A.C. (2019). Relationship between ecological condition and ecosystem services in European rivers, lakes and coastal waters. *Science of the Total Environment*, 671, 452–465. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.155>
 36. Guimaraes, D.V., Gonzaga, M.I.S., da Silva, T.O., da Silva, T.L., da Silva Dias, N., & Matias, M.I.S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research*, 126, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>
 37. Haghdoost, N., Akbarinia, M., Hosseini, S.M., & Kooch, Y. (2011). Conversion of Hyrcanian degraded forests to plantations: Effects on soil C and N stocks. *Annals of Biological Research*, 2, 385–399.
 38. Helmisaari, H.-S., Saarsalmi, A., & Kukkola, M. (2009). Effects of wood ash and nitrogen fertilization on fine root biomass and soil and foliage nutrients in a Norway spruce stand in Finland. *Plant and Soil*, 314, 121–132. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9711-4>
 39. Heydari, M., Poorbabaie, H., Bazgir, M., Salehi, A., & Eshaghirad, J. (2014). Earthworms as indicators for different

- forest management types and human disturbance in Ilam oak forest, Iran. *Folia Forestalia Polonica. Series A. Forestry*, 56(3).
40. Hirschfeld, M.N.C., Cares, J.E., & Esteves, A.M. (2020). Land use, soil properties and climate variables influence the nematode communities in the Caatinga dry forest. *Applied Soil Ecology*, 150, 103474. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103474>
41. Isaac, R.A., & Johnson, W.C. (1975). Collaborative study of wet and dry ashing techniques for the elemental analysis of plant tissue by atomic absorption spectrophotometry. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 58(3), 436–440. <https://doi.org/10.1093/jaoac/58.3.436>
42. Jacob, M., Viedenz, K., Polle, A., & Thomas, F.M. (2010). Leaf litter decomposition in temperate deciduous forest stands with a decreasing fraction of beech (*Fagus sylvatica*). *Oecologia*, 164, 1083–1094. <https://doi.org/10.1007/s00442-010-1699-9>
43. Jafari, M., & Sarmadian, F. (2003). *Fundamentals of Soil Science and Soil Classification*. University of Tehran Press. First Edition. (In Persian)
44. Jia, G., Cao, J., Wang, C., & Wang, G. (2005). Microbial biomass and nutrients in soil at the different stages of secondary forest succession in Ziulin, northwest China. *Forest Ecology and Management*, 217(1), 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.055>
45. Jiao, S., Li, J., Li, Y., Xu, Z., Kong, B., Li, Y., & Shen, Y. (2020). Variation of soil organic carbon and physical properties in relation to land uses in the Yellow River Delta, China. *Scientific Reports*, 10(1), 20317.
46. Jochum, M., Ferlian, O., Thakur, M.P., Ciobanu, M., Klarner, B., Salamon, J., Frelich, L.E., Johnson, E.A., & Eisenhauer, N. (2021). Earthworm invasion causes declines across soil fauna size classes and biodiversity facets in northern North American forests. *Oikos*, 130(5), 766–780. <https://doi.org/10.1111/oik.07867>
47. Jones, D.L., & Willett, V.B. (2006). Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(5), 991–999. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.08.012>
48. Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425–442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
49. Klimek, B., Niklińska, M., Jaźwa, M., Chodak, M., & Tarasek, A. (2015). Application of the bait-lamina method to measure the feeding activity of soil fauna in temperate forests. *Polish Journal of Ecology*, 63(3), 414–423. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2015.63.3.011>
50. Kooch, Y., Amani, M., & Abedi, M. (2022). Vegetation degradation threatens soil health in a mountainous semi-arid region. *Science of the Total Environment*, 830, 154827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154827>
51. Kooch, Y., Ehsani, S., & Akbarinia, M. (2020). Stratification of soil organic matter and biota dynamics in natural and anthropogenic ecosystems. *Soil and Tillage Research*, 200, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104621>
52. Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104621>
53. Kooch, Y., Tarighat, F.S., & Haghverdi, K. (2022). Effect of forest and non-forest land covers on soil organic matter, Fulvic and Humic Acids. *Ecology of Iranian Forest*, 39–46. <https://doi.org/10.52547/ifej.10.19.39>
54. Kooch, Y., Zaccane, C., Lamersdorf, N.P., & Tonon, G. (2014). Pit and mound influence on soil features in an Oriental Beech (*Fagus orientalis* Lipsky) forest. *European Journal of Forest Research*, 133, 347–354. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0766-2>
55. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
56. Lamandé, M., Hallaire, V., Curmi, P., Péres, G., & Cluzeau, D. (2003). Changes of pore morphology, infiltration and earthworm community in a loamy soil under different agricultural managements. *Catena*, 54(3), 637–649. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00114-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00114-0)
57. Lee, S.-H., Kim, M.-S., Kim, J.-G., & Kim, S.-O. (2020). Use of soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring and sustainable management. *Sustainability*, 12(19), 8209. <https://doi.org/10.3390/su12198209>
58. Li, M., Zhou, X., Zhang, Q., & Cheng, X. (2014). Consequences of afforestation for soil nitrogen dynamics in central China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 183, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.018> Get rights and content
59. Li, Z., Li, D., Ma, L., Yu, Y., Zhao, B., & Zhang, J. (2019). Effects of straw management and nitrogen application rate on soil organic matter fractions and microbial properties in North China Plain. *Journal of Soils and Sediments*, 19, 618–628. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2102-4>
60. Liang, W., Lou, Y., Li, Q., Zhong, S., Zhang, X., & Wang, J. (2009). Nematode faunal response to long-term application of nitrogen fertilizer and organic manure in Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(5), 883–890. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.06.018>

61. Luo, G., Xue, C., Jiang, Q., Xiao, Y., Zhang, F., Guo, S., Shen, Q., & Ling, N. (2020). Soil carbon, nitrogen, and phosphorus cycling microbial populations and their resistance to global change depend on soil C: N: P stoichiometry. *Msystems*, 5(3), e00162-20. <https://doi.org/10.1128/msystems.00162-20>
62. Martin, J.G., Bolstad, P.V., Ryu, S.-R., & Chen, J. (2009). Modeling soil respiration based on carbon, nitrogen, and root mass across diverse Great Lake forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(10), 1722–1729. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.002>
63. Marzi, M., Shahbazi, K., Kharazi, N., & Rezaei, M. (2020). The influence of organic amendment source on carbon and nitrogen mineralization in different soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20, 177–191. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00116-w>
64. Matute, M.M. (2013). Soil nematodes of Brassica rapa: influence of temperature and pH. *Advances in Natural Science*, 6(4), 20–26. <https://doi.org/10.3968/j.ans.1715787020130604.2858>
65. McCauley, A., Jones, C., & Jacobsen, J. (2009). Soil pH and organic matter. *Nutrient Management Module*, 8(2), 1–12.
66. Meena, A., & Rao, K.S. (2021). Assessment of soil microbial and enzyme activity in the rhizosphere zone under different land use/cover of a semiarid region, India. *Ecological Processes*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00288-3>
67. Menta, C. (2012). Soil fauna diversity-function, soil degradation, biological indices, soil restoration. *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*, 59–94.
68. Mojarabi, M., Moftakhar, J.M., Kooch, Y., & Jalilvand, H. (2011). Comparison of regeneration density and biodiversity of afforestations of *Populus deltoides* Marsh. and *Acer velutinum* Boiss. In Dallak Khil of Mazandaran. *Iranian Journal of Biology*, 614-621. (In Persian)
69. Mohamed, A.E., Rashed, M.N., & Mofty, A. (2003). Assessment of essential and toxic elements in some kinds of vegetables. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 55(3), 251–260. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00026-5)
70. Mohammadi, K., Heidari, G., Khalesro, S., & Sohrabi, Y. (2011). Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(86), 19840. <https://doi.org/10.5897/AJBX11.006>
71. Moslehi, M., & Nazari, J. (2012). Relations between earthworms and trees and its effects on forest soils. *Human and Environmental*, 20(1), 108–113.
72. Nanganoa, L.T., Okolle, J.N., Missi, V., Tueche, J.R., Levai, L.D., & Njukeng, J.N. (2019). Impact of different land-use systems on soil physicochemical properties and macrofauna abundance in the humid tropics of Cameroon. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5701278>
73. Neatrou, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrient availability and fine-root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2934–2941. <https://doi.org/10.1139/x05-217>
74. Nelson, D.W., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 539–579. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c29>
75. Nilsson, M.-C., Wardle, D.A., & Dahlberg, A. (1999). Effects of plant litter species composition and diversity on the boreal forest plant-soil system. *Oikos*, 16–26. <https://doi.org/10.2307/3546566>
76. Noguchi, K., Sakata, T., Mizoguchi, T., & Takahashi, M. (2005). Estimating the production and mortality of fine roots in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation using a minirhizotron technique. *Journal of Forest Research*, 10, 435–441. <https://doi.org/10.1007/s10310-005-0163-x>
77. Olsen, S.R., & Dean, L.A. (1965). Phosphorus (Ed. CA Black) Methods of Soil Analysis. Part 2. *American Society of Agronomy*. Inc. Publisher Madison Wisconsin USA.
78. Page-Dumroese, D. S. (2020). The North American long-term soil productivity study: Collaborations to understand forest responses to land management. *Forest Management–Research Partnerships*, 53. <https://doi.org/10.2737/NRS-GTR-P-193-paper8>
79. Page, A.L., Miller, R.H., & Jeeney, D.R. (1975). Methods of soil analysis, Part 1. *Physical properties*. SSSA Publication, Madison.
80. Palansooriya, K.N., Wong, J.T.F., Hashimoto, Y., Huang, L., Rinklebe, J., Chang, S.X., Bolan, N., Wang, H., & Ok, Y.S. (2019). Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review. *Biochar*, 1, 3–22. <https://doi.org/10.1007/s42773-019-00009-2>
81. Peng, Y., Holmstrup, M., Schmidt, I. K., De Schrijver, A., Schelfhout, S., Heděnc, P., Zheng, H., Bachega, L. R., Yue, K., & Vesterdal, L. (2022). Litter quality, mycorrhizal association, and soil properties regulate effects of tree species on the soil fauna community. *Geoderma*, 407, 115570. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115570>
82. Peri, P.L., Rosas, Y.M., Ladd, B., Toledo, S., Lasagno, R.G., & Martinez Pastur, G. (2019). Modeling soil nitrogen

- content in South Patagonia across a climate gradient, vegetation type, and grazing. *Sustainability*, 11(9), 2707. <https://doi.org/10.3390/su11092707>
83. Pires, L. F., Brinatti, A. M., Saab, S. C., & Cássaro, F. A. M. (2014). Porosity distribution by computed tomography and its importance to characterize soil clod samples. *Applied Radiation and Isotopes*, 92, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.06.010>
84. Plaster, E. (2013). *Soil science and management*. Cengage learning.
85. Prescott, C. E. (2010). Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, 101, 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>
86. Qiu, Q., Li, J. Y., Wang, J. H., He, Q., Su, Y., & Ma, J. W. (2015). Interactions between soil water and fertilizer application on fine root biomass yield and morphology of *Catalpa bungei* seedlings. *Applied Mechanics and Materials*, 700, 323–333. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.700.323>
87. Robertson, G. P., Coleman, D. C., Sollins, P., & Bledsoe, C. S. (1999). *Standard soil methods for long-term ecological research* (Vol. 2). Oxford University Press on Demand.
88. Safaei, M., Bashari, H., Mosaddeghi, M. R., & Jafari, R. (2019). Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *Catena*, 177, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.021>
89. Sánchez-Moreno, S., Minoshima, H., Ferris, H., & Jackson, L. E. (2006). Linking soil properties and nematode community composition: effects of soil management on soil food webs. *Nematology*, 8(5), 703–715.
90. Sayer, E. J., Tanner, E. V. J., & Cheesman, A. W. (2006). Increased litterfall changes fine root distribution in a moist tropical forest. *Plant and Soil*, 281, 5–13. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-6334-x>
91. Schelfhout, S., Mertens, J., Verheyen, K., Vesterdal, L., Baeten, L., Muys, B., & De Schrijver, A. (2017). Tree species identity shapes earthworm communities. *Forests*, 8(3), 85. <https://doi.org/10.3390/f8030085>
92. Schlöter, M., Dilly, O., & Munch, J. C. (2003). Indicators for evaluating soil quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 98(1–3), 255–262. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00085-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00085-9)
93. Seighalani, S., Ramazanpoor, H., & Kahneh, H. (2015). The effect of Taxodium, Alnus and Populus on soil chemical in forest areas, Astaneh-ye Ashrafiyeh region. *Iranian Journal of Soil Researches*, 29, 233–241.
94. Sharrow, S. H., & Ismail, S. (2004). Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. *Agroforestry Systems*, 60, 123–130. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000013267.87896.41>
95. Sione, S. M. J., Wilson, M. G., Lado, M., & González, A. P. (2017). Evaluation of soil degradation produced by rice crop systems in a Vertisol, using a soil quality index. *Catena*, 150, 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.011>
96. Sofo, A., Mininni, A.N., & Ricciuti, P. (2020). Soil macrofauna: A key factor for increasing soil fertility and promoting sustainable soil use in fruit orchard agrosystems. *Agronomy*, 10(4), 456. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040456>
97. Sohrabi, H., Jourgholami, M., Lo Monaco, A., & Picchio, R. (2022). Effects of forest harvesting operations on the recovery of earthworms and nematodes in the Hyrcanian old-growth forest: Assessment, mitigation, and best management practice. *Land*, 11(5), 746. <https://doi.org/10.3390/land11050746>
98. Soto, L., Galleguillos, M., Seguel, O., Sotomayor, B., & Lara, A. (2019). Assessment of soil physical properties' statuses under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(1), 12–23. <https://doi.org/10.2489/jswc.74.1.12>
99. Srinivasan, V., Maheswarappa, H.P., & Lal, R. (2012). Long term effects of topsoil depth and amendments on particulate and non particulate carbon fractions in a Miamian soil of Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 121, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.014>
100. Stott, D.E. (2019). Recommended soil health indicators and associated laboratory procedures. *Soil Health Technical Note*, 450–03.
101. Sun, X., Zhang, X., Zhang, S., Dai, G., Han, S., & Liang, W. (2013). Soil nematode responses to increases in nitrogen deposition and precipitation in a temperate forest. *PloS One*, 8(12), e82468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0082468>
102. Tao, H.-H., Slade, E.M., Willis, K.J., Caliman, J.-P., & Snaddon, J.L. (2016). Effects of soil management practices on soil fauna feeding activity in an Indonesian oil palm plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 218, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.012>
103. Tardy, V., Mathieu, O., Lévêque, J., Terrat, S., Chabbi, A., Lemanceau, P., Ranjard, L., & Maron, P. (2014). Stability of soil microbial structure and activity depends on microbial diversity. *Environmental Microbiology Reports*, 6(2), 173–183. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12126>
104. Tavakoli, M., Kooch, Y., & Akbarinia, M. (2018a). Frequency and diversity of worms in topsoil of degraded and reclaimed forest habitats of the Caspian region. *Iranian Journal of Forest*, 10(3), 293–306.

105. Tavakoli, M., Kooch, Y., & Akbarinia, M. (2018b). *The effect of degraded and reclaimed forest areas on carbon dioxide gas emissions and soil carbon mineralization in West of Mazandaran*. International Conferences of Climate Change and Dendrochronology in Caspian Ecosystems, Sari, Iran.
106. Tong, H., Simpson, A.J., Paul, E. A., & Simpson, M.J. (2021). Land-use change and environmental properties alter the quantity and molecular composition of soil-derived dissolved organic matter. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(6), 1395–1406. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00033>
107. Vahedi, A. A., Motaji, A., & Eshaghi Rad, J. (2014). Variation of soil organic carbon pool weight associated with plant biodiversity (Case study: Mixed-beech forests of Glandrood in Nour). *Iranian Journal of Applied Ecology*, 3(7), 1–12. <https://doi.org/20.1001.1.24763128.1393.3.7.2.0>
108. Vázquez, E., Benito, M., Espejo, R., & Teutschero, N. (2020). Response of soil properties and microbial indicators to land use change in an acid soil under Mediterranean conditions. *Catena*, 189, 104486. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104486>
109. Verma, S., & Jayakumar, S. (2012). Impact of forest fire on physical, chemical and biological properties of soil: A review. *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 2(3), 168.
110. Wang, B., Xue, S., Liu, G. Bin, Zhang, G.H., Li, G., & Ren, Z.P. (2012). Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. *Catena*, 92, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.12.004>
111. Wang, Q., & Wang, S. (2006). Microbial biomass in subtropical forest soils: effect of conversion of natural secondary broad-leaved forest to Cunninghamia lanceolata plantation. *Journal of Forestry Research*, 17(3), 197–200. <https://doi.org/10.1007/s11676-006-0046-9>
112. Wang, Q., Xiao, F., He, T., & Wang, S. (2013). Responses of labile soil organic carbon and enzyme activity in mineral soils to forest conversion in the subtropics. *Annals of Forest Science*, 70, 579–587. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0294-8>
113. Wang, W.J., & Dalal, R.C. (2006). Carbon inventory for a cereal cropping system under contrasting tillage, nitrogen fertilisation and stubble management practices. *Soil and Tillage Research*, 91(1–2), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.005>
114. Wenxiang, H., Xin, J., & Yongrong, B. (2002). Study on soil enzyme activity effected by dimehypo. *Xibei Nonglin Keji Daxue Xuebao (China)*.
115. Ye, R., Wright, A. L., Inglett, K., Wang, Y., Ogram, A. V., & Reddy, K. R. (2009). Land-use effects on soil nutrient cycling and microbial community dynamics in the everglades agricultural area, Florida. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(17–18), 2725–2742. <https://doi.org/10.1080/00103620903173772>
116. Yesilonis, I., Szlavetz, K., Pouyat, R., Whigham, D., & Xia, L. (2016). Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management*, 370, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.046>
117. Yuan, Z.Y., & Chen, H.Y.H. (2010). Fine root biomass, production, turnover rates, and nutrient contents in boreal forest ecosystems in relation to species, climate, fertility, and stand age: literature review and meta-analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(4), 204–221. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579>
118. Zeng, X., Zhang, W., Cao, J., Liu, X., Shen, H., & Zhao, X. (2014). Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the “Beijing–Tianjin Sandstorm Source Control” program in China. *Catena*, 118, 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.01.005>
119. Zhang, L., Jing, Y., Chen, C., Xiang, Y., Rezaei Rashti, M., Li, Y., Deng, Q., & Zhang, R. (2021). Effects of biochar application on soil nitrogen transformation, microbial functional genes, enzyme activity, and plant nitrogen uptake: A meta-analysis of field studies. *GCB Bioenergy*, 13(12), 1859–1873. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12898>
120. Zhao, C., Li, Y., Zhang, C., Miao, Y., Liu, M., Zhuang, W., Shao, Y., Zhang, W., & Fu, S. (2021). Considerable impacts of litter inputs on soil nematode community composition in a young *Acacia crassicapa* plantation. *Soil Ecology Letters*, 3, 145–155. <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0085-3>

Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters

M. Zangiabadi^{ID 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: m.zangiabadi@areeo.ac.ir)

Received: 26-06-2023

Revised: 12-09-2023

Accepted: 23-09-2023

Available Online: 23-09-2023

How to cite this article:

Zangiabadi, M. (2023). Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 721-731. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83150.1300>

Introduction

Soil pore size distribution curve and using the optimal ranges of the location and shape parameters of this curve can be used to evaluate the soil physical quality. This research was carried out in an area of about 220 hectares of Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station, to determine the optimal ranges for soil pore size distribution curve parameters using the soil physical quality index. Different soil textures and the diversity in soil properties are the distinct features of this research station.

Materials and Methods

Torogh Agricultural and Natural Resources Research and Education Station of Khorasan-Razavi province, with a semiarid climate, is located in south-east of Mashhad city. For the field measurements and laboratory analysis to determine the soil physical properties and indices, 30 points with different soil textures and structures were selected. Intact soil cores (5 cm diameter by 5.3 cm length) and disturbed soil samples were collected from 0-30 cm depth of each point. After the laboratory analysis and field measurements, 35 soil physical properties were measured and calculated. Soil particle size distribution and five size classes of sand particles, soil bulk, and particle density, dry aggregates mean weight diameter (MWD) and stability index (SI), soil moisture release curve (SMRC) parameters, S-index, soil porosity (POR) and air capacity (AC), soil pore size distribution (SPSD) curves, relative field capacity (RFC), plant available water measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity (PAW₁₀₀ and PAW₃₃₀), least limiting water range measured in matric pressure heads of 100 and 330 hPa for the field capacity (LLWR₁₀₀ and LLWR₃₃₀), integral water capacity (IWC) and integral energy (EI) of different soil water ranges, were the soil physical properties and indices which were determined in this study. Three parameters of modal, median, and mean pore sizes of the SPSP curves were considered as the location (central tendency), and three parameters of standard deviation, skewness, and kurtosis of the SPSP curves were considered as the shape parameters. Selection of the most important soil physical characteristics using principal component analysis (PCA) method by JMP software (ver. 9.02), weighting and scoring of the selected characteristics using PCA and scoring functions, respectively, and the summation of multiplied characteristics weights by their scores for each soil sample, were the four steps of calculation of the 0-1 value of soil physical quality index (SPQI). Soil samples were classified into four soil physical quality classes by SPQI values. The soils of the first class with the highest SPQIs (> 0.78) were considered to determine the optimal ranges of SPSP curves location and shape parameters.

Results and Discussion



©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.2023.83150.1300>

The texture of soil samples were loam (40 %), silt loam (23 %), silty clay loam (17 %), clay loam (13 %), and sandy loam (7 %). Soil organic carbon was between 0.26-1.05 (%), and the average soil bulk density was 1.45 (gr.cm^{-3}). The MWD values of studied soil samples were between 0.94-2.88 (mm), an average of 1.93 (mm). The average modal, median, and mean pore sizes as the location parameters of the SPSD curves were 60.3 (μm), 12.4 (μm), and 6.5 (μm), respectively. The average of standard deviation, skewness, and kurtosis as the shape parameters of the SPSD curves were 71.56 (μm), -0.36 and 1.15, respectively. The average modal pore sizes showed that the pores with a size of 60 (μm) had the highest frequency in soil samples. The range of calculated standard deviation of SPSD curves, along with the difference between the minimum and maximum mean pore sizes (24.6 μm), implied the diversity of pore sizes in the studied soils. The results of PCA showed that the four soil physical properties of PAW_{330} (0.1-0.2 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), POR_t (0.40-0.51 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), LLWR_{100} (0.12-0.22 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) and SI (0.76-2.61 %) accounted for about 88% of the variance between soil samples and were selected to calculate the SPQIs. The PAW_{330} , POR_t , LLWR_{100} , and SI were entered into the calculation of SPQIs with weights of 0.46, 0.31, 0.15, and 0.08, respectively. All the selected physical properties were scored using the scoring function of more is better. The maximum and minimum values of SPQIs for the studied soils were 0.84 and 0.14, respectively. Five soil samples with SPQIs greater than 0.78 were classified as class 1 with the highest physical quality. The ranges between the minimum and maximum values of the SPSD curves, location, and shape parameters of these five soils were proposed as the optimal ranges. In this regard, the ranges of 29-92 (μm), 5-16 (μm), and 2-7 (μm) were suggested for optimal ranges of modal, median, and mean pore sizes, respectively. The optimal ranges of standard deviation, skewness, and kurtosis of the SPSD curves were proposed as 22-81 (μm), (-0.38)-(-0.33), and 1.14-1.15, respectively.

Conclusion

The optimal ranges of SPSD curves location and shape parameters suggested in the literature may probably not apply to a wide range of agricultural soils. They must be evaluated in a more extensive range of land uses, soil management, and soil textures. In this research, the soils with the relatively higher physical quality had larger mean pore size and less SPSD curves standard deviation (less diversity of pore size) than the optimal ranges suggested in the literature. The optimal ranges of SPSD curves location and shape parameters proposed in this research are appropriate for medium to coarse-textured soils of regions with the semiarid climate in Iran.

Keywords: Location parameters, Shape parameters, Soil physical quality

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۲۱-۷۳۱

تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک

مهدی زنگی‌آبادی^{*ID}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

چکیده

منحنی توزیع اندازه منافذ خاک و استفاده از حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل این منحنی می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای بررسی و ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک استفاده گردد. پژوهش حاضر در اراضی ایستگاه تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی طرق واقع در جنوب شرقی شهر مشهد با هدف تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ با استفاده از شاخص کیفیت فیزیکی خاک انجام شد. از ۳۰ نقطه در قسمت‌های مختلف ایستگاه با بافت و ساختمان متفاوت نمونه خاک تهیه و آزمایشات صحرایی و آزمایشگاهی لازم برای تعیین و محاسبه ۳۵ ویژگی فیزیکی خاک انجام شد. شاخص عددی کیفیت فیزیکی خاک در قالب انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌ها با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی، وزن‌دهی و امتیازدهی آنها محاسبه و از آن به‌عنوان معیاری جهت دسته‌بندی خاک‌های مورد مطالعه در چهار کلاس کیفیت خاک استفاده شد. خاک‌های کلاس یک با بیشترین کیفیت فیزیکی ملاک تعیین حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک قرار گرفت. نتایج نشان داد که خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی، دارای منافذ با میانگین اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتر از مقادیر بهینه ارائه شده در منابع می‌باشند. در این مطالعه حدود بهینه شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ به ترتیب ۲-۷، ۱۶-۵ و ۹۲-۲۹ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراستگی منحنی به ترتیب ۸۱-۲۲ میکرومتر، $(-0/33)$ - $(-0/38)$ و $1/15$ - $1/14$ تعیین گردید. استفاده از نتایج این مطالعه به‌منظور ارزیابی و مقایسه کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک در مناطق با اقلیم نیمه‌خشک ایران توصیه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های شکل، شاخص‌های موقعیت، کیفیت فیزیکی خاک

مقدمه

شاخص‌ها، ۳) کمی‌سازی وضعیت فعلی کیفیت خاک از طریق مقایسه مقادیر شاخص‌های آن با دامنه‌های مطلوب و ۴) تعیین روند ارتقاء، تنزل، یا پایدار ماندن کیفیت خاک در مقایسه با شرایط قبلی. عموماً هنگامی که سخن از کیفیت خوب به میان می‌آید، منظور این است که شاخص‌های کیفیت خاک در دامنه مطلوب قرار دارند و یا حداقل خارج از حدود بحرانی نیستند. در منابع، خصوصیات مختلف و شاخص‌های متفاوتی برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک مطرح شده است. یکی از مهمترین این ویژگی‌ها،

اولین گام در راستای مطالعات کیفیت خاک شناسایی شاخص‌های اصلی و تعیین حدود بهینه این شاخص‌ها می‌باشد. رینولدز و همکاران (Reynolds et al., 2008) کیفیت خاک را رکن اصلی کمی‌سازی میزان تغییرات شرایط اراضی و انتخاب و اعمال بهترین مدیریت اراضی می‌دانند. این محققین معتقدند که بررسی و ارزیابی کیفیت خاک شامل چهار مرحله است:

۱) تعیین یک یا چند عامل خاکی به عنوان شاخص‌های کیفیت خاک، ۲) تعیین دامنه مطلوب و یا مقادیر حداکثر و حداقل مقدار 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: m.zangiabadi@areeo.ac.ir

وضعیت توزیع اندازه منافذ خاک^۱ بوده که بسیاری از خصوصیات فیزیکی خاک شامل اندازه دامنه رطوبتی (آب قابل استفاده^۲، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت^۳ و گنجایش انتگرالی آب^۴) و انرژی انتگرالی^۵ در دامنه‌های مختلف رطوبتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و عموماً در قالب منحنی توزیع اندازه منافذ خاک و شاخص‌های مربوطه مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمودار حاصل از ارتباط شیب منحنی رطوبتی خاک^۶ (رطوبت حجمی خاک در مقابل لگاریتم طبیعی مکش ماتریک) در مقابل اندازه منافذ (میکرومتر) در مقیاس لگاریتمی، منحنی توزیع اندازه منافذ خاک نامیده می‌شود (Reynolds et al., 2009). شاخص‌های مختلف موقعیت^۷ و شکل^۸ منحنی به منظور ارزیابی و بررسی وضعیت منافذ خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این راستا سه شاخص^۹ مد^{۱۰}، میانه^{۱۱} و میانگین^{۱۲} اندازه منافذ خاک به عنوان شاخص‌های موقعیت (تمایل به مرکز) و سه شاخص انحراف معیار^{۱۳}، کشیدگی^{۱۴} و افراستگی^{۱۵} به عنوان شاخص‌های شکل در نظر گرفته می‌شوند (Reynolds et al., 2009).

رینولدز و همکاران (Reynolds et al., 2014) کیفیت فیزیکی یک خاک با بافت لوم را در شرایط طولانی مدت کشت محصول مطالعه نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص مد اندازه منافذ، در منافذ ریز خاک دارای مقادیری بین ۲/۲ و ۴/۹۷ میکرومتر و در منافذ ساختمانی خاک دارای مقادیری بین ۱۸۰/۹ و ۶۵۸ میکرومتر بوده است. آنها معتقدند که گنجایش هوایی خاک و آب قابل استفاده عموماً توسط منافذ ریز خاک تعیین می‌گردد.

ابراهیم و هورتون (Ibrahim & Horton, 2021) در مطالعه‌ای پیرامون اثر استفاده از زغال زیستی^{۱۵} و کمپوست بر محتوای آب خاک و توزیع اندازه منافذ در خاک با بافت شن لومی دریافتند که اضافه نمودن زغال زیستی و کمپوست و همچنین مخلوط این دو ماده به خاک شن لومی به طور معنی‌داری مقادیر شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ را در مقایسه با خاک شاهد کاهش می‌دهد. این محققین مقادیر شاخص‌های میانگین، میانه و مد اندازه منافذ در خاک شاهد را به ترتیب ۲۳/۵، ۲۵/۸ و ۳۱/۶ میکرومتر و شاخص‌های انحراف معیار، کشیدگی و افراستگی منحنی را در خاک شاهد به ترتیب ۳/۳ میکرومتر، ۰/۱۶- و ۱/۱۴ گزارش نمودند.

کاستلینی و همکاران (Castellini et al., 2014) تغییرات کیفیت فیزیکی خاک تحت دو نوع مدیریت بقایای گیاهی در خاک‌های رسی را مطالعه نمودند. نتایج مطالعه این محققین نشان داد که همه تیمارها دارای مقادیر بیشتر میانه و میانگین اندازه منافذ و مقادیر کمتر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ نسبت به حدود بهینه پیشنهاد شده توسط رینولدز و همکاران (Reynolds et al., 2009) بوده و تنها شاخص مد اندازه منافذ در محدوده بهینه این شاخص قرار داشت. شهاب و همکاران (Shahab et al., 2013) در تحقیقی با هدف تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک، نمونه خاک‌های مورد مطالعه را براساس حدود بهینه هشت ویژگی فیزیکی خاک شامل ظرفیت مزرعه نسبی^{۱۶}، آب قابل استفاده، گنجایش هوایی، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، شاخص پایداری ساختمان، میانگین وزنی قطر خاکدانه^{۱۷} در حالت مرطوب و شاخص (S) که توسط رینولدز و همکاران (Reynolds et al., 2009) پیشنهاد شده است، دسته‌بندی نمودند. این محققین دامنه تغییرات شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در خاک‌های دسته اول را که بیشترین تعداد ویژگی فیزیکی در حدود بهینه را دارا بودند، به عنوان حدود بهینه برای این شاخص‌ها در اقلیم نیمه‌خشک ایران اعلام کردند.

کاستلینی و همکاران (Castellini et al., 2013) دریافتند که شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ در خاک‌های رسی تحت مدیریت بی‌خاک‌ورزی در دامنه حدود بهینه پیشنهادی توسط رینولدز و همکاران (Reynolds et al., 2009) قرار دارند. کمتر بودن مقادیر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ خاک از مقدار بهینه این شاخص در هر دو تیمار خاک‌ورزی، بیان‌گر یکنواختی نسبی بیشتر در اندازه منافذ خاک‌های مطالعه شده بود.

اواگالد و همکاران (Ugalde et al., 2009) در مطالعه‌ای که با هدف بررسی اثر نوع خاک‌ورزی بر شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک و آب قابل استفاده گیاه در خاک‌های لوم سیلتی با کربنات کلسیم زیاد و کربن آلی کم در اقلیم نیمه‌خشک انجام دادند، دریافتند که بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با شخم رایج باعث تغییر توزیع اندازه منافذ خاک و افزایش میزان منافذ ریز شده است.

کرامر و همکاران (Kraemer et al., 2022) توزیع اندازه منافذ در

- 11- Mean
- 12- Standard deviation
- 13- Skewness
- 14- Kurtosis
- 15- Biochar
- 16- Relative field capacity (RFC)
- 17- Mean weight diameter (MWD)

- 1- Soil pore size distribution (SPSD)
- 2- Plant available water
- 3- Least limiting water range
- 4- Integral water capacity
- 5- Integral energy
- 6- Soil moisture release curve (SMRC)
- 7- Location
- 8- Shape
- 9- Mode
- 10- Median

اندازه منافذ خاک، ابزاری مناسب به منظور مقایسه خاک‌های مختلف و همچنین مقایسه مقادیر شاخص‌های ذکر شده با مقادیر بهینه محسوب می‌گردند.

بررسی نتایج مطالعات قبلی حاکی از آن است که استفاده از حدود بهینه ارائه شده در منابع، مستلزم ارزیابی و انجام تحقیقات مشابه برای شرایط اقلیمی و خاک‌های ایران می‌باشد. از این رو پژوهش حاضر با هدف دستیابی به حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در شرایط خاک‌های ایران و مقایسه آنها با مقادیر بهینه شاخص‌های ذکر شده در منابع انجام شد. برای این منظور تعداد زیادی از ویژگی‌های فیزیکی خاک اندازه‌گیری و محاسبه و در قالب شاخص عددی کیفیت فیزیکی خاک تجمیع گردید. با استفاده از شاخص ذکر شده خاک‌های مورد مطالعه در چهار کلاس کیفیت دسته‌بندی شدند. در نهایت مقادیر حداقل و حداکثر در هر یک از شاخص‌ها، مربوط به خاک‌های قرار گرفته در کلاس یک (بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی) به عنوان حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در نظر گرفته شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

پژوهش حاضر در محدوده‌ای به وسعت حدود ۲۲۰ هکتار از اراضی ایستگاه تحقیقات طرق مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی واقع در جنوب شرقی شهر مشهد و در مختصات جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۴ دقیقه عرض شمالی انجام شد. ویژگی بارز خاک این ایستگاه تحقیقاتی وجود تنوع در خصوصیات خاک و به‌طور ویژه بافت خاک می‌باشد.

نمونه‌برداری از خاک

به‌منظور انجام بررسی جامع و دستیابی به اطلاعات دقیق‌تر، از ۳۰ نقطه در قسمت‌های مختلف ایستگاه با بافت و ساختمان متفاوت، یک نمونه دست‌خورده و یک نمونه دست‌نخورده خاک با استفاده از استوانه های فلزی با قطر ۵ و ارتفاع ۵/۳ سانتی‌متر از عمق صفر تا ۳۰ سانتی-متری هر نقطه به منظور اندازه‌گیری ویژگی‌های مختلف تهیه گردید.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی

در این مطالعه ویژگی‌ها و شاخص‌های مختلف فیزیکی خاک اندازه‌گیری و محاسبه شد. بافت خاک به روش هیدرومتری (Kroetsch & Wang, 2007) و پنج جزء شن با استفاده از سری

دو خاک مالی‌سول و ورتی‌سول با تراکم‌های مختلف کشت در سامانه کشاورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی) در آرژانتین را مطالعه و اعلام نمودند بدون در نظر گرفتن نوع خاک، دو شاخص تخلخل درشت (منافذ بزرگ تر از ۳۰۰ میکرومتر) و مد اندازه منافذ رابطه بسیار نزدیکی با متغیرهای مدیریت کشاورزی داشته و به‌عنوان دو شاخص سلامت فیزیکی خاک در سامانه کشاورزی حفاظتی محسوب می‌گردند. این محققین برای پنج سانتی‌متر لایه سطحی خاک حدود بهینه شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ را به‌ترتیب ۴۰/۹-۴/۶، ۵۸-۷/۸ و ۲۲۷-۷۱ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراستگی منحنی را به‌ترتیب ۵۷۷۹-۱۴/۶ میکرومتر، $(-۰/۳۰) - (-۰/۴۱)$ و $۱/۱۶ - ۱/۱۳$ اعلام نمودند.

جیبرتو و همکاران (Ghiberto et al., 2015) جهت تعیین شاخص کیفیت فیزیکی^۱ در خاک‌های مالی‌سول از حدود بهینه هشت خصوصیت فیزیکی خاک استفاده نمودند. آنها با استفاده از شاخص به دست آمده، خاک‌های مورد مطالعه را به چهار دسته تقسیم و مقادیر دامنه تغییرات شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در دسته اول (بیشترین مقادیر شاخص جمعی کیفیت فیزیکی) را به‌عنوان حدود بهینه این شاخص‌ها اعلام نمودند.

کی و همکاران (Qi et al., 2009) نیز خاک‌های مختلف را بر اساس مقدار شاخص کیفیت خاک به چهار کلاس (یک بیشترین کیفیت و چهار کمترین کیفیت) دسته‌بندی نمودند. این محققین پس از محاسبه شاخص کیفیت خاک با استفاده از وزن‌دهی به متغیرهای انتخاب‌شده از طریق تجزیه مؤلفه‌های اصلی^۲ و امتیازدهی آنها، مقادیر شاخص بیشتر از ۰/۷۸ را کلاس یک، ۰/۶۸-۰/۷۸ کلاس دو، ۰/۵۸-۰/۶۸ کلاس سه و مقادیر شاخص کمتر از ۰/۵۸ را کلاس چهار کیفیت نامیدند.

الکسی (Al-Kayssi, 2022) در تحقیقی خاک‌های مورد مطالعه را براساس تعداد ویژگی و شاخص فیزیکی قرار گرفته در دامنه مطلوب به سه گروه تقسیم نمود. بر این اساس گروه با بیشترین تعداد ویژگی در دامنه مطلوب ملاک تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک قرار گرفت. این گروه شامل سه نمونه خاک با بافت لوم و لوم سیلتی بود که در آن به جز ویژگی جرم مخصوص ظاهری کلیه ویژگی‌های فیزیکی مطالعه شده شامل ظرفیت مزرعه نسبی، آب قابل استفاده، گنجایش هوایی، تخلخل درشت، شاخص پایداری خاک دانه، شاخص (S) و کرن آلی در دامنه مطلوب قرار داشت.

توزیع اندازه منافذ خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم که دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌تواند نقش مهمی در راستای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک اراضی کشاورزی ایفا نماید. در این راستا شاخص‌های منحنی توزیع

(Masto et al., 2008).

$$SPQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (1)$$

مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک بین صفر و یک متغیر است. بر این اساس خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به یک مطلوب‌ترین و خاک‌های با مقادیر شاخص نزدیک به صفر ضعیف‌ترین خاک‌ها از نظر کیفیت فیزیکی محسوب می‌شوند (Zangiabadi et al., 2021).

تعیین حدود بهینه شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ خاک

با استفاده از شاخص کیفیت فیزیکی خاک، خاک‌های مورد مطالعه در کلاس‌های یک تا چهار دسته‌بندی شدند (Qi et al., 2009). مقادیر حداقل هر یک از شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ مربوط به خاک‌های قرار گرفته در کلاس یک (بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی) به‌عنوان حد پائین و مقادیر حداکثر به‌عنوان حد بالا و دامنه بین آنها به عنوان حدود بهینه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ تعیین گردید (Ghiberto et al., 2015).

نرم‌افزارهای مورد استفاده

برای تعیین پارامترهای منحنی رطوبتی خاک از نرم‌افزار RETC^{*}، انجام محاسبات ریاضی در راستای تعیین مقدار شاخص‌های گنجایش انتگرالی آب و انرژی انتگرالی دامنه‌های مختلف رطوبتی از نرم‌افزار Mathcad Prime 3، جهت تجزیه مؤلفه‌های اصلی و وزن‌دهی به متغیرها از نرم‌افزار آماری JMP نسخه ۹/۰۲، امتیازدهی متغیرها و محاسبه شاخص کیفیت خاک و تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ از نرم‌افزار اکسل استفاده گردید.

نتایج و بحث

خاک محدوده مورد مطالعه در پنج کلاس لوم، لوم شنی، لوم سیلتی، لوم رسی و لوم رسی سیلتی طبقه‌بندی گردید. خاک‌های با بافت لوم دارای فراوانی ۴۰ درصد، لوم سیلتی ۲۳ درصد، لوم رسی سیلتی ۱۷ درصد، لوم رسی ۱۳ درصد و لوم شنی ۷ درصد بود. میانگین جرم مخصوص ظاهری در نمونه خاک‌های مطالعه شده ۱/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و کربن آلی در دامنه‌ای بین ۱/۰۵-۰/۲۶ درصد متغیر بود. نتایج بررسی ساختمان خاک در قالب میانگین وزنی قطر خاک‌دانه نشان داد که به طور میانگین خاک‌دانه‌های با قطر ۱-۰/۵ میلی‌متر بیشترین سهم و خاک‌دانه‌های با قطر ۰/۲۵-۰ میلی‌متر کمترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. مقدار شاخص میانگین وزنی قطر خاک‌دانه

الک‌ها (Kroetsch & Wang, 2007) بر اساس طبقه‌بندی آمریکایی، جرم مخصوص حقیقی و ظاهری به‌ترتیب با استفاده از روش پیکنومتر و نمونه دست‌نخورده (Hao et al., 2007)، کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Skjemstad & Baldock, 2007)، میانگین وزنی قطر خاک‌دانه به روش الک خشک با استفاده از سری الک‌ها (Larney, 2007)، پارامترهای منحنی رطوبتی خاک با برازش معادله وان‌گنوختن به داده‌های رطوبتی خاک در مکش‌های ۰، ۱۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه جعبه شن^۱) و مکش‌های ۳۳۰، ۱۰۰۰، ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (با استفاده از دستگاه صفحات فشاری) (Reynolds & Topp, 2007; Asgarzadeh et al., 2010) اندازه‌گیری شد. مقاومت فروروی خاک با استفاده از فروسنج^۲ مخروطی ساخت شرکت ایکل کمپ^۳ با مخروط دارای زاویه ۶۰ درجه و سطح مقطع یک سانتی‌متر مربع، اندازه‌گیری و هم‌زمان با هر اندازه‌گیری، یک نمونه خاک جهت تعیین رطوبت به روش وزنی تهیه گردید. در این پژوهش، ظرفیت مزرعه نسبی در قالب نسبت رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه به رطوبت در نقطه اشباع (Zangiabadi et al., 2016)، شاخص S از طریق محاسبه شیب منحنی رطوبتی خاک در حالت خشک شدن در نقطه عطف آن (Zangiabadi et al., 2017)، شاخص پایداری خاک‌دانه در قالب نسبت کربن آلی به مجموع رس و سیلت خاک (Reynolds et al., 2009)، شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ (Reynolds et al., 2009; Zangiabadi et al., 2017)، تخلخل و گنجایش هوایی به تفکیک منافذ درشت و ریز (Zangiabadi et al., 2016)، آب قابل استفاده و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ۱۰۰ و ۳۳۰ (ظرفیت مزرعه در دو مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر) (Zangiabadi et al., 2017; Asgarzadeh et al., 2010)، گنجایش انتگرالی آب (Zangiabadi et al., 2016) و انرژی انتگرالی دامنه‌های مختلف رطوبتی (Asgarzadeh et al., 2011; Zangiabadi et al., 2017) با استفاده از روابط مربوطه که به تشریح در منابع توضیح داده شده است، محاسبه گردید.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک

شاخص کیفیت فیزیکی خاک در قالب چهار مرحله ۱) انتخاب مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک با استفاده از تجزیه مؤلفه‌های اصلی (بدون در نظر گرفتن شاخص‌های شکل و موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ)، ۲) وزن‌دهی ویژگی‌های منتخب، ۳) امتیازدهی ویژگی‌های منتخب و ۴) محاسبه شاخص نهایی با استفاده از رابطه شماره ۱، تعیین گردید. در این رابطه SPQI: شاخص کیفیت فیزیکی خاک، Si: امتیاز هر ویژگی، Wi: وزن هر ویژگی، و n: تعداد ویژگی‌های منتخب می‌باشد

3- Eijkelkamp
4- Retention curve program

1- Sand box
2- Penetrometer

مثبت بیانگر زیادی نسبی منافذ بزرگ و کشیدگی صفر نشان‌دهنده توزیع لوگ نرمال اندازه منافذ در نمونه خاک می‌باشد.

در همین راستا شاخص انحراف معیار برابر با یک حاکی از یکسان بودن اندازه منافذ در نمونه خاک و مقادیر بیش از یک نشان‌دهنده وجود تنوع در اندازه منافذ خاک می‌باشد (Reynolds et al., 2009).

شاخص مد در **جدول ۱** حاکی از آن است که به طور میانگین منافذ با اندازه ۶۰ میکرومتر بیشترین فراوانی را در نمونه‌های خاک مطالعه شده دارند. با نگاهی به مقادیر حداکثر و حداقل شاخص میانگین اندازه منافذ و همچنین دامنه تغییرات شاخص انحراف معیار منحنی توزیع می‌توان به وجود تنوع اندازه منافذ در نمونه‌های خاک یا به بیان دیگر وجود منافذ با اندازه‌های متفاوت در خاک‌های مورد مطالعه پی برد.

منحنی‌های توزیع اندازه منافذ و شاخص‌های مربوطه برای دو نمونه خاک با بافت لوم رسی و لوم شنی به ترتیب در **شکل ۱** و **جدول ۲** ارائه شده است. مقایسه این دو منحنی و مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل آنها نشان می‌دهد که خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم شنی دارای منافذ به مراتب کوچکتر و با تنوع اندازه بیشتر می‌باشد.

نیز دارای دامنه‌ای بین ۰/۹۴-۲/۸۸ میلی‌متر و میانگینی برابر با ۱/۹۳ میلی‌متر بود. نتایج محاسبه شاخص (S) نشان داد که مقدار این شاخص در دامنه‌ای بین ۰/۰۲۹-۰/۰۷۰ و میانگین ۰/۰۴۶ می‌باشد. با استفاده از مقدار این شاخص، خاک‌ها از منظر کیفیت فیزیکی در قالب چهار دسته کیفیت فیزیکی خیلی خوب (بیش از ۰/۰۵)، خوب (۰/۰۵-۰/۰۳۵)، ضعیف (۰/۰۳۵-۰/۰۲) و خیلی ضعیف (کمتر از ۰/۰۲) قرار می‌گیرند (Reynolds et al., 2009). نتایج به دست آمده در این مطالعه حاکی از آن است که هیچ‌یک از نمونه‌های خاک در دسته ساختمان خیلی ضعیف قرار نگرفته است (Zangiabadi et al., 2017).

جدول ۱ حداقل، حداکثر و میانگین مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ در خاک‌های مطالعه شده را نشان می‌دهد.

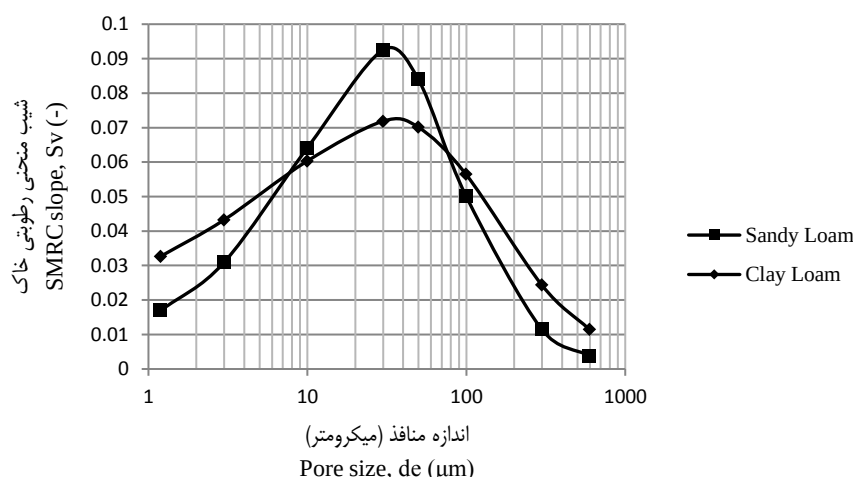
شاخص‌های شکل منحنی توزیع اندازه منافذ بیانگر وضعیت منافذ موجود در هر خاک در مقایسه با حالت لوگ نرمال است. در این خصوص شاخص کشیدگی منفی بیانگر زیادی نسبی منافذ کوچک، کشیدگی

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ خاک
Table 1- Soil pore size distribution curves location and shape parameters

	شکل (Shape)			موقعیت (Location)		
	افراستگی (Kurtosis)	کشیدگی (Skewness)	انحراف معیار (SD) (μm)	میانگین (d_{mean})	میانه (d_{median})	مد (d_{mode})
حداقل (Min)	1.14	-0.41	5.17	0.5	1.7	19.4
حداکثر (Max)	1.16	-0.21	254.36	25.1	64.8	486.9
میانگین (Mean)	1.15	-0.36	71.56	6.5	12.4	60.3

جدول ۲- مقادیر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی‌های توزیع اندازه منافذ خاک برای دو نمونه خاک با بافت متفاوت
Table 2- Soil pore size distribution curve location and shape parameters for two soil samples with different soil textures

بافت خاک (Soil texture)	شکل (Shape)			موقعیت (Location)		
	افراستگی (Kurtosis)	کشیدگی (Skewness)	انحراف معیار (SD) (μm)	میانگین (d_{mean})	میانه (d_{median})	مد (d_{mode})
لوم رسی (Clay loam)	1.16	-0.33	21.18	6.9	11.6	34.0
لوم شنی (Sandy loam)	1.15	-0.21	5.17	17.9	21.4	31.1



شکل ۱- منحنی توزیع اندازه منافذ برای دو نمونه خاک با بافت متفاوت
Figure 1- Soil pore size distribution curves for two soil samples with different soil textures

شده به منظور تبدیل مقادیر ویژگی‌ها به امتیاز (دامنه بین صفر و یک)، استفاده گردید (Velasquez *et al.*, 2007; Masto *et al.*, 2008; Zangiabadi *et al.*, 2021).

در نهایت با در نظر گرفتن وزن و امتیاز ویژگی‌های انتخاب شده، شاخص کیفیت فیزیکی برای ۳۰ نمونه خاک با استفاده از رابطه ۲ محاسبه شد (Masto *et al.*, 2008).

(۲) $SPQI = 0.46 * S_{PAW330} + 0.31 * S_{POR} + 0.15 * S_{LLWR100} + 0.08 * S_{SI}$
در این رابطه $SPQI$ معادل شاخص کیفیت فیزیکی خاک و S_{PAW330} ، S_{POR} ، $S_{LLWR100}$ و S_{SI} به ترتیب امتیاز ویژگی‌های آب قابل استفاده (۳۳۰)، تخلخل کل، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) و شاخص پایداری خاکدانه می‌باشند.

بیشترین و کمترین مقدار شاخص کیفیت فیزیکی خاک در محدوده مورد مطالعه به ترتیب ۰/۸۴ و ۰/۱۴ محاسبه شد.

نتایج بررسی شاخص کیفیت فیزیکی برای ۳۰ نمونه خاک مورد مطالعه حاکی از آن است که پنج نمونه خاک با داشتن شاخص بزرگتر از ۰/۷۸ در کلاس یک کیفیت فیزیکی (بیشترین کیفیت نسبی) خاک قرار دارند (Qi *et al.*, 2009). بر این اساس مقادیر بین حداقل و حداکثر شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ در این پنج نمونه خاک بیانگر حدود بهینه این شاخص‌ها می‌باشد.

جدول ۳ مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در کلاس یک شاخص کیفیت فیزیکی خاک و حدود بهینه ارائه شده در منابع را نشان می‌دهد.

از مجموع ۳۵ ویژگی و شاخص فیزیکی اندازه‌گیری و محاسبه شده در این مطالعه، تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از ماتریس همبستگی مربوط به ۲۹ ویژگی فیزیکی خاک انجام شد. نتایج نشان داد چهار ویژگی فیزیکی خاک شامل آب قابل استفاده (۳۳۰) با دامنه مقادیر بین ۰/۱۰-۰/۲۰ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، تخلخل کل با دامنه مقادیر بین ۰/۴۰-۰/۵۱ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) با دامنه مقادیر بین ۰/۱۲-۰/۲۲ سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و شاخص پایداری خاکدانه با دامنه مقادیر بین ۰/۶۱-۰/۷۶ درصد، می‌توانند حدود ۸۸ درصد مجموع واریانس خاک‌های مورد مطالعه را توجیه نمایند (Zangiabadi *et al.*, 2021). مشابه این نتیجه در خصوص تخلخل کل و آب قابل استفاده قبلاً توسط شون‌هولتز و همکاران (Schoenholtz *et al.*, 2000) و رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2008) نیز گزارش شده است. وزن هر ویژگی انتخاب شده در قالب تجزیه مؤلفه‌های اصلی از طریق محاسبه نسبت واریانس جزئی مؤلفه مربوط به آن ویژگی به واریانس تجمعی مجموع مؤلفه‌های اصلی با مقدار ویژه بزرگتر از یک، محاسبه شد (Masto *et al.*, 2008). بر این اساس آب قابل استفاده (۳۳۰) با وزن ۰/۴۶، تخلخل کل با وزن ۰/۳۱، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (۱۰۰) با وزن ۰/۱۵ و شاخص پایداری خاکدانه با وزن ۰/۰۸ در محاسبات شاخص کیفیت فیزیکی خاک لحاظ شدند.

به منظور بدون واحد نمودن ویژگی‌های انتخاب شده (تبدیل مقدار به امتیاز)، از توابع امتیازدهی خطی استفاده شد. توابع امتیازدهی دارای سه شکل صعودی (مقادیر بیشتر بهتر)، نزولی (مقادیر کمتر بهتر) و زنگوله‌ای (مقادیر بهینه بهتر) می‌باشند. در این مطالعه از روش امتیازدهی صعودی (مقادیر بیشتر بهتر) برای هر چهار ویژگی انتخاب

جدول ۳- مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در خاک‌های با بیشترین شاخص کیفیت فیزیکی خاک و حدود بهینه ارائه شده در منابع

Table 3- The minimum and maximum values of soil pore size distribution curves parameters for the soils with the highest SPQI and the optimal ranges in the literature

SI-Q1 and the optimal ranges in the literature							
		شکل (Shape)			موقعیت (Location)		
		افراستگی (Kurtosis)	کشیدگی (Skewness)	انحراف معیار (SD)	میانگین (d _{mean})	میانه (d _{median})	مد (d _{mode})
				(μm)		(μm)	
	حداقل (Min)	1.14	-0.38	22	2	5	29
	حداکثر (Max)	1.15	-0.33	81	7	16	92
حدود بهینه (Optimal range)	Reynolds <i>et al.</i> , 2009	1.13-1.14	(-0.43) -(-0.41)	400-1000	0.7-2	3-7	60-140
	Shahab <i>et al.</i> , 2013	1.15-1.16	(-0.40) -(-0.25)	8-95	1-7	3-13	10-45
	Ghiberto <i>et al.</i> , 2015	1.14-1.15	(-0.40) -(-0.38)	68.7-145.4	1.2-3	3.4-6.8	31-39
	Al-Kayssi, 2022	1.15-1.16	(-0.39) -(-0.24)	7-90	1-160	3-200	22-330

شاخص‌های میانه و مد اندازه منافذ خاک در خاک‌های با کیفیت فیزیکی نسبی بیشتر در این مطالعه نسبت به دیگر شاخص‌های بررسی شده هم‌خوانی کمتری با حدود بهینه ارائه شده در منابع دارند. بزرگتر بودن شاخص میانه در مقایسه با مقادیر پیشنهادی رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) توسط کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2014) نیز گزارش شده است.

در مجموع می‌توان گفت به جز شاخص مد در بقیه شاخص‌های موقعیت و شکل منحنی توزیع اندازه منافذ خاک، هم‌خوانی بسیار زیادی بین نتایج این مطالعه با حدود بهینه ارائه شده توسط شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) وجود دارد. تطابق نتایج این دو مطالعه حاکی از آن است که روش محاسبه شاخص کیفیت فیزیکی خاک و استفاده از دسته خاک‌های با بزرگترین مقدار این شاخص و روش استفاده از مقادیر بهینه ویژگی‌های فیزیکی خاک و استفاده از دسته خاک‌های با بیشترین تعداد ویژگی در دامنه مطلوب، روش‌های مناسبی برای تعیین حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند. لذا استفاده از نتایج این دو مطالعه به منظور ارزیابی و مقایسه کیفیت فیزیکی خاک‌های با بافت متوسط و سبک مناطق با اقلیم نیمه‌خشک ایران توصیه می‌گردد.

نتیجه‌گیری

دستیابی به حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک به‌عنوان یکی از ویژگی‌های فیزیکی مهم که دیگر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌تواند نقش مهمی در راستای مقایسه و مدیریت کیفیت فیزیکی خاک اراضی کشاورزی ایفا نماید. نتایج انجام این مطالعه که بر پایه استفاده از

بررسی نتایج ارائه شده در جدول ۳ و مقایسه آن با نتایج مطالعات قبلی در این خصوص نشان داد که منافذ خاک در خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی در این مطالعه به طور میانگین از اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتری (یکنواختی بیشتر) برخوردار هستند. کاستلینی و همکاران (Castellini *et al.*, 2014) نیز مقادیر بیشتر میانگین اندازه منافذ و مقادیر کمتر انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ نسبت به حدود بهینه پیشنهاد شده توسط رینولدز و همکاران (Reynolds *et al.*, 2009) را گزارش نموده و معتقدند که ممکن است حدود بهینه پیشنهاد شده توسط این محققین برای طیف وسیعی از خاک‌های کشاورزی قابل استفاده نباشد و لذا باید حدود بهینه شاخص‌های منحنی توزیع اندازه منافذ خاک در دامنه بزرگتری از کاربری اراضی، مدیریت و بافت خاک ارزیابی گردد. حدود بهینه ارائه شده در این مطالعه برای دو شاخص میانگین و انحراف معیار منحنی توزیع اندازه منافذ با حدود بهینه ارائه شده برای این دو شاخص در مطالعه شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) و برای شاخص انحراف معیار در مطالعه الکیسی (Al-Kayssi, 2022) مطابقت دارد.

بررسی حدود بهینه شاخص کشیدگی منحنی توزیع اندازه منافذ حاکی از آن است که فراوانی نسبی منافذ کوچک خاک در مطالعات قبلی بیشتر از این مطالعه است. اما در مجموع حدود بهینه شاخص کشیدگی نیز انطباق بیشتری با نتایج شهاب و همکاران (Shahab *et al.*, 2013) دارد.

مقادیر بهینه شاخص افراشتگی منحنی توزیع اندازه منافذ در این مطالعه با حدود بهینه گزارش شده در منابع هم‌خوانی دارد. مقدار بهینه این شاخص با نتیجه مطالعه جیبرتو و همکاران (Ghiberto *et al.*, 2015) کاملاً منطبق است.

شاخص‌های موقعیت منحنی توزیع اندازه منافذ شامل میانگین، میانه و مد اندازه منافذ به ترتیب ۲-۷، ۱۶-۵ و ۲۹-۹۲ میکرومتر و شاخص‌های شکل شامل انحراف معیار، کشیدگی و افراستگی منحنی به ترتیب ۲۲-۸۱ میکرومتر، $(-۰/۳۳)-(-۰/۳۸)$ و $۱/۱۴-۱/۱۵$ تعیین گردید.

شاخص کیفیت فیزیکی خاک برای تعیین حدود بهینه شاخص‌های ذکر شده قرار دارد حاکی از آن است که خاک‌های با بیشترین کیفیت فیزیکی نسبی، دارای منافذ با میانگین اندازه بزرگتر و تنوع اندازه کمتر از مقادیر بهینه ارائه شده در منابع می‌باشند. در این مطالعه حدود بهینه

منابع

- Al-Kayssi, A.W. (2022). Quantifying soil physical quality by using indicators and pore volume-function characteristics of the gypsiferous soils in Iraq. *Geoderma Regional*, 30, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00556>
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., & Dexter, A.R. (2010). Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil*, 335(1), 229–244. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0410-6>
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., & Dexter, A.R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.06.009>
- Castellini, M., Niedda, M., Pirastru, M., & Ventrella, D. (2014). Temporal changes of soil physical quality under two residue management systems. *Soil Use Management*, 30, 423–434. <https://doi.org/10.1111/sum.12137>
- Castellini, M., Pirastru, M., Niedda, M., & Ventrella, D. (2013). Comparing physical quality of tilled and no-tilled soils in an almond orchard in south Italy. *Italian Journal of Agronomy*, 8, 149–157. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e20>
- Ghiberto, P.J., Imhoff, S., Libardi, P.L., Da Silva, A.P., Tormena, C.A., & Pilatti, M. (2015). Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Scientia Agricola*, 72(2), 167–174. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0414>
- Hao, X., Ball, B.C., Culley, J.L.B., Carter, M.R., & Parkin, G.W. (2007). Soil density and porosity. p. 743–760. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nded. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
- Ibrahim, A. and Horton, R. (2021). Biochar and compost amendment impacts on soil water and pore size distribution of a loamy sand soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85, 1021–1036. <https://doi.org/10.1002/saj2.20242>
- Kraemer, F.B., Castiglioni, M., Morras, H., Fernandez, P., & Alvarez, C. (2022). Pores size distribution and pores volume density of Mollisols and Vertisols under different cropping intensity managements with no-tillage. *Geoderma*, 405, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115398>
- Kroetsch, D., & Wang, C. (2007). Particle size distribution. p. 713–725. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nded. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
- Larney, F.J. (2007). Dry-aggregate size distribution. p. 821–831. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nded. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
- Masto, R.E., Chhonkar, P.K., Singh, D., & Patra, A.K. (2008). Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 419–435. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9697-z>
- Qi, Y., Darilek, J.L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149, 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>
- Reynolds, W.D., & Clarke Topp, G. (2007). Soil water desorption and imbibition: tension and pressure techniques. p. 981–997. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nded. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Tan, C.S., Fox, C.A., & Yang, X.M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152, 252–263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., & Tan, C.S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.017>
- Reynolds, W.D., Drury, C.F., Yang, X.M., Tan, C.S., & Yang, J.Y. (2014). Impacts of 48 years of consistent cropping, fertilization and land management on the physical quality of a clay loam soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(3), 403–419. <https://doi.org/10.4141/cjss2013-097>
- Schoenholtz, S.H., Van Miegroet H., & Burger, J.A. (2000). A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 138, 335–356. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00423-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00423-0)
- Shahab, H., Emami, H., Haghnia, G.H., & Karimi, A. (2013). Pore size distribution as a soil physical quality index

- for agricultural and pasture soils in North-Eastern Iran. *Pedosphere*, 23(3), 312-320. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60021-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60021-1)
20. Skjemstad, J.O., & Baldock, J.A. (2007). Total and organic carbon. p. 225–237. In: Carter M.R., and Gregorich E.G. (eds.) *Soil Sampling and Methods of Analysis*. 2nded. Canadian Society of Soil Science. Taylor and Francis.
21. Ugalde, O.F., Virto, I., Bescansa, P., Imaz, M.J., Enrique, A., & Karlen, D.L. (2009). No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone, semiarid soils. *Soil and Tillage Research*, 106, 29–35. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.012>
22. Velasquez, E., Lavelle, P., & Andrade, M. (2007). GISQ, a multifunctional indicator of soil quality. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 3066–3080. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.06.013>
23. Zangiabadi, M., Gorji, M., Ghalebi, S., & RamezaniMoghaddam, M.R. (2017). Effects of soil pore size distribution on integral energy of different soil water ranges. *Soil Research*, 31(3), 463–472. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2017.113755>
24. Zangiabadi, M., Gorji, M., & Keshavarz, P. (2021). Determination of soil physical quality index in medium to coarse-textured soils of Khorasan-Razavi province. *Journal of Water and Soil*, 35(1), 107–119. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2020.15000.0>
25. Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., Khavari Khorasani, S., & Saadat, S. (2016). The Relationship between Integral Water Capacity (IWC) Index and Some Physical Properties in Khorasan-Razavi Province. *Journal of Water and Soil*, 30(4), 1192–1201. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i4.47544>



Investigating the Soil Evolution and Microbial Respiration along a Semi-Arid Alluvial Fan in Northeastern Iran

M. Hassanzadeh Bashtian¹, A. Karimi^{2*}, A. Sepehr³, A. Lakzian⁴, O. Bayat⁵

1, 2, and 4- Ph.D. Student and Professors, Department of Soil Science College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

3- Associate Professor, Department of Desert and Arid Zones Management College of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

5- Department of Geography, University of Zurich, Zurich, Switzerland

Received: 30-07-2023
Revised: 13-09-2023
Accepted: 26-09-2023
Available Online: 26-09-2023

How to cite this article:

Hassanzadeh Bashtian, M., Karimi, A., Sepehr, A., Lakzian, A., & Bayat, O. (2023). Investigating the soil evolution and microbial respiration along a semi-arid alluvial fan in northeastern Iran. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 733-749. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83632.1313>

Introduction

Soils and landforms have a strong relationship and archive evidence of climatic and environmental changes. Alluvial fans are one of the most important landforms in arid and semi-arid regions of Iran. Climate changes in the Quaternary, especially in the late Pleistocene, had a significant effect on the evolutions of alluvial fans in arid and semi-arid regions. Alternate of sedimentation and soil formation in alluvial are the consequences of periodic climate change. Organisms are one of the main factors of soil formation. Biological crusts are part of organisms that are abundant in dry lands and especially in alluvial fans; however, their role in soil formation has been less studied. Biological soil crusts by providing the suitable biological activity, effect on trapping of aeolian materials and hydrological processes affect the soil formation processes. The chemical properties of the soil affect the catabolic capacity of the soil and it is very different among the different layers of the soil. However, few studies have addressed the effect of processes on soil microbial respiration during change and evolution and pedogenic state. The objectives of this research were to 1) investigate the evolution of soils along the gradient from upstream to downstream of the alluvial fan and 2) investigate the changes in microbial respiration in different layers of soil and the factors affecting it.

Materials and Methods

The studied area is an alluvial fan in Razavi Khorasan province, in the southern slopes of the Binaloud mountain range. The climate of the region is semi-arid and the soil moisture and temperature regimes are Aridic border on Xeric and mesic, respectively. Three soil profile in the upper, middle, and base part of the alluvial fan were described. Bulk and undisturbed soil samples were collected from various soil horizons for subsequent physical, chemical, and micromorphological analyses. In addition, the microbial soil respiration was measured in all horizons. The soils were classified according to Soil Taxonomy and World Reference Base methods.

Results and Discussion

Sequences of sedimentation and soil formation were observed in the soil profiles. Vesicular (V), argillic (Bt), argillic-calcic (Btk), calcic (Bck) and cambic (Bw) horizons were the diagnostic soil horizons of the studied soils. Soil profiles of the middle and base were Xeric Calciargids in the subgroup category of Soil Taxonomy; while soil profile of the apex soil was Xeric Haplocambids. In the profiles, a thin vesicular horizon (V) was formed under



©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.2023.83632.1313>

the desert pavement. Below the vesicular horizon, evidence of clay illuviation, pedogenic carbonate nodules, and calcium oxalates in roots were observed in thin sections. This evidence shows the role of biological crusts in the formation of these features. In the lower horizons of the profiles, pedogenic carbonate nodules, carbonates pendants and clay coatings were observed. It seems that the upper soil (vesicular and underlying Bt horizons) were developed in the more humid periods of the Holocene, and biological crusts also played a key role in the processes of calcification and clay illuviation. The argillic horizons in the lower layers were formed during the stable periods of the late Pleistocene. The irregular microbial respiration mainly indicated difference in microbial activities labile organic matter content. The argillic horizons had the lowest microbial respiration, due to decomposition of organic materials during soil formation. In contrast, soil respiration was the highest in surface and calcic horizons. It seems that preservation of organic materials by carbonate complication. However, it is suggested to investigate the carbon fractions in relation to microbial biomass in the studied horizons.

Conclusion

In this area, biological crusts and vegetation affected the formation of soil in the aeolian sediments of the Vk and AVk horizons and played a significant role in creating the Bt horizon in profiles 2 and 3. The study of landform profiles showed the formation of calcic and argillic horizons in the past climate, while the Bt horizon of the upper layers was formed in the current Holocene period. This form of the argillic horizon is slightly different from the soils of the Iranian region because these horizons have not been reported so far. It has been proven that there were humid periods in the Holocene, and it needs more studies at present. The study of soil microbial respiration in landform horizons showed that argillic horizons decreased the amount of microbial respiration, while it increased in classical horizons.

Keywords: Argillic horizon, Biocrust, Calcium oxalate, Soil micromorphology, Vesicular horizon

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۴۹-۷۳۳

بررسی فرآیندهای تغییر و تحول و تنفس میکروبی خاک در امتداد یک مخروط افکنه نیمه خشک در شمال شرق ایران

مehوان حسن زاده بشتیان^۱ - علیرضا کریمی^{۲*} - عادل سپهر^۳ - امیر لکزیان^۴ - امید بیات^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

چکیده

خاک‌ها با اشکال اراضی که بر روی آن‌ها تکامل می‌یابند، ارتباط تنگاتنگ دارند و ویژگی‌های آن‌ها به نوبه خود بر تکامل ژئوفرم‌ها تأثیر می‌گذارد. این پژوهش به بررسی تغییر و تحول خاک در امتداد گرادیان ارتفاعی یک مخروط افکنه نیمه خشک در جنوب رشته کوه بینالود در شمال شرق ایران پرداخته است. همچنین، تأثیر فرآیندهای خاک بر تنفس میکروبی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در بخش بالایی، میانی و قاعده مخروط افکنه، هر کدام، یک خاکرخ شاهد تشریح و از افق‌های آن‌ها نمونه برداری شد. آزمایش‌های معمول فیزیکی و شیمیایی، میکرومورفولوژی و تنفس میکروبی بر روی نمونه‌ها انجام شد. همچنین، طبقه‌بندی خاکرخ‌های مطالعاتی براساس دو سامانه آمریکایی و جهانی صورت گرفت. در هر سه خاکرخ، توالی‌های رسوبگذاری و خاک‌سازی مشاهده شد. افق‌های وزیکولار (V)، آرجیلیک (Bt)، آرجیلیک-کلسیک (Btk)، کلسیک (Bck) و کمبیک (Bw) شناسایی شدند. هر دو سامانه بخش بالایی را در طبقه‌بندی متمایزی از دو بخش دیگر قرار دادند. خاک‌های میانه و قاعده مخروط افکنه براساس سامانه رده‌بندی آمریکایی در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفتند، در حالی که خاکرخ بالایی را در Xeric Haplocambids قرار داد. در هر سه خاکرخ افق وزیکولار نازک در زیر سنگفرش بیابانی، تشکیل شده بود. در زیر افق وزیکولار، شواهد پوسته‌های رسی، نودول‌های کربنات پدوژنیک و اگزالات‌های کلسیم در ریشه‌ها در مقاطع نازک مشاهده شد. این شواهد نشان‌دهنده نقش پوسته‌های زیستی در تشکیل این ویژگی‌ها است. در افق‌های زیرین خاکرخ‌ها، نودول‌های کربنات پدوژنیک، پندانت‌های آهکی و پوسته‌های رسی مشاهده شد. وجود توالی‌های رسوبگذاری و افق‌های کلسیک و آرجیلیک، نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در تناوب تغییرات اقلیمی است. به نظر می‌رسد که خاک رویین در هر سه خاکرخ، در دوره‌های مرطوب‌تر هولوسن تشکیل شده است و پوسته‌های زیستی هم در فرآیندهای آهکی شدن و انتقال و تجمع رس نقش داشته‌اند. افق‌های آرجیلیک در لایه‌های زیرین، در دوره‌های پایدار پلیستوسن انتهایی تشکیل شده‌اند. مطالعه تنفس میکروبی خاک در افق‌های مختلف نشان داد که در افق‌های آرجیلیک میزان تنفس میکروبی کاهش یافته است؛ در حالی که در افق‌های کلسیک افزایش داشته است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی مقادیر اجزای کربن در ارتباط با زیست‌توده میکروبی در افق‌ها و خاک‌های قدیمی بررسی گردد.

واژه‌های کلیدی: افق آرجیلیک، افق وزیکولار، اگزالات کلسیم، پوسته زیستی، میکرومورفولوژی خاک

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری و استادان گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳ - دانشیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۵ - گروه جغرافیا، دانشگاه زوریخ، زوریخ، سوئیس

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

مقدمه

خاک‌ها زمانی که در شرایط محیطی پایدار قرار گیرند با تغییر خصوصیات بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی تحت تأثیر عوامل خاک‌سازی به سمت تکامل پیش می‌روند. افق‌های خاک‌ها از تعامل عوامل و فرآیندهای خاک‌سازی در محیط پویای شکل‌های اراضی ایجاد می‌شوند. موقعیت تشکیل خاک در شکل اراضی و اقلیم از جمله عوامل خاک‌سازی هستند که سرعت تشکیل و تحول خاک را مشخص می‌کنند (Buol et al., 2011). خاک‌ها ارتباط نزدیک و متقابلی با شکل‌های اراضی که بر روی آن‌ها تشکیل شده‌اند، دارند و شاهدی بر تغییرات اقلیمی و محیطی هستند که در طی زمان تغییر می‌کنند. بنابراین، اطلاعات حاصل از خاک‌ها برای بازسازی تغییر و تحول شکل‌های اراضی به کار برده می‌شود (Schaetzl and Thompson, 2015). تغییرات اقلیمی در کوتاه‌مدت، به‌ویژه در پلئستوسن انتهایی، تأثیر قابل توجهی بر تغییر و تحولات مخروط‌افکنه‌ها در مناطق خشک و نیمه خشک داشته است. در دوره‌های مرطوب پلئستوسن، جریان‌های آبرفتی، مواد رسوبی بیشتری را به مناطق پایین‌دست انتقال داده و موجب شکل‌گیری گسترده مخروط‌افکنه‌ها شده است (Ponti, 1985; Stock et al., 2008). اگر چه ترتیب و توالی رسوبگذاری مخروط‌افکنه‌ها در پاسخ به تغییرات اقلیم و در نتیجه پوشش گیاهی رخ داده است؛ با این حال، نقش عوامل دیگر به‌ویژه تکتونیک، سازند زمین‌شناسی، شرایط توپوگرافی و هیدرولوژی نیز از عوامل تعیین‌کننده در تشکیل و گسترش مخروط‌افکنه‌ها هستند. تناوب رسوبگذاری و خاک‌سازی در شکل‌های اراضی دامنه‌ای، به‌ویژه در مخروط‌افکنه‌ها، به‌عنوان شواهدی از تغییر و تحول مخروط‌افکنه استفاده شده است (Stock et al., 2008; Bayat et al., 2013; Ghasemzadeh Ganjehie et al., 2017).

در دوره‌های عدم ثبات، رسوبگذاری در مخروط‌افکنه فعال است و بسته به شدت این فرآیند، ممکن است رسوبات مختلفی از نظر اندازه ذرات و جورشدگی منتقل شوند که لایه‌بندی متفاوت این رسوبات گواه این مطلب است (Stock et al., 2008). در دوره‌های ثبات، شرایط برای تشکیل خاک مناسب است که بر اساس شرایط محیطی، خاک‌های باتکامل متفاوت تشکیل می‌شوند. به‌عنوان مثال، افق‌های آرجیلیک، یکی از متکامل‌ترین افق‌های تشکیل شده در مناطق خشک هستند که معمولاً در دوره‌های مناسب پلئستوسن تشکیل شده‌اند. در حالی که خاک‌های تشکیل شده در هولوسن معمولاً تکامل کمی دارند و دارای افق‌های کلسیک و کمبیک هستند (Khormali et al., 2003; Karimi et al., 2011; Rashidi et al., 2022). شواهد مورفولوژیکی افق‌ها در صحرا، ویژگی‌های میکرومورفولوژیکی و

کانی‌شناسی، از مهم‌ترین شواهد مطالعه و تشخیص این خاک‌ها و شرایط تشکیل آنها است (Bullock et al., 1985; Stoops, 2018). موجودات زنده یکی از عوامل اصلی تشکیل خاک هستند (Jenny, 1981). از ابتدایی‌ترین موجودات زنده که باعث هوازدگی کانی‌ها و تجمع رسوبات و عناصر با ایجاد پستی و بلندی می‌شوند (Williams et al., 2012)، پوسته‌های زیستی خاک^۱ هستند که شامل سیانوباکترها، جلبک‌ها، قارچ‌ها، گل‌سنگ‌های خاکریز و خزها می‌باشند (Weber et al., 2022). پوسته‌های زیستی، نقش حیاتی در فرآیندهای خاک از جمله هوازدگی سطحی و فرآیندهای هیدرولوژیکی مانند نفوذ و تبخیر، ایفا می‌کنند (Sun et al., 2023). آن‌ها باعث افزایش کربن آلی، تنفس میکروبی، خاکدانه‌سازی و ایجاد مقاومت در برابر فرسایش خاک می‌شوند (Xiao et al., 2022). تنفس میکروبی خاک طی مصرف مواد آلی توسط ریزجانداران، باعث تولید دی‌اکسید کربن اتمسفر می‌شود. این موضوع، نشان‌دهنده فعالیت متابولیکی کلی جمعیت‌های میکروبی خاک است و معمولاً به‌عنوان شاخص سلامت خاک استفاده می‌شود. خواص شیمیایی خاک بر ظرفیت کاتابولیک خاک تأثیر می‌گذارد و در بین لایه‌های مختلف خاک بسیار متفاوت هستند (Weldmichael et al., 2020). دی‌اکسیدکربن تولید شده توسط فعالیت بیولوژیکی موجودات خاک، یک جریان اصلی در چرخه جهانی کربن محسوب می‌شود (Le Quéré et al., 2015). غلظت بالای دی‌اکسیدکربن در اعماق بیش از یک متر توسط پژوهشگران مختلف (از جمله: Wood et al., 1993; Trumbore et al., 2006) مشاهده شده است. با این وجود، تعداد کمی از مطالعات به اثر فرآیندها بر تنفس میکروبی خاک در طول تغییر و تحولات خاک‌سازی پرداخته است. مخروط‌افکنه‌ها، از مهم‌ترین شکل‌های اراضی مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران هستند. تناوب رسوبگذاری و خاک‌سازی، از ویژگی‌های شناخته شده در مخروط‌افکنه‌ها می‌باشند که برای مطالعات تغییر و تحولات خاک و شکل اراضی مناسب هستند (Stock et al., 2008; Ghasemzadeh Ganjehie et al., 2017). پوسته‌های زیستی، بخشی از موجودات زنده هستند که در مناطق خشک و در مخروط‌افکنه‌ها به فراوانی وجود دارند؛ ولی کمتر به نقش آنها در تشکیل خاک پرداخته شده است. هدف از این پژوهش، (۱) بررسی تغییر و تحول خاک‌ها در امتداد گرادیان یک مخروط‌افکنه از بالادست به سمت پایین‌دست آن براساس ویژگی‌های مورفولوژیکی و میکرومورفولوژی خاک و (۲) بررسی تغییرات تنفس میکروبی در افق‌ها و یا لایه‌های مختلف خاک و تعیین عوامل مؤثر بر آن‌ها می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه یک مخروط افکنه در استان خراسان رضوی و در دامنه‌های جنوبی بینالود می‌باشد که در محدوده جغرافیایی $36^{\circ}10'39''$ تا $36^{\circ}10'13''$ طول شرقی و $58^{\circ}59'34''$ تا $59^{\circ}01'18''$ عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). مخروط افکنه مورد مطالعه در سطح اراضی هموار قرار دارد، زیرا شیب آن بین ۳-۸ درصد و شدت پستی و بلندی (میانگین ۴۶/۵ متر بر کیلومتر (ارتفاع به فاصله)) کمتر از ۵۰ متر بر کیلومتر است. فرم شیب به صورت شعاعی و محدب می‌باشد. رسوبات آن از سازندهای بالادست تشکیل شده‌اند که از سنگ های رسوبی کربناتی سنگ آهک و دولومیت، سنگ‌های رسوبی آواری ماسه سنگ و کنگلومرا، شیل و کوارتزیت دگرگون شده و سنگ‌های آذرین بازالت، آندزیت و توف منشأ گرفته‌اند (Geological map of Neyshabur, 1:100000 scale). این منطقه دارای پوشش گیاهی یکساله، چندساله و بوته‌ای، و همچنین، دارای پوسته‌های زیستی خزه، گل‌سنگ، سیانوباکتر و جلبک سبز است (Bashtian et al., 2019).

منطقه مورد مطالعه در حوزه آبریز نیشابور قرار گرفته و میانگین دمای سالیانه آن، $13/5$ درجه سلسیوس و میانگین بارش سالیانه آن، $247/4$ میلی‌متر می‌باشد (بر اساس داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و کليما تولوژی سال‌های ۱۹۹۱-۲۰۱۷ از سازمان هواشناسی کشور) و منطقه از اقلیمی نیمه خشک (بر اساس اقلیم نمای دومارتن) بهره می‌برد (Dowlatabadi et al., 2022). براساس اطلاعات اقلیمی رژیم رطوبتی خاک منطقه، اریدیک در مرز زیریک^۱ و رژیم حرارتی خاک آن، مزیک^۲ محاسبه شد (Soil Survey Staff, 2022).

مطالعات صحرائی

حفر خاک‌رخ‌ها برای بررسی تغییر و تحول خاک در امتداد گرادیان ارتفاعی، در سه بخش بالایی (خاک‌رخ شماره ۱)، میانه (خاک‌رخ شماره ۲) و قاعده (خاک‌رخ شماره ۳) مخروط افکنه در فواصل ۳۰۰ متری از یکدیگر انجام شد. پس از تشریح صحرائی خاک‌رخ‌ها، از افق‌های ژنتیکی آن‌ها برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی لازم نمونه برداری شد. همچنین نمونه خاک دست نخورده به منظور انجام مطالعات میکرومورفولوژی از برخی افق‌ها برداشت گردید، بدین صورت که اطراف نمونه را خالی و سپس در جعبه مخصوص قرار داده و به آزمایشگاه منتقل شد. به علاوه، نمونه‌های مرطوب خاک برای اندازه گیری تنفس میکروبی هر کدام از افق‌ها برداشت شد.

آنالیزهای آزمایشگاهی

نمونه‌های خاک، پس از انتقال به آزمایشگاه، به منظور انجام تجزیه های فیزیکی و شیمیایی، هوا خشک و سپس از الک دو میلی متری عبور داده شدند. سپس، بافت خاک آن‌ها به روش هیدرومتر (ASTM 152H) (Gee and Bauder, 1986)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در سوسپانسیون ۱:۱ خاک - آب توسط هدایت سنج الکتریکی و پی‌اچ متر (Jenway Inc, England)، میزان کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Allison and Moodie, 1965)، گچ به روش آون خشک (Omran, 2016) و کربن آلی خاک به روش اکسایش دی کرومات (Nelson and Sommers, 1996) اندازه گیری شدند. اندازه گیری تنفس میکروبی به روش تیتراسیون برگشتی انجام گرفت (Anderson, 1982). برای این منظور، ۳۰ گرم خاک تازه را در یک پلیت کوچک در یک ظرف ۱۰۰۰ میلی لیتری حاوی ۱۰۰ میلی لیتر هیدروکسید سدیم ۰/۰۵ مولار قرار داده و درپوش آن را بسته و در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به مدت سه روز نگهداری گردید، سپس به هیدروکسید سدیم ۱۰ میلی لیتر کلرید باریم اضافه شد و در نهایت محلول با هیدروکلریک اسید ۰/۰۵ مولار در حضور فل قاتلین به روش تیتراسیون برگشتی اندازه گیری شد. همچنین از نمونه‌های مرطوب برای اندازه گیری رطوبت خاک به روش وزنی (آون خشک) استفاده گردید.

نمونه‌های دست نخورده پس از اینکه هوا خشک شدند، با استفاده از ترکیب ۶۰ درصد رزین پلی استر، ۴۰ درصد استون، ۱۴ قطره اسید استئاریک و ۷ قطره کبالت، به آرامی اشباع شدند. نمونه‌ها پس از حدود دو ماه، خشک و سپس توسط دستگاه برش، به قطعات کوچکتر تبدیل شدند و در ادامه بر روی لام چسبانده و نازک گردیدند. سپس با پودر کراندوم به ضخامت ۳۰ میکرون متر رسانده شدند. به منظور مطالعه میکرومورفولوژی، مقاطع نازک حاصل توسط میکروسکوپ پلاریزان در نور عادی (PPL^۳) و پلاریزه متقاطع (XPL^۴) براساس روش استوپس (2003) بررسی و عکس برداری شدند.

با توجه به مطالعات صحرائی و نتایج آزمایشگاهی حاصل، خاک‌رخ های مورد نظر بر اساس سامانه‌های رده بندی آمریکایی^۵ (Soil Survey Staff, 2022) و جهانی^۶ (WRB, 2022) طبقه بندی شدند.

4- Cross Polarized Light

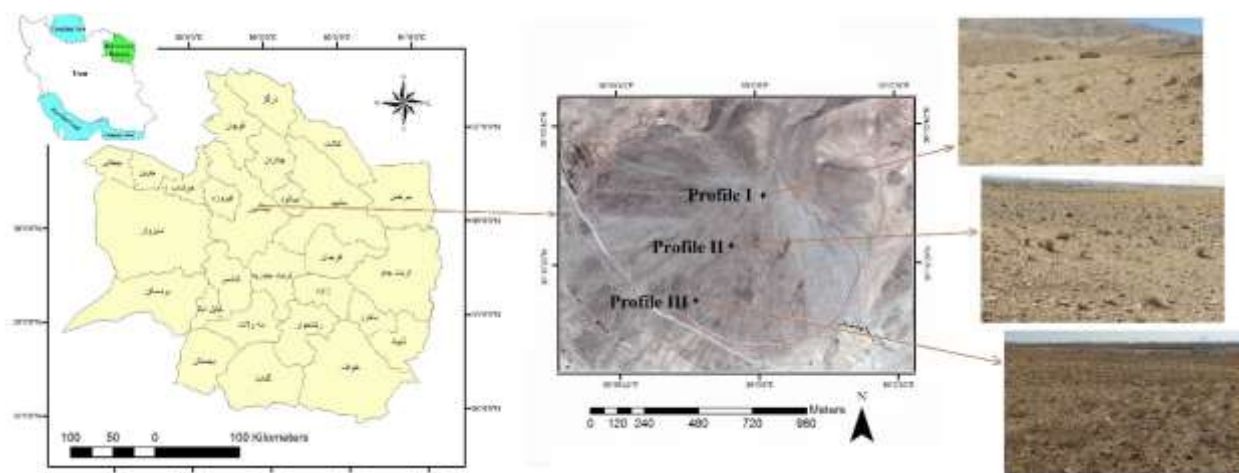
5- Soil Taxonomy

6- WRB (World Reference Base)

1- Aridic border on Xeric

2- Mesic

3- Plain Polarized Light



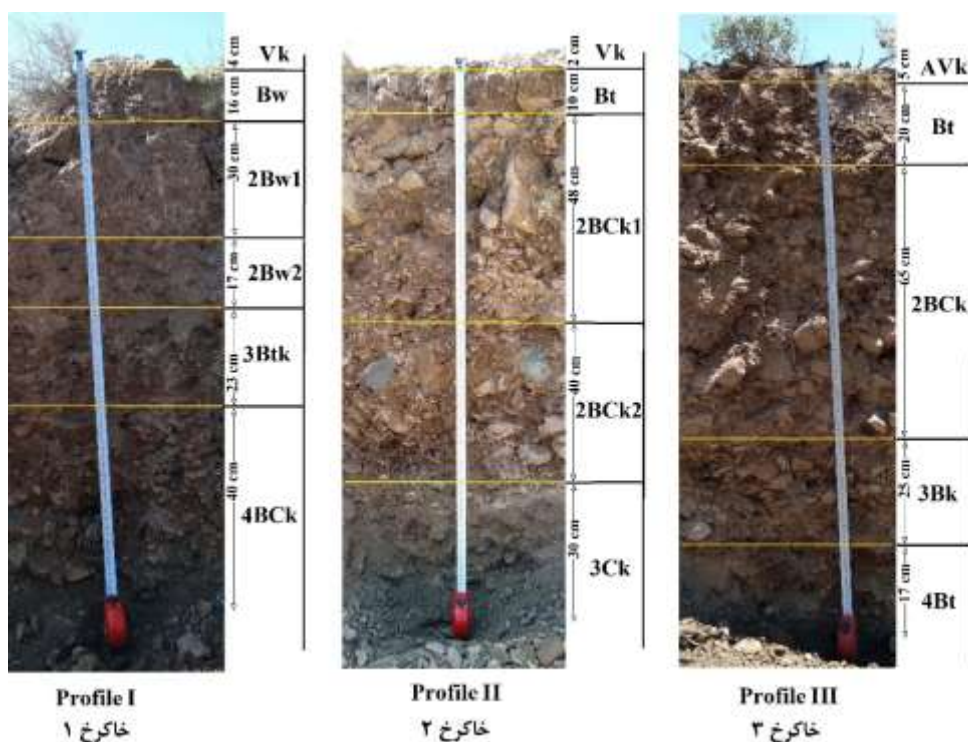
شکل ۱- موقعیت منطقه و خاکرخ‌های مورد مطالعه در آن به همراه نمای سطحی مخروط افکنه
Figure 1- The location of the studied area and the studied profiles along the surface of the alluvial fan

نتایج

ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی افق‌های خاکرخ‌ها

مورفولوژی و ترتیب و توالی افق‌های شناسایی شده در خاکرخ‌ها

در شکل ۲ نشان داده شده است. وجود لایه‌های متناوب رسوبات آبرفتی با مقادیر متفاوت قطعات سنگی نشان‌دهنده دوره‌های رسوبگذاری است که از ویژگی‌های رسوبات مخروط افکنه است و باعث ایجاد انقطاع سنگی در خاکرخ‌ها شده است. ویژگی‌های مورفولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاکرخ‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است.



شکل ۲- مقاطع خاکرخ‌های مورد مطالعه و افق‌های شناسایی شده در آنها
Figure 2- The sequences of layers and horizons in the studied profiles
جدول ۱- برخی ویژگی‌های صحرایی و مورفولوژیکی افق‌های خاکرخ‌های مورد مطالعه

Table 1- Some field and morphological characteristics of the studied profile

افق Horizon	عمق (cm) Depth	رنگ خشک Dry color	رنگ مرطوب Wet color	قطعات سنگی (%) Coarse fragments	بافت Texture	ساختمان Structure*	تجمعات و مورفولوژی خاک Aggregations and soil morphology
Profile I خاکرخ شماره ۱							
Vk	0-4	10YR6/4	10YR5/4	15	cl	1 vn pl	Low biological crusts, biogenic carbonate
Bw	4-20	10YR6/4	10YR4/4	15	cl	2 vf sbk	Iron oxide matrix, low clay coating
2Bw1	20-50	10YR6/4	10YR4/4	18	cl	2 vf abk	Low Carbonate nodule, low clay coating, free iron oxide
2Bw2	50-67	10YR6/4	10YR4/4	18	l	2 vf sbk	Iron oxide nodule, low clay coating
3Btkb	67-90	7.5YR6/4	7.5YR4/4	52	scl	3 f sbk	Clay coating, iron oxide, carbonate nodule
4BCkb	90-130	10YR6/4	10YR5/4	55	scl	1 vf sbk	Carbonates pendants
Profile II خاکرخ شماره ۲							
Vk	0-2	10YR6/3	10YR4/3	20	l	3 vn, tn pl	Biological crusts, biogenic carbonate
Bt	2-12	7.5YR5/4	7.5YR4/4	10	cl	3 f abk	Iron oxide matrix, clay coating, red color
2BCk1	12-60	10YR6/4	10YR5/4	80	cl	1 f abk	Carbonates pendants
2BCk2	60-100	10YR6/3	10YR4/3	80	cl	1 vf, f abk	Carbonates pendants
3Ck	100-130	10YR7/3	10YR5/4	80	cl	0 sgr	Carbonates pendants
Profile III خاکرخ شماره ۳							
AVk	0-5	10YR5/4	10YR4/4	10	l	3 vn, tn pl	Biological crusts, biogenic carbonate, dark soil color
Bt	5-25	7.5YR5/4	7.5YR4/4	20	l	2 vf, f abk	Iron oxide matrix, clay coating
2BCk	25-90	10YR6/3	10YR4/3	78	scl	1 f sbk	Carbonates pendants
3Bk	90-115	10YR6/4	10YR4/4	75	scl	1 vf sbk	Carbonates pendants, sandy texture
4Bt	115-130	7.5YR5/4	7.5YR4/4	10	l	3 vf, f abk	Iron oxide matrix, deformed clay coating, red color

* Abbreviations used to describe soil texture and structure are based on the guidelines of the soil description and sampling book (Schoeneberger *et al.*, 2012).

cl: Clay loam, l: Loam, scl: Sandy clay loam, 0: Structureless, 1: Weak, 2: Moderate, 3: Strong, f: Fine, t: Thin, vf: Very fine, vn: Very thin, abk: Angular blocky, sbk: Subangular blocky, pl: Platy, sgr: Single grain.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی افق‌های خاکرخ‌های مورد مطالعه

Table 2- Some physical and chemical characteristics of the studied profile

افق Horizon	عمق (cm) Depth	رس (%) Clay	سیلت (%) Silt	شن (%) Sand	pH	EC (dS/m)	کلسیم کربنات معادل (%) calcium carbonate equivalent	کربن آلی (%) Organic carbon	تنفس میکروبی microbial respiration (mg/kg*day)	گچ (%) Gypsum
Profile I خاکرخ شماره ۱										
Vk	0-4	31.5	34.1	34.4	8.25	0.34	23.75	0.25	51.33	1.26
Bw	4-20	28.3	36.5	35.2	8.48	0.26	18.25	0.29	15.89	1.39
2Bw1	20-50	27.7	28.9	43.4	8.27	0.43	22.75	0.12	63.56	1.68
2Bw2	50-67	25.7	28.9	45.4	8.42	0.22	22.00	0.10	40.33	1.30
3Btkb	67-90	28.3	26.3	45.4	8.49	0.21	24.88	0.10	23.22	1.16
4BCkb	90-130	23.3	21.3	55.4	8.38	0.20	30.63	0.12	72.11	1.17
Profile II خاکرخ شماره ۲										
Vk	0-2	21.7	37.9	40.4	8.16	0.41	20.38	0.62	105.11	1.42
Bt	2-12	36.3	29.3	34.4	8.78	0.37	19.00	0.14	50.11	2.02
2BCk1	12-60	36.7	29.9	33.4	8.90	0.34	25.38	0.14	56.22	1.71
2BCk2	60-100	31.3	27.3	41.4	9.14	0.39	29.75	0.04	20.78	1.31
3Ck	100-130	35.3	29.3	35.4	9.01	0.39	29.00	0.04	31.78	1.64
Profile III خاکرخ شماره ۳										
AVk	0-5	22.9	42.7	34.4	8.09	0.45	16.63	0.82	45.22	1.30
Bt	5-25	27.5	37.3	35.2	7.64	0.26	16.20	0.43	44.00	1.43
2BCk	25-90	25.3	27.3	47.4	8.40	0.21	22.75	0.14	14.67	1.03
3Bk	90-115	20.7	18.3	61.0	8.74	0.27	28.63	0.10	77.00	1.31
4Bt	115-130	19.7	39.3	41.0	8.65	0.29	24.13	0.00	18.33	1.53

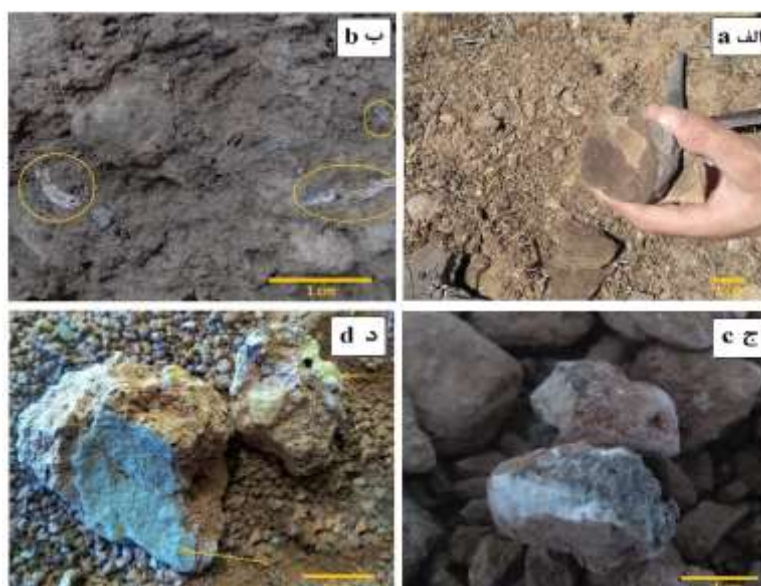
است که به عنوان انقطاع سنگی شناسایی گردید. در این افق، پندانت های آهکی در زیر سطوح سنگی که در شکل ۴ ج مشاهده می گردد و نشانگر افق مشخصه کلسیک خاک است. بخش سوم این خاکرخ دارای افق 3Ck است که دارای رنگ روشن تری نسبت به افق های رویین است. این افق بدون ساختمان، دارای پندانت آهکی در زیر سطوح سنگی است. بافت خاک این خاکرخ لوم رسی می باشد. EC خاک حداکثر ۰/۴۱ دسی زیمنس بر متر، pH در امتداد خاکرخ از ۸/۱۶ در سطح به ۹/۱۴ در لایه های زیرین می رسد و مقدار کربنات کلسیم معادل ۲۹/۷۵-۱۹ درصد متغیر بود.

خاکرخ شماره ۳، در قاعده مخروط افکنه قرار دارد که چهار دوره رسوبگذاری و به تبع آن چهار انقطاع سنگی تشخیص داده شد. بخش اول، دارای افق های AVk و Bt با ضخامت ۲۵ سانتی متر می باشد. افق AVk به دلیل داشتن ۰/۸ درصد کربن آلی و کمی تیره رنگ بودن در افق اصلی A قرار گرفته و به دلیل ساختمان وزیکولار و وجود پوسته های زیستی خاک به عنوان افق اصلی V نیز شناسایی شد. این افق کربنات بیوژنیک (شکل ۴ ب) در بخش ریشه ها تشکیل شده است ولی به دلیل نبود سایر شرایط افق کلسیک، به عنوان افق ژنتیکی در نظر گرفته شد. افق Bt این خاکرخ مشابه افق Bt در خاکرخ شماره ۲ می باشد و دارای ساختمان بلوکی متوسط است. بخش دوم دارای افق 2Bck (۲۵-۹۰ سانتی متر) به رنگ 10YR6/3 متمایز از رنگ افق رویین و دارای ۷۸ درصد قطعات سنگی، مشابه افق 2Bck خاکرخ شماره ۲، و دارای پندانت آهکی و شرایط افق کلسیک است. افق 3Bk دارای رنگ قهوه ای متمایل به زرد، بافت شنی تر و قطعات سنگی در اندازه کوچک تر از افق رویین، و به علت داشتن شرایط خاک سازی و کربنات پدوژنیک به عنوان افق B در نظر گرفته شد. بخش آخر این خاکرخ، از یک افق 4Bt، قرمز رنگ (7.5YR5/4)، دارای ساختمان بلوکی، پوسته رسی و بافت لومی، تشکیل شده است. همچنین، مقدار قطعات سنگی به طور محسوسی (۱۰ درصد) کمتر از افق رویین بود. بافت خاک در افق های کلسیک، لوم رسی شنی و در سایر لایه ها، لومی بود. مقدار کربنات کلسیم معادل در این خاکرخ ۲۸/۶-۱۶/۲ درصد متغیر بود. pH خاک ها بین ۸/۷۴-۷/۶۴ و EC آن ها حداکثر ۰/۴۵ دسی زیمنس بر متر بود.

سطح خاک مخروط افکنه بیش از ۲۰ درصد اجزاء درشت تر از دو میلی متر دارد و دارای سطوح جلای بیابانی^۱ می باشند (شکل ۳ الف). نکته جالب توجه در هر سه خاکرخ، وجود افق وزیکولار (V) است که دارای ساختمان ورقه ای و وزیکولار است. در این افق کربنات های پدوژنیک هم مشاهده شد که بخشی از آن، کربنات بیوژنیک است که در ریشه ها تشکیل شده است (شکل ۳ ب). در خاکرخ های مورد مطالعه افق سطحی اکریک و افق های زیرسطحی کمبیک (Bw)، کلسیک (Bk)، آرجیلیک (Bt) و کلسیک-آرجیلیک (Btk) وجود داشت.

خاکرخ شماره ۱، در بالادست مخروط افکنه قرار دارد. این خاکرخ دارای پنج افق متفاوت و چهار تغییر در نوع ماده مادری (انقطاع سنگی) است. در زیر افق وزیکولار نازک (Vk)، افق کمبیک (Bw) در عمق ۲۰-۴ سانتی متری قرار دارد که شواهدی کمی از پوسته رسی دارد و رنگ آن نسبت به افق رویی تیره تر و نسبت به افق های آرجیلیک روشن تر است (جدول ۱). در زیر افق Bw لایه با تکامل کم افق های کمبیک (2Bw1, 2Bw2) از نظر مقدار و شکل قطعات سنگی متفاوت از افق فوقانی و دارای کمی نودول های کربنات ثانویه بود. در زیر این افق ها، افق 3Btkb با ۵۲ درصد قطعات سنگی وجود داشت که نشان دهنده رسوبگذاری متفاوت بود و به عنوان انقطاع سنگی شناسایی شد. رنگ قهوه ای روشن متمایل به قرمز این افق نشان دهنده نودول و تجمعات کربنات ها (شکل ۳ د) به عنوان افق کلسیک و وجود پوسته رسی به عنوان افق آرجیلیک است. این افق دارای بافت متمایز نسبت به افق های رویین خود است (رس لومی شنی). افق 4Bckb در اعماق پایین تر این خاکرخ قرار دارد. این افق به دلیل وجود پندانت های آهکی در زیر سطوح سنگی، سنگریزه های درشت تر (شکل ۲) و رنگ متفاوت از افق رویین به عنوان انقطاع در نظر گرفته شد. بافت خاک در این خاکرخ از لوم رسی در افق های سطحی تا رس لومی شنی در افق های زیرین تغییر کرد. مقدار شن در افق زیرین، بیشترین مقدار (۵۵ درصد) را داشت. تغییرات نامنظم مقدار کربن آلی در این خاکرخ نشان دهنده تغییر در رسوبگذاری مواد آبرفتی است. مقدار کربنات کلسیم معادل نیز از ۳۰-۱۸ درصد متغیر بود. pH خاک ها کمتر از ۸/۵ و EC آن ها حداکثر ۰/۴۳ دسی زیمنس بر متر بود.

خاکرخ شماره ۲، در بخش میانی مخروط افکنه قرار گرفته است. بخش اول این خاکرخ دارای افق های Vk (صفر تا ۲ سانتی متر) و Bt (۲-۱۲ سانتی متر) است. افق Bt قرمز رنگ (7.5YR5/4)، با ساختمان بلوکی و بافت لوم رسی، دارای پوسته رسی که مقادیر رس و عمق آن نشان دهنده افق مشخصه آرجیلیک است. بخش دوم این خاکرخ، افق 2Bck1 و 2Bck2 می باشد که رنگ خاک آن ها از افق رویین متمایز است و دارای ۸۰ درصد قطعات سنگی که نمایانگر رسوبگذاری متفاوتی



شکل ۳- الف) سنگ‌های دارای جلای بیابان در سطح خاک (پیشوند Yermic در طبقه‌بندی جهانی)، ب) کلسیم کربنات بیوزنیک در افق سطحی خاک، ج) تشکیل پندت آهکی در زیر سنگریزه‌ها در افق‌های Bck، Bk و Ck، د) نودول و تجمع آهک در افق Btk خاکش شماره ۱
Figure 3- a) Desert varnish rocks on the soil surface (prefix Yermic in the WRB), b) biogenic calcium carbonate in the surface soil horizon, c) formation of carbonates under the pebbles in the Bck, Bk, and Ck horizons, d) nodule and carbonates accumulation in the Btk horizon of profile

تغییرات کربن آلی و تنفس میکروبی خاک

با توجه به شکل ۴ الف، مقدار رطوبت در سطح خاک مخروط افکنه از بالا به سمت قاعده، به علت شیب، کمی افزایش یافته و نفوذ آب در هرسه خاکرخ در دومین لایه افزایش داشته است. روند رطوبت به افق‌های انتهایی در خاکرخ شماره ۱ افزایشی بوده است. رطوبت موجود در خاکرخ شماره ۲ در افق 2Bck2 کاهش را نشان داد، زیرا مقدار شن این لایه بیشتر بوده و ماده مادری در لایه زیرین تغییر کرده است. رطوبت در افق‌های 2Bck و 3Bk خاکرخ شماره ۳ نیز کاهش داشته است، زیرا بافت خاک این دو افق درشت‌تر از افق‌های رومین و زیرین است و افق 3Bk کاهش بیشتری را نشان داد زیرا دارای بافت شنی تری بود. مطابق با شکل ۴ ب، میزان کربن آلی در سطح مخروط افکنه از بالادست به سمت پایین‌دست افزایش یافته است در حالی که به طور کلی در طول خاکرخ‌ها کاهش یافته است. بررسی تنفس میکروبی در سطح خاک شکل اراضی نشان داد که خاکرخ‌های شماره ۱ و ۳ دارای میزان مشابهی تنفس میکروبی هستند و مقدار کمتری نسبت به خاکرخ شماره ۲ دارند (شکل ۴ ج). روند تنفس میکروبی در طول هر سه خاکرخ نشان داد که در افق حاوی آرجیلیک، تنفس کاهش داشته است و در افق‌های کلسیکی به جزء افق 2Bck خاکرخ شماره ۳ افزایش یافته است.

روابط فیزیکی و شیمیایی خاک با افق‌ها

به منظور بررسی ارتباط خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک با افق‌های مختلف خاک از آنالیز مؤلفه اصلی (PCA^۱) با استفاده از نرم افزار JMP PRO 16 بهره گرفته شد. نتایج PCA سه فاکتور اصلی را ارائه کرد که دارای مقادیر ویژه بیشتر از یک بودند و ۸۱ درصد از تغییرپذیری را توضیح دادند. مطابق با شکل ۵ فاکتور اول ۴۰/۵ درصد از کل تنوع را تخمین زد که بیشترین ارتباط مثبت را به ترتیب با کربنات کلسیم معادل، pH و قطعات سنگی، و بیشترین ارتباط منفی را با سیلت و کربن آلی داشت. فاکتور دوم ۲۵/۷ درصد از تغییرات را بیان کرد و بیشترین ارتباط را با مقادیر شن، گچ و رس ایجاد کرد. تنفس میکروبی خاک کمترین ارتباط را با محور فاکتورهای PCA داشت. فاکتور اول، نمودار رج‌بندی PCA (شکل ۵) افق‌های خاک را از نظر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی مشابه در دو دسته طبقه‌بندی کرد. افق‌های دارای مشخصه کربنات ثانویه در قسمت مثبت محور فاکتور اول واقع شدند که شامل: افق‌های 3Btkb و 4Bckb خاکرخ شماره ۱، افق‌های 2Bck و 3Ck خاکرخ شماره ۲، افق‌های 2Bck و 3Bk خاکرخ شماره ۳ و افق 2Bw₂ از خاکرخ شماره ۱ با کمترین تشابه در ویژگی

Figure 5- PCA analysis of the relationship between physical and chemical characterizes of soil and different soil horizons
(BSR: microbial respiration, SOC: organic carbon, CF: coarse fragments, CCE: calcium carbonate equivalent; profile numbers are displayed with Latin numbering, for example: II_Vk corresponds to profile number 2)

ویژگی‌های میکرومورفولوژی

بررسی مقاطع نازک افق‌های خاک مورد مطالعه نشان داد که افق‌ها دارای کربنات ثانویه، پوسته‌های رسی و هوادیدگی آهن هستند. از آنجا که اقلیم کنونی منطقه نیمه‌خشک می‌باشد، رسوبات بادرستی به مقدار کم در سطح خاک قابل مشاهده است و باعث ایجاد ساختمان وزیکولار گردید (شکل ۶ الف). پوسته زیستی خزه در سطح خاک‌رخی‌های ۲ و ۳ مشاهده شد (شکل ۶ ب). شکل ۶ ج در مرز افق‌های AVk و Bt نودول اورتیک کربنات که به صورت در جا شکل گرفته و تشکیل اگزالات کلسیم در ریشه قابل مشاهده است. تشکیل نودول کربنات به صورت آزاد در فضای خالی و تجمع کلسیت سفید رنگ به صورت نودول در افق V_k و AV_k در شکل ۶ د مشاهده شد. پوسته‌های رسی در اطراف حفرات و قطعات در افق Bt خاک‌رخی‌های ۲ و ۳ نشان‌دهنده انتقال رس در نتیجه نفوذ آب از افق بالاتر است (شکل ۶ ه).

در افق کمبیک (2Bw) خاک‌رخی شماره ۱ نودول تیپیک آهن که دارای ذرات در ابعاد شن، دارای مرز واضحی با ماتریکس خاک است و نودول‌های ریز آهن به صورت پراکنده در این خاک‌رخی قابل رؤیت است. همچنین این افق دارای پوسته رسی بر روی دانه کوآرتز می‌باشد که نمایانگر خاک‌سازی در این افق است ولی مقدار آن‌ها به حد کافی برای افق مشخصه نمی‌باشد (شکل ۶ و).

در افق‌های B_{ck}، کربنات‌ها به صورت نودول‌های تیپیک مشاهده شدند. مرفولوژی این نودول‌ها از نوع ماتریکس پدوفیچر^۱ بوده که از اشباع زمینه با کربنات ایجاد شده است (شکل ۶ ط)؛ اشباع شدن در حد متوسط بوده و اجزاء در اندازه سیلت به وضوح در نودول کربنات‌ها دیده می‌شود، همچنین نودول‌های آهن ماتریکس را اشباع کرده است. نودول‌های شکل گرفته به دلیل اینکه پس از تشکیل در زمینه جابه‌جایی نداشته‌اند از نوع اورتیک نودول می‌باشند (Stoops, 2003).

افق Btkb خاک‌رخی شماره ۱ علاوه بر کربنات ثانویه، قرمز شدن رنگ خاک در مقیاس ماکرومورفولوژی از دیگر پدیده خاک‌سازی این افق است. نودول‌های کربنات به صورت تیپیک^۲ هستند و ترکیبی از رس و سیلت از اجزاء زمینه در نودول‌ها قابل مشاهده بود. همچنین پوسته‌های رسی نازک در اطراف نودول‌های کربنات و حفرات این افق شکل گرفته‌اند، همچنین نودول‌های اکسید آهن در ماتریکس^۳ مشاهده شد (شکل ۶ ی). وجود پوسته‌های رسی بر روی نودول‌های کربنات شاهدهی بر رخداد یک دوره اقلیمی مرطوب بر اقلیم خشک بوده است؛ ابتدا تجمع کربنات‌ها در طی اقلیم خشک صورت گرفته و سپس در طی دوره مرطوب رس‌ها در اثر نفوذ آب از افق فوقانی در گذشته به این

افق انتقال یافته و به صورت پوسته رسی اطراف نودول‌ها قرار گرفته است. نودول‌های آهن به دلیل آزاد شدن آهن و رسوب به صورت اکسیدهای آهن همزمان با تشکیل افق آرجیلیک که شرایط هوادیدگی فراهم بوده، تشکیل شده‌اند.

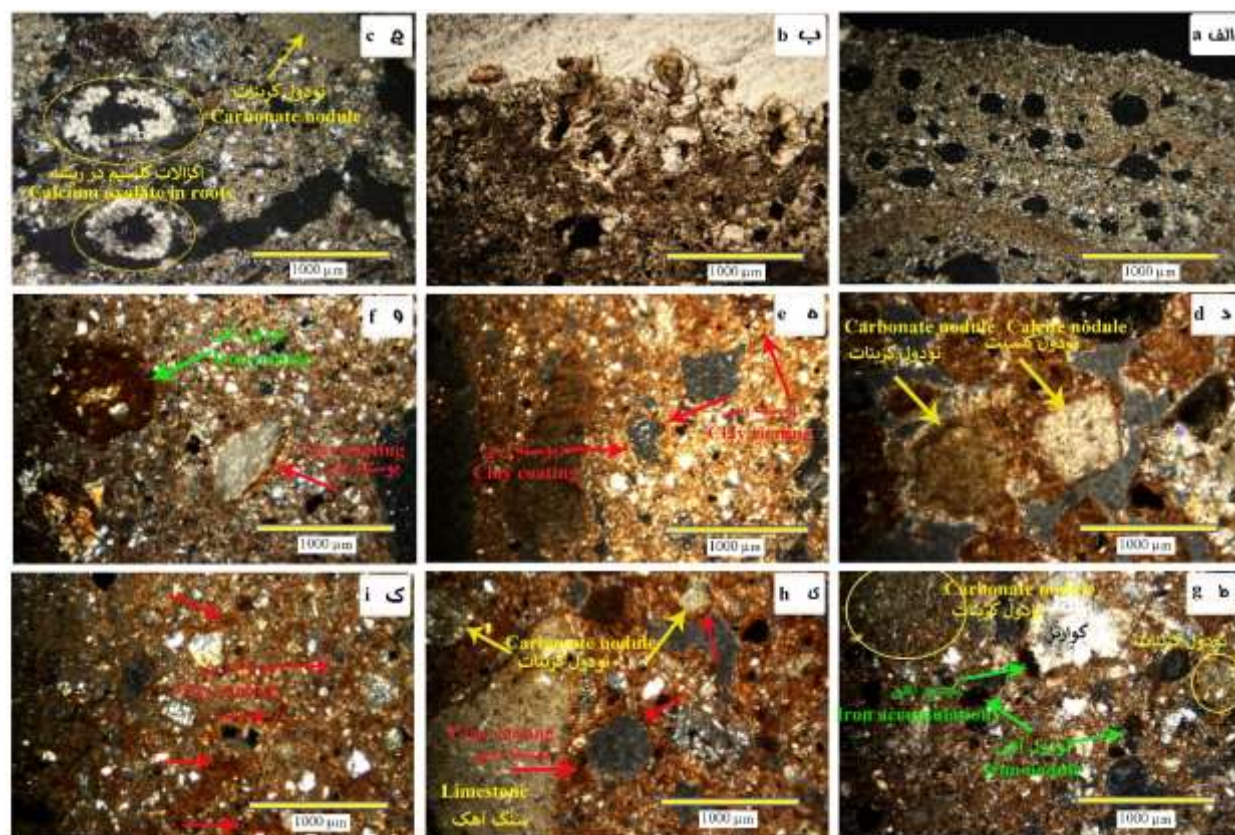
در افق 4Bt خاک‌رخی شماره ۳ ماتریکس متراکم و اشباع از پوسته‌های رسی به صورت پراکنده و تغییر شکل یافته^۴ به همراه نودول‌های آهن که در یک دوره مرطوب انتقال یافته و هوادیده شده‌اند (شکل ۶ ک). میکرومورفولوژی پوسته‌های رسی در افق 4Bt در خاک‌رخی شماره ۳ نشان‌دهنده تشکیل آن در یک دوره مرطوب است که احتمالاً پس از آن یک دوره خشک‌تر حاکم شده که افق 3Bk گواه این موضوع است و کربنات ثانویه در این افق تشکیل شده و در نتیجه پوسته‌های رسی در افق زیرین (4Bt) در زمینه پراکنده شده‌اند.

طبقه‌بندی خاک

در جدول ۳ خاک‌رخی‌ها براساس دو سامانه رده‌بندی آمریکایی (Soil Survey Staff, 2022) و جهانی (IUSS Working Group WRB, 2022) طبقه‌بندی شده‌اند.

با توجه به افق‌های مشخصه آرجیلیک و کلسیک در خاک‌رخی‌ها و رژیم رطوبتی اریدیک در مرز زیریک منطقه طبقه‌بندی خاک بر اساس سامانه آمریکایی، افق کمبیک رویین در خاک‌رخی شماره ۱ دارای عمق مناسب برای مدفون در نظر گرفتن افق‌های زیرین را داشت و در طبقه‌بندی آمریکایی Xeric Haplocambids قرار گرفت و خاک‌رخی‌های ۲ و ۳ مخروط افکنه در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفتند. طبقه‌بندی به سامانه جهانی نیز تفاوت میان بخش بالای مخروط افکنه با بخش‌های میانی و قاعده را نشان داد (جدول ۳).

نکته قابل توجه در قابلیت سامانه جهانی برای طبقه‌بندی خاک‌های مدفون است. خاک‌رخی شماره ۱، خاک مدفون شده دارای افق کلسیک در سامانه جهانی مشخص شده است در صورتی که به این ویژگی در نامگذاری به روش آمریکایی اشاره نشده است. سامانه طبقه‌بندی جهانی وجود انقطاع سنگی در خاک‌رخی را با پسوند Raptic و حضور پوسته زیستی را با پسوند Biocrustic بیان کرده است؛ همچنین رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای تشکیل‌دهنده مخروط افکنه با پسوند Fluvi و Solimovic بیان شدند، که از مزایای استفاده از این سامانه است.



شکل ۶- بررسی میکرومورفولوژی خاک افق‌ها؛ بجزء تصویر ب که در حالت PPL است، تمامی تصاویر در حالت XPL می‌باشند. الف) ساختمان وزیکولار در افق V_k و AV_k، ب) پوسته زیستی خزه بر روی سطح خاک‌رخ‌های شماره ۲ و ۳، ج) تشکیل اگزالات کلسیم در ریشه و نودول کربنات در افق V_k و AV_k، د) تشکیل نودول کربنات و کلسیت در افق V_k خاک‌رخ شماره ۱، ه) ماتریکس آهن‌دار و تشکیل پوسته رسی در اطراف حفره در افق Bt خاک‌رخ شماره ۲، ط) زمینه پورفیریک، اورتیک نودول کربنات، نودول‌های اکسید آهن در ماتریکس در افق B_{Ck}، و) زمینه متراکم و پورفیریک، تشکیل پوسته رسی بر روی دانه کوارتز و تشکیل نودول اکسید آهن در افق 2Bw خاک‌رخ شماره ۱، ی) نودول کربنات، اشباع زمینه از اکسیدهای آهن و رس، پوشش سنگ آهک میکریتی و نودول‌ها توسط پوسته رسی نازک در افق Btkb خاک‌رخ شماره ۱، ک) زمینه متراکم و اشباع از پوسته رسی در افق Bt خاک‌رخ شماره ۳.

Figure 6- a) vesicular structure in the V_k and AV_k horizons, b) moss biological crust on the surface of the profiles, c) formation of calcium oxalate in the roots and carbonate nodules in the V_k and AV_k horizons, d) formation of carbonate and calcite nodules in the V_k horizon of profile 1, e) iron oxide matrix and formation of clay coating around the void in the Bt horizon of profile 2, f) porphyritic background, orthic carbonate nodule, iron oxide nodules in the matrix in the B_{Ck} horizon, g) dense and porphyritic background, clay coating formation on the quartz grain and iron oxide nodule formation in the 2Bw horizon of profile 1, h) carbonate nodule, saturation of the background with iron oxide and clay coating, micritic limestone cover and nodules by a thin clay coating in the Btkb horizon, profile 1, i) dense background and saturation of clay coating in the horizon Bt profile 3

بحث

تغییر و تحول خاک

تشکیل شده‌اند. وجود لایه‌هایی با مقادیر و اندازه متفاوت قطعات سنگی و افق‌های مشخصه، نمایانگر تناوب رسوبگذاری آبرفتی و تغییر و تحول خاک‌ها در دوره‌های مختلف است؛ همچنین افق سطحی خاک شکل اراضی، وزیکولار و ورقه‌ای بود که در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمول است (McFadden, 2013; Dietze et al., 2016).

در خاک‌های مورد بررسی توالی رسوبگذاری و افق‌های مختلف کلسیک و حداکثر تکامل آرجیلیک مشاهده شد که نشان‌دهنده دوره‌های رسوبگذاری و خاک‌سازی که بسته به تغییر اقلیم و شدت آن

جدول ۳- طبقه‌بندی خاک‌های منطقه مورد مطالعه
Table 3- Classification of soils of the studied area

شماره خاکرخ Profile	موقعیت ژئومورفیک Geomorphoc location	سامانه طبقه‌بندی آمریکایی Classification of Soil Taxonomy	سامانه طبقه‌بندی جهانی Classification of World Reference Base
I	بخش بالایی مخروط افکنه، ساختر قدیمی رسوبات The apex of the alluvial fan, Old structure of sediments	Xeric Haplocambids	Fulvic Yermic Calcaric Cambisols (Loamic Aeolic Biocrustic Ochric Raptic) over Luvic Calcisols (Loamic Fluvic Ochric Raptic Solimovic)
II	بخش میانی مخروط افکنه، ساختر میانه رسوبات The middle of the alluvial fan, Middle structure of sediments	Xeric Calcargids	Abruptic Calcic Yermic Luvisols (Loamic Fulvic Ochric Raptic Solimovic)
III	بخش قاعده مخروط افکنه، ساختر جدید رسوبات The base of the alluvial fan, New structure of sediments	Xeric Calcargids	Abruptic Calcic Yermic Luvisols (Loamic Fulvic Ochric Raptic Solimovic)

همکاران (Rashidi *et al.*, 2022) نشان داده است که منطقه مشهد و اطراف آن، دارای یک خاک با تکامل کم با افق Bk یا Bw است که در دوره‌های مرطوب هولوسن تشکیل شده و افق‌های متکامل Bt و Btk در دوره‌های گرم و مرطوب آخرین چرخه یخچالی-بین یخچالی در پلیستوسن انتهایی تشکیل شده‌اند. با توجه به شرایط فعلی منطقه به نظر می‌رسد که خاک روئین در هولوسن تشکیل شده است. با این حال پوسته‌های زیستی و رژیم رطوبتی اریدیک در مرز زیریک منطقه توانسته شرایط تشکیل کربنالت پدوژنیک و انتقال رس را باعث شود. نتایج مک فادن (McFadden, 2013) حاکی از آن بود که خاک‌هایی در زیر سنگفرش‌های بیابانی رشد می‌کنند که به‌طور فزاینده‌ای از گرد و غبار به دام افتاده تشکیل شده‌اند که متعاقباً به زیر منتقل می‌گردند؛ افق‌های وزیکولار، افق سطحی کلیدی خاک‌های روئین بیابانی، و افق‌های B غنی‌شده با کربنات کلسیم و رس ضخیم‌کننده، عمدتاً از طریق توسعه بر افزایشی و تورمی شکل می‌گیرند، که نوعی توسعه خاک تجمعی مرتبط با بالا آمدن خاک روئین بیابانی است. درحالی‌که افق Bw خاکرخ شماره ۱ بطوری‌که در جایگاه عمقی مقابل دو خاکرخ دیگر به دلیل اینکه دارای پوشش گیاهی و پوسته‌های زیستی خیلی کمتر در بخش بالایی مخروط افکنه واقع شده است؛ زیرا در این بخش ناپایداری و فرسایش بیشتر از بخش‌های میانی و قاعده است. پژوهش بشتیان و همکاران (Bashtian *et al.*, 2019) نشان داد که بخش بالایی این مخروط افکنه دارای پوشش زیستی کمتری نسبت به سایر بخش‌ها است. در نتیجه این افق کمبیک که دارای تحول کمتری نسبت به افق متقابل در دو خاکرخ دیگر، در این خاکرخ شکل گرفته است. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت که مخروط افکنه دارای شکل

مدل جانسون و واتسون-استگنر (Johnson and Watson, 1987) تغییر و تحول خاک مخروط افکنه را به خوبی توضیح می‌دهد، زیرا خاک را تحت تأثیر فزاینده‌های پیشرونده و پسرونده می‌داند که به سوی تکامل و یا در خلاف آن حرکت می‌کند و این روندها با افق‌های مخروط افکنه هماهنگی دارد.

افق‌های وزیکولار توسط رسوبات بادرفتی در زمان کنونی تشکیل شده‌اند که اقلیم منطقه نیمه‌خشک می‌باشد، در حالی‌که منطقه از رسوبات آبرفتی و واریزه‌ای شکل گرفته است. یافته‌های ضیائی و همکاران (Ziyae *et al.*, 2018) نشان داد که برداشت رسوبات بادرفتی در استان خراسان رضوی به علت کمبود پوشش گیاهی سطح، سرعت باد و کمبود بارندگی رخ داده و در مناطق دیگر مانند مناطق کوهستانی و مخروط افکنه مورد مطالعه فرونشست آنها رخ داده است که مقدار آن ۷۵ گرم در متر مربع در سال است. این گرد و غبار توسط باران از روی ذرات درشت شسته و به زیر آنها منتقل شده و باعث تشکیل افق وزیکولار شده است. سطح خاک توسط پوسته‌های زیستی که در اقلیم اریدیک در مرز زیریک منطقه زندگی می‌کنند، آن‌ها نقش حیاتی در خواص و فرآیندهای مختلف خاک، به دام انداختن رسوبات، به‌ویژه ساختار منافذ سطحی خاک و فرآیندهای هیدرولوژیکی مرتبط با منافذ خاک، مانند نفوذ و تبخیر، ایفا می‌کنند (Sun *et al.*, 2023). آن‌ها به همراه پوشش گیاهی باعث حرکت آب در خاک می‌گردند، و با افزایش تنفس و تولید دی‌اکسید کربن باعث تشکیل کربنات پدوژنیک و بیوژنیک در افق وزیکولار می‌شوند و هم حرکت آب باعث انتقال رس و تشکیل پوسته‌های رسی در زیر این افق‌ها شده‌اند (شکل ۶ ج). مطالعات قبلی بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2013) و رشیدی و

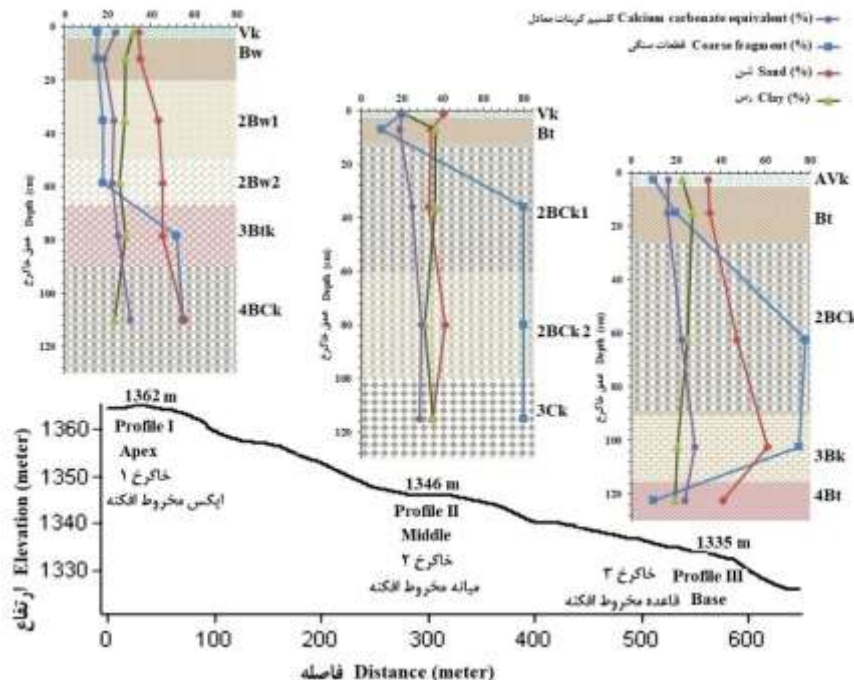
هم‌آوری و منعقد شدن رس می‌شود. تشکیل افق آرجیلیک در افق 4Bt خاک‌های شماره ۳ و 3Btkb خاک‌های شماره ۱ احتمالاً مربوط به اقلیم گرم و مرطوب در دوره بین یخچالی پلیستوسن شکل گرفته‌اند. وجود افق آرجیلیک در آب و هوای نیمه‌خشک نشان‌دهنده یک فرآیند قدیمی در شرایط ژئومورفولوژیکی پایدار بوده است (Khormali et al., 2003). در حالی که افق آرجیلیک (Bt) در خاک‌های شماره ۲ و ۳ که در عمق کمتری تشکیل شده‌اند مربوط به همین دوره هولوسن می‌باشند؛ که بنظر می‌رسد میکرواقلیم به انتقال رس کمک کرده و یک افق آرجیلیک تشکیل شود.

تغییرات تنفس میکروبی در لایه‌های مختلف خاک

فرآیندهای هواپدگی طولانی مدت در بالادست مخروط‌افکنه در سطح خاک، باعث شکل‌گیری بافت رسی لومی شده است. در این موقعیت شکل اراضی به علت فرآیندهای فرسایشی، لایه‌های سطحی غنی از کربن آلی به پایین‌دست انتقال یافته است و در نتیجه معدنی شدن کربن آلی را در پی داشته است. در مقابل قاعده مخروط‌افکنه محیطی پایدارتر و دارای بافتی لومی است، کربن آلی افزایش یافته و نسبت معدنی شدن کربن آلی کاهش یافته است.

محدب می‌باشد و خاک‌های شماره ۲ در بخش تحدب قرار گرفته است؛ در نتیجه افق Bck در آن دارای ۸۰ درصد قطعات سنگی آبرفتی با ضخامت بیشتری از خاک‌های شماره ۳ است. در این افق نودول‌های آهنی را به صورت پندانت مشاهده کردیم، بنابراین یک روند تغییر و تحول براساس نتایج بدست آمده و مطالعات قبلی که در ایران انجام شده است، وجود دارد؛ رشیدی و همکاران (Rashidi et al., 2022) و کریمی و همکاران (Karimi et al., 2011) چند دوره خاک‌سازی را در شمال شرق ایران شناسایی کرده‌اند. خاک‌سازی با شدت کم در مشهد و حتی در کلات نادری، باعث تشکیل افق کلسیک شده است، مطالعات نشان داده است که یک دوره مرطوب در هولوسن موجب تشکیل کربنات‌های پدوژنیک در آن زمان شده است (Tanner et al., 2010; Karimi et al., 2011).

افق‌های دسته کربنات ثانویه نیاز به اقلیم خشک‌تری نسبت به افق‌های آرجیلیک که نیاز به اقلیم گرم و مرطوب دارند (شکل ۵). افق 3Btkb خاک‌های شماره ۱، نشان‌دهنده تغییر اقلیم است؛ کربنات‌ها قبل از انتقال رس تجمع یافته‌اند و توالی پوشش کربنات و رس در این افق نشان‌دهنده پلی‌ژنتیک بودن خاک است، زیر این دو فرآیند مجزا بوده و همزمان رخ نمی‌دهند (Gunat and Ransom, 2006; Ufnar, 2007; Bockheim and Hartemink, 2013). انتقال رس پس از انتقال کربنات کلسیم صورت می‌گیرد زیرا حضور یون‌های Ca^{2+} باعث



شکل ۷- نمای شماتیک روند تغییرات مقادیر کلسیم کربنات معادل، قطعات سنگی، شن و رس در عمق خاک‌ها و توالی افق‌ها در امتداد گرادیان مخروط‌افکنه

Figure 7- Schematic representation of the changes in the amounts of calcium carbonate equivalent, coarse fragments, sand, and clay in the depth of the soil and the sequence of horizons along the gradient of the alluvial fan

Xeric Haplocambids و در بخش‌های میانه و قاعده در زیرگروه Xeric Calciargids قرار گرفت. طبقه‌بندی جهانی نیز خاکرخ بالایی را در گروه مرجع Cambisols over Calcisols قرار داد و دو خاکرخ میانه و قاعده شکل اراضی در گروه مرجع Luvisols قرار گرفتند. در این منطقه پوسته‌های زیستی و پوشش گیاهی بر تشکیل خاک در رسوبات بادرقتی افق V_k و AV_k تأثیر گذاشتند و در ایجاد افق زیرین B_t در خاکرخ‌های شماره ۲ و ۳ نقش بسزایی داشتند. خاکرخ‌های مخروط افکنه، تجمع کربنات‌های ثانویه را نشان داد که یک فرآیند مهم در افق‌های خاک‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد در حالی که پوسته رسی در افق‌های تحتانی خاکرخ‌ها نشان‌دهنده اقلیم گرم و مرطوب در گذشته این منطقه است، اما افق آرچیلیک در لایه‌های رویین در همین دوره کنونی هولوسن تشکیل شده‌اند. این شکل از افق آرچیلیک نسبت به خاک‌های منطقه ایران کمی متمایز است، زیرا تا کنون این افق‌ها گزارش نشده‌اند. ثابت شده است که در هولوسن، دوره های مرطوب‌تری وجود داشته و نیاز به مطالعات بیشتری در حال حاضر دارد.

بررسی تنفس میکروبی در افق‌های مختلف خاک نشان داد که در افق‌های آرچیلیک ممکن است به دلیل نبود کربن قابل دسترس میزان تنفس میکروبی کاهش یافته باشد، در حالی که افق‌های کلسیکی به دلیل کربن حفظ شده دارای تنفس میکروبی بالاتری هستند. پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی مقادیر اجزای کربن در ارتباط با بیومس میکروبی در افق‌ها و خاک‌های قدیمی بررسی گردد.

سپاسگزاری

این مقاله بخشی از پژوهش‌های رساله دکتری (طرح پژوهشی ۳/۵۲۴۱۷) و تحت حمایت معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

در بخش میانی سطح خاک لومی می‌باشد و میزان تنفس میکروبی افزایش داشته است، زیرا حساسیت‌پذیری کربن آلی نسبت به تنفس کاهش یافته است. تنفس خاک بالا را می‌توان به علت تجزیه سریع شده مواد آلی در نتیجه افزایش کیفیت بستر نسبت داد (He et al., 2018). این مطالعه نشان داد که لایه‌های دارای افق آرچیلیک دارای میزان تنفس کمتری نسبت به افق رویین می‌باشند. به نظر می‌رسد افق آرچیلیک به عنوان یک محدودکننده انتشار برای دی‌اکسید کربن بالا در اینجا عمل می‌کند (Schulz et al., 2011). در حالی که افق‌های کلسیک دارای تنفس بالاتری بوده‌اند، زیرا ممکن است در این افق‌ها کربنات کلسیم با مواد آلی کمپلکس ایجاد کرده و باعث حفظ کربن شوند. یافته‌های سودن و همکاران (Sugden et al., 2004) و ترومبور و همکاران (Trumbore et al., 2006) نشان داد که دی‌اکسید کربن عمیق از منابع متعدد حاصل می‌شود. منابع احتمالی دی‌اکسید کربن عمیق عبارتند از: تنفس ریشه و قارچ، تجزیه مواد آلی تاییده شده توسط فعالیت میکروبی، رسوب کلسیتی (حتی اعماق خاک). یافته‌های کشیرسکایا و همکاران (Kashirskaya et al., 2018) نشان داد که تعداد و زیست‌توده سلول‌های میکروبی در خاک‌های مدفون شده در دوره‌های رطوبت زیاد اتمسفری حداکثر بوده است. بنابراین در افق آرچیلیک، هوازدگی شدید و اجزای کربن باقی مانده مقاوم به تجزیه هستند که ممکن است اندازه‌گیری کربن آلی آن را نشان ندهد، مانند افق 4B_t که مقدار کربن آلی صفر است. تنفس میکروبی همبستگی مثبتی با کربن بیومس میکروبی و اجزای سبک کربن آلی دارد، زیرا آنها نقش منبع و ابزار برای تنفس میکروبی را بازی می‌کنند (Liu et al., 2021).

نتیجه‌گیری

خاک مخروط افکنه براساس طبقه‌بندی آمریکایی در بخش بالایی

منابع

- Allison, L. E., & Moodie, C. D. (1965). Carbonate. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 1379-1396. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c40>
- Anderson, J.P.E. (1982). Soil respiration. In A. L. Page (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. <http://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed>
- Bashtian, M.H., Sepehr, A., Farzam, M., & Bahreini, M. (2019). Biological soil crusts, plant functional groups, and soil parameters in arid areas of Iran. *Polish Journal of Ecology*, 66(4), 337-351. <https://doi.org/10.3161/15052249PJE2018.66.4.003>
- Bayat, O., Karimzadeh, H., Eghbal, M., & Khademi, H. (2013). Pedogeomorphic evolution of an alluvial fan in central Iran. *Journal of Range and Watershed Management*, 66(2), 191-206. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.35572>
- Bockheim, J.G., & Hartemink, A.E. (2013). Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma*, 209, 153-160. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.009>
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T. (1985). *Handbook for soil thin section description*.

- Waine Research.
7. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., & McDaniel, P.A. (2011). *Soil genesis and classification*. John Wiley & Sons. [https://www.wiley.com/en-us/Soil Genesis and Classification](https://www.wiley.com/en-us/Soil+Genesis+and+Classification)
 8. Dietze, M., Dietze, E., Lomax, J., Fuchs, M., Kleber, A., & Wells, S.G. (2016). Environmental history recorded in aeolian deposits under stone pavements, Mojave Desert, USA. *Quaternary Research*, 85(1), 4-16. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2015.11.007>
 9. Dowlatabadi, S., Amirabadizadeh, M., & Zarei, M. (2022). Evaluation of WetSpa-M model for estimation of hydrological response of Neyshabur-Rookh watershed to climate change of future years. *Water and Soil*. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/JSW.2022.78598.1199>
 10. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
 11. Ghaemi, F. (1994). Geological map of Neyshabur, 1:100000 scale, Ministry of Mines and Metals, Geological Organization of Iran.
 12. Ghasemzadeh Ganjehie, M., Karimi, A.R., Zeinadini, A., & Khorasani, R. (2017). Investigation of clay mineralogy, micromorphology and evolution of soils in Bajestan Playa. *Water and Soil*, 30(6), 2046-2059. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/JSW.V30I6.51463>
 13. Gunal, H., & Ransom, M.D. (2006). Clay illuviation and calcium carbonate accumulation along a precipitation gradient in Kansas. *Catena*, 68(1), 59-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.027>
 14. He, Z.B., Chen, L.F., Du, J., Zhu, X., Lin, P.F., Li, J., & Xiang, Y.Z. (2018). Responses of soil organic carbon, soil respiration, and associated soil properties to long-term thinning in a semiarid spruce plantation in northwestern China. *Land Degradation & Development*, 29(12), 4387-4396. <https://doi.org/10.1002/ldr.3196>
 15. IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4 edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. <https://www.iuss.org/publications/iuss-alerts-2021-2022/iuss-alert-205-july-2022/>
 16. Jenny, H. (1981). The Soil Resource-Origin and Behavior. *Ecological Studies* 37. *Soil Science*, 132(5), 380. https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1981/11000/The_Soil_Resource_Origin_and_Behavior__Ecological.10.aspx
 17. Johnson, D.L., & Watson-Stegner, D. (1987). Evolution model of pedogenesis. *Soil Science*, 143(5), 349-366. https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/1987/05000/EVOLUTION_MODEL_OF_PEDOGENESIS.5.aspx
 18. Karimi, A., Frechen, M., Khademi, H., Kehl, M., & Jalalian, A. (2011). Chronostratigraphy of loess deposits in northeast Iran. *Quaternary International*, 234(1-2), 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2009.08.002>
 19. Khormali, F., Abtahi, A., Mahmoodi, S., & Stoops, G. (2003). Argillic horizon development in calcareous soils of arid and semiarid regions of southern Iran. *Catena*, 53(3), 273-301. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00040-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00040-7)
 20. Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., ... & Zeng, N. (2015). Global carbon budget 2014. *Earth System Science Data*, 7(1), 47-85. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-7-47-2015>
 21. Liu, T., Peng, D., Tan, Z., Guo, J., & Zhang, Y. (2021). Effects of stand density on soil respiration and soil labile organic carbon and their influence mechanism in *Larix Principis-Rupprechtii* plantations. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-143559/v1>
 22. McFadden, L.D. (2013). Strongly dust-influenced soils and what they tell us about landscape dynamics in vegetated aridlands of the southwestern United States. [https://doi.org/10.1130/2013.2500\(15\)](https://doi.org/10.1130/2013.2500(15))
 23. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
 24. Omran, E.S.E. (2016). A simple model for rapid gypsum determination in arid soils. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0242-3>
 25. Ponti, D.J. (1985). The quaternary alluvial sequence of the Antelope Valley, California. *Geological Society of America Special Paper*, 203, 79-96. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsa/books/book/339/chapter-pdf/965614/spe203-0079.pdf>
 26. Rashidi, Z., Karimi, A., Murray, A., Khormali, F., Farpoor, M.H., & Sohbati, R. (2022). Late Pleistocene-Holocene pedogenesis and palaeoclimate in western Asia from palaeosols of the Central Iranian Plateau. *Boreas*, 51(1), 201-218. <https://doi.org/10.1111/bor.12541>
 27. Schaetzl, R.J., & Thompson, M.L. (2015). *Soils*. Cambridge university press. <https://www.cambridge.org/ir/universitypress/subjects/earth-and-environmental-science/soil-science/soils-genesis-and-geomorphology-2nd-edition>
 28. Schulz, M., Stonestrom, D., Von Kiparski, G., Lawrence, C., Masiello, C., White, A., & Fitzpatrick, J. (2011). Seasonal dynamics of CO₂ profiles across a soil chronosequence, Santa Cruz, California. *Applied Geochemistry*, 26, S132-S134. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.048>
 29. Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., & Benham, E.C. (Eds.). (2012). *Field book for describing and sampling soils*. Government Printing Office.

30. Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service. <https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/keys-to-soil-taxonomy>
31. Stock, J.D., Schmidt, K.M., & Miller, D.M. (2008). Controls on alluvial fan long-profiles. *Geological Society of America Bulletin*, 120(5-6), 619-640. <https://doi.org/10.1130/B26208.1>
32. Stoops G. (2003). Guidelines for analysis and description of soil and Regolith thin sections. Soil Science Society of America. Inc. *Madison, Wisconsin*. 184p.
33. Stoops, G. (2018). Micromorphology as a tool in soil and regolith studies. In Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths (pp. 1-19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00001-2>
34. Sugden, A., Stone, R., & Ash, C. (2004). Ecology in the underworld. *Science*, 304(5677), 1613-1613. <https://doi.org/10.1126/science.304.5677.1613>
35. Sun, F., Xiao, B., Li, S., Yu, X., Kidron, G.J., & Heitman, J. (2023). Direct evidence and mechanism for biocrusts-induced improvements in pore structure of dryland soil and the hydrological implications. *Journal of Hydrology*, 129846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129846>
36. Tanner, L.H. (2010). Continental carbonates as indicators of paleoclimate. *Developments in Sedimentology*, 62, 179-214. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(09\)06204-9](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(09)06204-9)
37. Trumbore, S., Da Costa, E.S., Nepstad, D.C., Barbosa De Camargo, P., Martinelli, L. A., Ray, D., ... & Silver, W. (2006). Dynamics of fine root carbon in Amazonian tropical ecosystems and the contribution of roots to soil respiration. *Global Change Biology*, 12(2), 217-229. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001063.x>
38. Ufnar, D. F. (2007). Clay coatings from a modern soil chronosequence: a tool for estimating the relative age of well-drained paleosols. *Geoderma*, 141(3-4), 181-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.017>
39. Weber, B., Belnap, J., Büdel, B., Antoninka, A. J., Barger, N.N., Chaudhary, V.B., ... & Bowker, M.A. (2022). What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community. *Biological Reviews*, 97(5), 1768-1785. <https://doi.org/10.1111/brv.12862>
40. Weldmichael, T.G., Michéli, E., Fodor, H., & Simon, B. (2020). The influence of depth on soil chemical properties and microbial respiration in the upper soil horizons. *Eurasian Soil Science*, 53(6), 780-786. <https://doi.org/10.1134/S1064229320060137>
41. Williams, A.J., Buck, B.J., & Beyene, M.A. (2012). Biological soil crusts in the Mojave Desert, USA: micromorphology and pedogenesis. *Soil Science Society of America Journal*, 76(5), 1685-1695. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0021>
42. Wood, B.D., Keller, C.K., & Johnstone, D.L. (1993). In situ measurement of microbial activity and controls on microbial CO₂ production in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 29(3), 647-659. <https://doi.org/10.1029/92WR02315>
43. Xiao, B., Bowker, M.A., Zhao, Y., Chamizo, S., & Issa, O.M. (2022). Biocrusts: Engineers and architects of surface soil properties, functions, and processes in dryland ecosystems. *Geoderma*, 424, 116015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116015>
44. Ziyadeh, A., Karimi, A., Lakzian, A., & Khademi, H. (2018). Dust deposition rate and its relationship to some climatic parameters in Khorasan Razavi province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 7(2), 95-114. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/GEO.V7I2.66306>



Research Article

Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 751-767

The Effect of Nitrogen Form on Chemical Composition, Leaf Photosynthetic Pigments Concentration and Yield of Two Fodder Maize (*Zea mays* L.) Cultivars in Soilless Culture

M. Ghorbani^{1*}, SH. Kiani², A. Moharrery³, S. Fallah⁴

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.

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

3- Professor, Department of Animal Science, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

4- Professor, Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Received: 04-10-2023
Revised: 31-10-2023
Accepted: 11-11-2023
Available Online: 12-11-2023

How to cite this article:

Ghorbani, M., Kiani, SH., Moharrery, A., & Fallah, S. (2023). The effect of nitrogen form on chemical composition, leaf photosynthetic pigments concentration and yield of two fodder maize (*Zea mays* L.) cultivars in soilless culture. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 751-767. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84731.1340>

Introduction

The gradual decrease in the fertile soils surface due to environmental pollution and urbanization phenomena has reduced the possibility of sufficient fodder production. In addition, the strict dependency of the agricultural sector on water resources in an age of drastic climate change necessitates providing novel solutions for agricultural production. One of the methods that has gained attention for providing fodder is its production through soilless culture techniques. Maize can be a suitable option for fodder production in soilless culture due to high starch and sugar content, low seed cost, high biomass production, and rapid growth. Proper nutritional management of maize in soilless culture is highly important for increasing the quantity and quality of forage greenery. Little information is available regarding the impact of nitrogen form on the growth, yield and chemical composition of forage plants including maize in soilless culture. This experiment was conducted to investigate the effect of nitrogen form on the chemical composition, leaf photosynthetic pigments concentration and yield of two fodder maize (*Zea mays* L.) cultivars in soilless culture.

Materials and Methods

A factorial experiment based on randomized complete block design was conducted with the two factors of ammonium to nitrate ratio in the nutrient solution (0:100, 12.5:87.5, 25:75, 37.5:62.5 and 50:50) and maize cultivars (i.e., single cross hybrid 704 and single cross 410) and four replications in hydroponic culture at the greenhouse of Shahrekord University. After seed germination and emergence of the first two leaves, the maize seedlings were transferred to 10-liter plastic pots containing perlite (0.5-5 mm) and were manually fertigated with different ammonium to nitrate ratios on a daily basis. Before harvesting, chlorophyll a, b and (a+b), and carotenoids were quantified in leaves of plants. At the end of the tasseling stage, the plants were harvested. After harvesting, the root, stem, and leaf parts were separated, and the fresh weights of the samples were measured. Plant samples were dried in an oven at 60 °C. Then, dry weights of samples were measured and samples (root and leaf + stem) were ground for nutrient analysis including of N, P and K. Analysis of variance was performed using SAS software version 9.4. Means comparison was conducted using Duncan's multi-range test at $p < 0.05$.



©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.2023.84731.1340>

Results and Discussion

The results showed that in single-cross hybrid 704 and single-cross 410 cultivars, respectively, increasing the applied ammonium to 37.5% and 50% in the nutrient solution caused a significant increase in the shoot nitrogen concentration. Application of ammonium in the nutrient solution led to an increase in shoot and root phosphorus concentration in both maize cultivars compared to the nutrient solution without ammonium. The highest concentration of phosphorus in shoot (18.02 g.kg^{-1}) was observed in the single-cross hybrid 704 cultivar when maize plants fed with a nutrient solution containing 50 percent ammonium, which was 3.2 times higher than the shoot phosphorus concentration in plants fed with nutrient solution without ammonium. Furthermore, at the 50:50 ammonium to nitrate ratio in the nutrient solution, the lowest root potassium concentration was recorded in both maize cultivars. In single-cross hybrid 704 cultivar, application of nutrient solution with ammonium to nitrate ratio of 50:50 resulted in a significant 31% decrease in leaf chlorophyll a concentration compared to plants fed with a nutrient solution containing 25% ammonium (with the highest chlorophyll content). The leaf chlorophyll a concentration in single-cross 410 cultivar showed an increasing trend with increasing ammonium in the nutrient solution up to 25 percent, and then a decreasing trend with further increase in the ammonium proportion. Moreover, a 31.4% significant decrease in chlorophyll b concentration was observed in plants fed with a 50:50 ammonium to nitrate ratio compared to plants fed with a 37.5: 62.5 ammonium to nitrate ratio. The highest leaf carotenoid concentration was recorded in single-cross hybrid 704 cultivar and at 25:75 ammonium to nitrate ratio, which was 1.4 times higher than the leaf carotenoid concentration compared to plants fed with nutrient solution without ammonium. The highest relative leaf moisture content was observed in the plants nourished with ammonium to nitrate ratio of 25:75, which showed a significant 20% increase compared to the ammonium-free nutrient solution. The results also indicated that the application of 50% of nitrogen in the form of ammonium in the nutrient solution led to a significant decrease in the leaf surface area of maize. The highest shoot and root fresh weights were obtained in the plants nourished with 25:75 ammonium to nitrate ratio and in the single-cross hybrid 704 cultivar. The results showed that the highest water (solution) use efficiency based on fresh weight was recorded in plants fed with 25:75 ammonium to nitrate ratio and in the single-cross hybrid 704 cultivar.

Conclusion

Based on the results of the present study, the highest shoot and root fresh weights of both maize cultivars were obtained in plants fed with 25:75 ammonium to nitrate ratio. Given the limitations of water resources and rainfall, optimal use of minimum water to produce maximum agricultural crops must be considered. According to the results of this research, application of nutrient solution with ammonium to nitrate ratio of 50:50 led to ammonium toxicity and a reduction in forage yield in both maize cultivars. Therefore, replacing 25% nitrate in the nutrient solution with ammonium and selecting the single-cross hybrid 704 cultivar (due to higher yield compared to single cross 410 cultivar) is recommended to achieve maximum fodder yield in soilless culture under conditions similar to this study.

Keywords: Ammonium to Nitrate ratio, Chlorophyll, Macro elements, Single-cross hybrid 704

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۵۱-۷۶۷

تأثیر شکل نیتروژن بر ترکیب شیمیایی، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ و عملکرد دو رقم ذرت علوفه‌ای (*Zea mays* L.) در کشت بدون خاک

مریم قربانی^{۱*} - شهرام کیانی^۲ - علی محمری^۳ - سینا فلاح^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۲۰

چکیده

اطلاعات اندکی در مورد تأثیر شکل نیتروژن بر رشد گیاهان علوفه‌ای از جمله ذرت در کشت بدون خاک موجود است. در پژوهش حاضر تأثیر شکل نیتروژن بر ترکیب شیمیایی، غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ و عملکرد دو رقم ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک مورد بررسی قرار گرفت. این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و نوع رقم در چهار تکرار در گلخانه دانشگاه شهرکرد انجام شد. عامل اول نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات محلول غذایی شامل پنج نسبت صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ و عامل دوم نیز شامل دو رقم ذرت هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ و سینگل کراس ۴۱۰ بود. نتایج نشان داد کاربرد آمونیوم به میزان ۳۷/۵ و ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی به ترتیب در رقم سینگل کراس ۷۰۴ و سینگل کراس ۴۱۰ سبب بیشترین افزایش معنادار در غلظت نیتروژن شاخساره شد. کاربرد آمونیوم در محلول غذایی سبب افزایش غلظت فسفر شاخساره و ریشه در هر دو رقم ذرت نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم گردید. همچنین در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات محلول غذایی کمترین غلظت پتاسیم ریشه در هر دو رقم مشاهده شد. در رقم سینگل کراس ۷۰۴، تغذیه گیاهان با محلول دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات منجر به ۳۱ درصد کاهش در غلظت کلروفیل a برگ نسبت به گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی ۲۵ درصد آمونیوم شد. غلظت کلروفیل a برگ در رقم سینگل کراس ۴۱۰ با افزایش آمونیوم در محلول غذایی تا ۲۵ درصد روند صعودی و با افزایش بیشتر سهم آمونیوم روند نزولی نشان داد. با افزایش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی غلظت کلروفیل b برگ به طور معناداری در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم افزایش یافت به طوری که بیشترین غلظت کلروفیل b برگ در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد. نتایج نشان داد که بیشترین وزن تازه شاخساره و ریشه در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل کراس ۷۰۴ مشاهده شد. بر اساس نتایج این پژوهش جایگزینی ۵۰ درصد آمونیوم به جای نیترات سبب بروز سمیت آمونیوم و کاهش عملکرد علوفه در دو رقم ذرت شد. بنابراین، کاربرد نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات در محلول غذایی برای دستیابی به بیشترین وزن تازه علوفه و انتخاب رقم سینگل کراس ۷۰۴ (به دلیل وزن تازه بیشتر نسبت به رقم سینگل کراس ۴۱۰) در کشت بدون خاک در شرایط مشابه این پژوهش قابل توصیه است.

واژه‌های کلیدی: عناصر پرمصرف، کلروفیل، نسبت آمونیوم به نیترات، هیبرید سینگل کراس ۷۰۴

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

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

۳- استاد گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

۴- استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

مقدمه

کاهش تدریجی سطح خاک‌های حاصل‌خیز به دلیل آلودگی‌های محیطی و پدیده شهرنشینی (Chen, 2007) امکان تولید علوفه کافی را کاهش داده است. علاوه بر این، وابستگی شدید بخش کشاورزی به منابع آبی (Zhang et al., 2007) در عصر تغییرات شدید آب و هوایی نیازمند ارائه راهکارهای نوین برای تولید محصولات کشاورزی است. یکی از روش‌هایی که برای تأمین علوفه مورد توجه قرار گرفته است تولید علوفه به روش کشت بدون خاک است. ذرت به دلایلی همچون دارا بودن ترکیبات نشاسته‌ای و قندی بالا (Russell and Hallauure, 1988)، قیمت کم بذر، تولید زیست‌توده زیاد و داشتن رشد سریع می‌تواند گزینه مناسبی برای تولید علوفه در کشت بدون خاک باشد (Nike et al., 2012). در این میان مدیریت مناسب تغذیه ذرت در کشت بدون خاک برای افزایش کمیت و کیفیت علوفه سبز دارای اهمیت زیادی است. تاکنون محلول‌های غذایی متعددی با ترکیب عناصر غذایی متفاوت پرمصرف و کم‌مصرف برای تولید ذرت در کشت بدون خاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Stewart et al., 2019; et al., 2020; Alexander et al., 1991). در بین عناصر غذایی موجود در محلول‌های غذایی نیتروژن اهمیت ویژه‌ای دارد. نیتروژن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه با دو شکل عمده جذب نیترات و آمونیوم توسط گیاهان اثرات مهمی بر کمیت و کیفیت محصولات کشاورزی دارد. (Hachiya & Sakakibara, 2017) اکثر گیاهان قادرند از آمونیوم یا نیترات به تنهایی و یا مخلوطی از هر دو شکل استفاده کنند. تأثیرگذاری شکل نیتروژن به عواملی همچون مرحله رشدی گیاه (Errebhi & Wilcox, 1990)، دما و pH محلول غذایی (Wen et al., 2000)، مقدار نیتروژن کل در گیاه (Mahlangu et al., 2016) و نسبت آمونیوم به نیترات (Savvas et al., 2006) وابسته است. ظرفیت زیاد گیاهان در تجمع نیترات در برگ‌هایشان (Santamaría et al., 1998) و اثر سوء نیترات بر سلامتی انسان (Gangolli et al., 1994) و حیوانات (Bruning-Fann & Kaneene, 1993) سبب شده که آمونیوم بتواند در تأمین بخشی از نیتروژن گیاه نقش بسزایی داشته باشد. تاکنون پژوهش‌های متعددی در مورد تأثیر شکل نیتروژن بر رشد و عملکرد گیاهان زراعی مانند نیشکر (Boschieroa et al., 2019)، جو (Ali et al., 2001) کلزا (Aghajanzadeh & Hafez alkotob, 2020) و ذرت (Peng et al., 2018) در کشت بدون خاک صورت گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد زمانی که برای تأمین نیتروژن گیاه از نیترات و آمونیوم به صورت توأم استفاده شود، رشد گیاه بیشتر از زمانی است که هر یک از دو منبع به تنهایی بکار برده شود. پنگ و همکاران (Peng et al., 2018) در بررسی اثر شکل‌های مختلف نیتروژن و تراکم

کاشت بر رشد و عملکرد گیاه ذرت در کشت بدون خاک دریافتند در مقایسه با هر یک از شکل‌های نیترات یا آمونیوم به تنهایی، با کاربرد نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم زیست‌توده شاخساره، ریشه و کل ذرت در هر بوته افزایش معنادار یافت. به طوری که کاربرد مخلوط نیترات و آمونیوم در تراکم کم (۲۰۸ بوته در متر مربع) و زیاد (۶۶۷ بوته در متر مربع) کاشت به ترتیب ۴۰ و ۸۱ درصد زیست‌توده ذرت را افزایش داد. آنها اینگونه استدلال کردند زمانی که در تأمین نیتروژن گیاه ذرت از هر دو شکل نیتروژن استفاده شد تولید آدنوزین‌تری‌فسفات (ATP) افزایش معنادار نشان داد. افزایش تولید انرژی به معنای فتوسنتز و زیست‌توده بیشتر گیاه است. الکساندر و همکاران (Alexander et al., 1991) گزارش کردند کاربرد ۳۱ درصد از نیتروژن محلول غذایی به شکل آمونیوم در تمام دوره رشد و یا نیمی از آن عملکرد دانه و وزن خشک شاخساره ذرت را در مقایسه با گیاهانی که فقط ۴ درصد نیتروژن را به شکل آمونیوم دریافت کرده بودند افزایش داد. این افزایش برای گیاهانی که در تمام دوره رشد ۳۱ درصد کل نیتروژن محلول غذایی را به شکل آمونیوم دریافت کرده بودند بیشتر بود. آقاجانزاده و حافظ‌الکتب (Aghajanzadeh & Hafez alkotob, 2020) اثر تیمارهای مختلف نیتروژنی (نیترات و نیترات آمونیوم) را بر رشد و عملکرد گیاهچه‌های کلزا و کلم بروکلی در کشت بدون خاک بررسی کردند. نتایج نشان داد وزن تازه و خشک شاخساره در هر دو گیاه تغذیه شده با نیترات آمونیوم افزایش معناداری نسبت به گیاهان رشد یافته در محیط حاوی نیترات داشته است. آنها دلیل افزایش وزن تازه و خشک گیاهان را توسعه سطح برگ ناشی از افزایش فعالیت آنزیم سیتوکینین سنتتاز، افزایش میزان فتوسنتز و تنفس در نسبت مساوی آمونیوم به نیترات در مقایسه با تغذیه نیتراته بیان کردند. همچنین استدلال دیگر آنها این بود که تغذیه آمونیوم همراه با نیترات سبب رشد سریعتر گیاه می‌شود، چون جذب آمونیوم توسط گیاه سریعتر اتفاق می‌افتد. اسمیت و همکاران (Smith et al., 1990) در بررسی اثر سطوح مختلف آمونیوم به نیترات بر رشد و عملکرد ارزن مرواریدی (*Pennisetum glaucum*, L. R. Br.) عنوان کردند با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی کاهش در رشد برگ، ساقه، ریشه، ارتفاع گیاه و میانگین وزن دانه مشاهده شد. به طوری که بیشترین کاهش در نسبت‌های ۱ به صفر و ۳ به ۱ آمونیوم به نیترات رخ داد. ربی و همکاران (Rabie et al., 1980) معتقدند که تغذیه آمونیومی از ظرفیت فتوسنتز در برگ‌ها می‌کاهد و سبب کاهش عملکرد در گیاه می‌شود. تأثیر تغذیه با نیترات یا آمونیوم بر ترکیب شیمیایی گیاه متفاوت از یکدیگر است. با کاربرد آمونیوم، گیاه جهت حفظ توازن بار، H^+ را از ریشه‌ها می‌کند که این امر سبب پایین آمدن pH محیط ریشه شده و شرایط جهت افزایش فراهمی عناصری مانند فسفر، آهن و مس مهیا می‌گردد (Marschner, 2012). در صورتی که تغذیه نیتراتی سبب بالا رفتن pH محیط ریشه می‌گردد. زیرا گیاه برای حفظ

تبادل بار، OH^- یا یون بی‌کربنات را از ریشه ترواش می‌کند. بنابراین تغذیه نیتراتی در جذب کاتیون‌ها توسط گیاه موثر است. پنگ و همکاران (Peng et al., 2018) گزارش کردند در تراکم کاشت کم ذرت در کشت بدون خاک، در نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم، جذب نیتروژن ۱۲ درصد افزایش یافت. همچنین در تراکم کاشت زیاد و نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم، جذب نیتروژن و فسفر به‌ترتیب ۱۸ و ۴۳ درصد افزایش یافت. آنها اظهار کردند که تولید انرژی در گیاه در نسبت مذکور نیترات به آمونیوم بیشتر از هر دو منبع نیترات و یا آمونیوم به تنهایی بود. کائو و همکاران (Cao et al., 2011) در بررسی نسبت‌های مختلف نیترات به آمونیوم محلول غذایی بر جذب نیتروژن گیاه چچم (*Lolium perenne* L.) در کشت بدون خاک بیان کردند که در تیمارهای ۷۵ به ۲۵ و ۵۰ به ۵۰ نیترات به آمونیوم بیشترین جذب، و با کاربرد ۱۰۰ درصد نیترات یا آمونیوم به تنهایی میزان جذب نیتروژن حداقل بود. در پژوهش‌های زیادی اثر شکل نیتروژن بر شدت فتوسنتز و غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی گیاه در کشت بدون خاک بررسی شده است. گیو و همکاران (Guo et al., 2019) اثر کاربرد نیترات و آمونیوم در غلظت‌های ۲ و ۱۰ میلی‌مولار را بر شدت فتوسنتز در گیاه گندم در کشت بدون خاک مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد زمانی که منبع تأمین نیتروژن، آمونیوم بود آسمیلاسیون کربن کاهش یافت، به عبارت دیگر شدت فتوسنتز کم شد و نهایتاً سبب افت زیست‌توده گندم گردید. همچنین در گیاهان تغذیه شده با آمونیوم، نسبت زیست‌توده ریشه به شاخساره در مقایسه با گیاهانی که با نیترات تغذیه شده بودند کاهش معناداری یافت. این نتایج بیانگر اثر سمی آمونیوم بر رشد ریشه گندم بود. کائو و همکاران (Cao et al., 2011) دریافتند که با افزایش میزان آمونیوم محلول غذایی، محتوای کلروفیل گیاه چچم (*Lolium perenne* L.) افزایش معنادار نشان داد. آنها چنین استنباط کردند که با افزایش آمونیوم در نسبت‌های ۲۵ به ۷۵ و صفر به ۱۰۰ نیترات به آمونیوم رشد شاخساره، توسعه سلولی و گسترش برگ‌ها کاهش و در نتیجه محتوای کلروفیل در واحد سطح برگ افزایش یافت. اطلاعات اندکی در مورد تأثیر شکل نیتروژن بر رشد، عملکرد و ترکیب شیمیایی گیاهان علوفه‌ای از جمله ذرت در کشت بدون خاک موجود است. نظر به اهمیت موضوع و کمبود اطلاعات در این زمینه، در پژوهش حاضر تأثیر شکل نیتروژن بر عملکرد و ترکیب شیمیایی دو رقم ذرت علوفه‌ای در کشت بدون خاک مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

این آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با دو عامل نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و نوع رقم در چهار تکرار در گلخانه دانشگاه شهرکرد انجام شد. عامل اول نسبت های مختلف آمونیوم به نیترات محلول غذایی بود که با توجه به

بررسی منابع و تأثیر منفی سطوح بالای آمونیوم بر عملکرد کمی و کیفی گیاهان، از پنج نسبت آمونیوم به نیترات شامل صفر به ۱۰۰، ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵، ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ استفاده شد. عامل دوم نیز شامل دو رقم ذرت (*Zea mays* L.) هیبرید سینگل کراس ۷۰۴ و سینگل کراس ۴۱۰ بود. هیبرید سینگل کراس ۷۰۴، دیررس و مناسب برای کشت در مناطق گرمسیر و یا مناطق دارای فصل رشد نسبتاً طولانی است. این هیبرید دارای بوته‌های قوی، کاملاً بلند و پرشاخه و برگ است. علاوه بر داشتن عملکرد دانه‌ای بسیار مطلوب، محصول علوفه‌ای آن هم قابل توجه است. هیبرید سینگل کراس ۴۱۰، زودرس بوده و دارای عملکرد دانه و علوفه بالا و مناسب برای کشت در مناطق مختلف کشور است. از دیگر ویژگی‌های هیبرید سینگل کراس ۴۱۰ می‌توان به یکنواختی ارتفاع بوته و بلال، استحکام ساقه، تلقیح کامل، پوشش مناسب بلال، عدم آلودگی به آفات و بیماری‌ها اشاره کرد (Anonymous, 2018). به منظور اجرای آزمایش، بذور ذرت پس از ضدعفونی توسط محلول هیپوکلریت سدیم یک درصد به مدت یک ساعت (Assefa et al., 2020) در سینی کشت نشا حاوی کوکوپیت و پرلیت (به‌ترتیب با نسبت ۲ به ۱ حجمی/حجمی) کاشته شده و روزانه توسط آب مقطر آبیاری شدند. پس از سبز شدن بذور و ظهور دو برگ اولیه، نشاهای ذرت به گلدان‌های پلاستیکی ۱۰ لیتری حاوی پرلیت (۵/۵ تا ۵ میلی‌متر) منتقل شد. برای هر واحد آزمایشی یک گلدان در نظر گرفته و در داخل هر گلدان یک بوته کشت گردید. برای تهیه محلول غذایی، از آب مقطر استفاده شد. در محلول غذایی مورد استفاده غلظت نیتروژن کل، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به‌ترتیب برابر با ۱۸/۸۵، ۱/۲۹، ۹/۸۶، ۴/۷۱، ۲ میلی‌مولار و غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف برای آهن، منگنز، روی، مس، مولیبدن، بور، سدیم و کلر به‌ترتیب برابر ۱۰۷/۴، ۹/۱، ۳/۸، ۰/۶، ۰/۱، ۴۶/۳، ۶۵۰ و ۲۵۰ میکرومولار بود (Smith et al., 1983). همچنین pH محلول های غذایی در نسبت‌های مختلف آمونیوم به نیترات با استفاده از محلول یک مولار اسید سولفوریک و یا هیدروکسید سدیم بر روی شش تنظیم و سپس قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی تهیه شده با استفاده از دستگاه هدایت‌سنج اندازه‌گیری گردید. محدوده قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی مورد استفاده در محدوده ۲/۳۸ تا ۳/۱ دسی‌زیمنس بر متر بود. گلدان‌ها با تراکم نه بوته در متر مربع (۹۰۰۰ بوته در هکتار) (Alexander et al., 1991) در گلخانه چیده شدند. پس از انتقال نشاهای ذرت به گلدان‌ها از محلول‌های غذایی یک چهارم قدرت استفاده شد که به تدریج و با افزایش رشد گیاه و پس از ۲۱ روز در مرحله ۴ تا ۵ برگی از محلول غذایی تمام قدرت استفاده شد. محلول غذایی روزانه به صورت دستی به گیاهان داده شد. نوع سامانه آب‌کشت مورد استفاده از نوع باز و کسر آیشویی بسته به مرحله رشد گیاه بین ۵ تا ۲۰ درصد در نظر گرفته شد تا از تجمع نمک‌ها در بستر جلوگیری شود. سپس، مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره

فسفر در عصاره تهیه شده از روش خاکستری خشک و ترکیب با اسید کلریدریک با روش فسفو وانادات مولیدات زرد و با دستگاه اسپکتروفتومتر (Cintra Model 101) و پتاسیم با دستگاه فلیم فتومتر (Corning Model 410) اندازه‌گیری شد (Jones, 2001). کارایی مصرف آب نیز از تقسیم وزن خشک و تازه شاخساره (به‌طور جداگانه) تولید شده بر حجم محلول غذایی مصرف‌شده محاسبه شد (Ningoji et al., 2020). تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS انجام و مقایسه میانگین‌ها نیز از طریق آزمون چند دامنه‌ای دانکن و همچنین ضرایب همبستگی پیرسون به‌منظور بررسی وجود یا عدم وجود همبستگی بین صفات اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۴ انجام شد.

نتایج و بحث

تأثیر نسبت آمونیوم به نیترات بر غلظت عناصر پرمصرف
نتایج آنالیز واریانس نشان داد برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی با رقم بر غلظت نیتروژن ریشه و شاخساره به‌ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد، بر غلظت فسفر ریشه و شاخساره در سطح احتمال یک درصد و بر غلظت پتاسیم ریشه در سطح احتمال پنج درصد معنادار بود (جدول ۱). همچنین غلظت پتاسیم شاخساره فقط تحت تأثیر اثرات ساده نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و رقم در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۱). نتایج نشان داد در رقم سینگل کراس ۷۰۴ افزایش آمونیوم کاربردی تا ۳۷/۵ درصد در محلول غذایی سبب بیشترین افزایش معنادار در غلظت نیتروژن شاخساره شد، بطوری‌که ۷۲ درصد افزایش نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم (نسبت صفر به ۱۰۰ آمونیوم به نیترات) به ثبت رسید. در رقم سینگل کراس ۴۱۰ جایگزینی ۵۰ درصد آمونیوم به جای نیترات سبب ثبت بیشترین غلظت نیتروژن شاخساره شد بطوری‌که ۴۵/۳ درصد افزایش نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم مشاهده شد. روند صعودی افزایش در غلظت نیتروژن ریشه تا جایگزینی ۲۵ درصد آمونیوم به جای نیترات در محلول غذایی در هر دو رقم مشاهده شد. به‌طوری‌که در ارقام ذرت سینگل کراس ۷۰۴ و سینگل کراس ۴۱۰ تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات به‌ترتیب ۲۲/۵ و ۴۸ درصد افزایش در غلظت نیتروژن ریشه نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم مشاهده شد (جدول ۲). جذب آمونیوم برخلاف نیترات به صورت غیرفعال است و در نتیجه به انرژی نیاز ندارد (Homas & Sodek, 2005)، بنابراین صرفه‌جویی در انرژی می‌تواند در جهت جذب یون‌ها توسط گیاه بکار رود (Marschner, 2012). منگل و کربکی (Mengel & Kirkby, 2001) معتقدند یک ارتباط همسازی بین نیترات و آمونیوم حکمفرماست که سبب افزایش جذب نیتروژن در گیاهان می‌شود. شهوری و همکاران (Shahoori et al., 2018) گزارش کردند در

داشت در گلخانه صورت گرفت. در طول دوره آزمایش، میانگین دمای روز گلخانه ۲۵ درجه سلسیوس و میانگین دمای شب ۲۱ درجه سلسیوس، رطوبت نسبی ۴۰ تا ۵۳ درصد و میزان نور ۳۲۰۰ تا ۷۱۳۰۰ لوکس بود. در مرحله پایان ظهور گل آذین نر شاخص سبزی‌نگی برگ با کلروفیل متر دستی (Hansatech مدل CL-01) با انجام ۲۰ قرائت از پهنک برگ دهم انجام شد. همچنین در این مرحله سطح برگ در هر گیاه پس از اندازه‌گیری طول و عرض برگ‌ها با متر، براساس روابط ارائه شده توسط دیر و همکاران (Dwyer et al., 1999) اندازه‌گیری شد. برای محاسبه سطح برگ توسعه‌یافته و در حال توسعه در هر بوته گیاه ذرت به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده شد.

$$\text{معادله (۱)} \quad A = a \times b \times 0.5$$

$$\text{معادله (۲)} \quad A = a \times b \times 0.75$$

در این روابط A سطح برگ بر حسب سانتی‌متر مربع، a و b به‌ترتیب طول و عرض برگ بر حسب سانتی‌متر هستند.

همچنین مقدار نسبی آب برگ در برگ‌های جوان نسبتاً توسعه یافته و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید (Barrs & Weatherley, 1962).

$$\text{معادله (۳)} \quad RWC = [(W_f - W_d) / (W_s - W_d) W_d] \times 100$$

W_f = بافت تازه برگ

W_d = وزن نمونه برگ بعد از ۴ ساعت قرار گرفتن در آب مقطر

W_s = وزن نمونه بعد از خارج کردن از آون به مدت ۲۴ ساعت

برای محاسبه میزان کلروفیل a، b و کارتنوئیدهای برگ پس از عصاره‌گیری برگ (نمونه‌برداری از جوان‌ترین برگ) با استون ۸۰ درصد، جذب نور (A) با دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج‌های ۶۴۶/۸، ۶۶۳/۲ و ۴۷۰ نانومتر قرائت شد. سپس غلظت رنگیزه‌ها از روابط ۴، ۵ و ۶ محاسبه شد (Lichtenthaler, 1987).

$$\text{معادله (۴)} \quad a = 12/25 (A_{663/2} - 2/79 (A_{646/8})) \quad \text{کلروفیل}$$

$$\text{رابطه (۵)} \quad b = 21/21 (A_{646/8} - 5/1 (A_{663/2})) \quad \text{کلروفیل}$$

معادله (۶)

$$= [198 (b \text{ (کلروفیل)}) - 85/02 - 1/8 (a \text{ (کلروفیل)}) - 1000 (A_{470})] / 198$$

در پایان مرحله ظهور گل آذین نر، گیاهان برداشت شدند. پس از برداشت، قسمت‌های ریشه، ساقه و برگ تفکیک شده و وزن تازه نمونه‌ها توسط ترازوی رقومی اندازه‌گیری شد. نمونه‌ها توسط آب معمولی و آب مقطر شسته و به مدت ۷۲ ساعت در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس قرار داده شدند تا خشک شوند. سپس وزن خشک نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. به دنبال آن نمونه‌ها برای اندازه‌گیری‌های شیمیایی با استفاده از آسیاب برقی پودر شدند. غلظت عناصر غذایی پرمصرف در ریشه و شاخساره (برگ + ساقه) مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. غلظت نیتروژن موجود در نمونه‌ها پس از تهیه عصاره از روش خاکستری تر با استفاده از روش کلدال (Jones, 2001) اندازه‌گیری شد. غلظت

در محلول غذایی در رقم سینگل کراس ۷۰۴ مشاهده شد. در این میزان آمونیوم کاربردی غلظت فسفر ریشه ۲/۲ برابر غلظت فسفر ریشه در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم در رقم مذکور بود. اما افزایش در غلظت فسفر در رقم ۴۱۰ تا نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات هم ادامه داشت و در سطح نامبرده بیشترین غلظت فسفر ریشه به ثبت رسید که ۴/۴ برابر غلظت فسفر در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم بود (جدول ۲). دلیل افزایش معنادار غلظت فسفر ریشه و شاخساره ذرت با افزایش میزان آمونیوم محلول غذایی ارتباط هم‌افزایی^۱ بین آمونیوم و فسفر است (Marschner, 2012). این ارتباط به دلیل حفظ توازن بارهای الکتریکی در سلول‌های گیاهی است. وودسون و بودلی (Woodson & Boodley, 1982) معتقدند یون آمونیوم می‌تواند در انتقال فسفر از ریشه به شاخساره گیاه به عنوان یون مخالف موثر باشد. نتایج پژوهش‌های روستا (Roosta, 2010) نشان داد غلظت فسفر شاخساره اسفناج و کاهو با کاربرد آمونیوم در مقایسه با نیترات افزایش یافت که هم‌سو با نتایج پژوهش حاضر بود.

اثر شکل نیتروژن بر غلظت پتاسیم متفاوت از دو عنصر نیتروژن و فسفر بود. غلظت این عنصر در ریشه با افزایش بیش از ۱۲/۵ درصد آمونیوم در محلول غذایی شروع به کاهش کرد (جدول ۲). در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات محلول غذایی کمترین غلظت پتاسیم ریشه در هر دو رقم ثبت شد، به طوری که ۸ و ۱۴/۱ درصد کاهش معنادار به ترتیب در ارقام سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم مشاهده شد. پتاسیم شاخساره نیز روندی مانند پتاسیم ریشه را دنبال کرد. کاهش در غلظت پتاسیم شاخساره با افزایش ۲۵ درصد آمونیوم در محلول غذایی مشاهده شد و به تدریج با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی این کاهش هم زیاد شد.

صورت فراهمی دو شکل نیتروژن (نیترات و آمونیوم)، گیاه آویشن جذب آمونیوم را به نیترات ترجیح می‌دهد که افزایش در غلظت نیتروژن را به دنبال دارد. نتایج پژوهش‌های دلشاد و همکاران (Delshad et al., 2000) بر روی گوجه‌فرنگی نیز در همین راستا بود. بنی‌جمال و بیات (Banijamal & Bayat, 2014) دلیل افزایش غلظت نیتروژن با افزایش غلظت آمونیوم در محلول غذایی در برگ گل رز را جذب سریع تر شکل آمونیومی در قیاس با شکل نیتراتی و همچنین مصرف کمتر انرژی (Rothstein & Cregg, 2005) می‌دانند. اما با افزایش در میزان آمونیوم کاربردی (بیشتر از ۲۵ درصد) در هر دو رقم کاهش معنادار در غلظت نیتروژن ریشه رخ داد (جدول ۲). نجفی و پارسازاده (Najafi & Parsazadeh, 2010) گزارش کردند که بیشترین غلظت نیتروژن کل در اسفناج در نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم و در pH برابر با ۶/۵ در کشت بدون خاک مشاهده شد. بریتو و کروئزوک (Beritto & Kronzucker, 2002) معتقدند تغذیه آمونیومی سبب تراوش بیش از اندازه پروتون، اسیدی شدن ریزوسفر و به دنبال آن مسمومیت ناشی از آمونیوم آسمیله نشده می‌شود. اسیدی شدن ریزوسفر با افزایش آمونیوم کاربردی در واقع پاسخ گیاه به سمیت آمونیوم است (Zhang et al., 2005). مسمومیت ریشه کاهش رشد آن را به دنبال دارد. از آنجایی که اندازه سیستم ریشه عامل اساسی در جذب نیتروژن است بنابراین با کاهش رشد ریشه، جذب نیتروژن توسط آن کاهش می‌یابد (Sattelmacher et al., 1990). بی‌تسانسکی و همکاران (Bittansky et al., 2015) گزارش کردند غلظت‌های زیاد آمونیوم در محلول‌های غذایی باعث کاهش کارایی جذب نیتروژن توسط گیاه آرکید شده. آنها دلیل این مسئله را صدمه به سیستم ریشه و تجمع عناصر غذایی در گیاه نسبت دادند. نتایج ارائه شده در جدول ۲ بیانگر آن است که کاربرد آمونیوم در محلول غذایی در تمامی نسبت های آمونیوم به نیترات سبب افزایش غلظت فسفر شاخساره و ریشه در هر دو رقم ذرت نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم گردید. بیشترین غلظت فسفر شاخساره (۱۸/۰۲ گرم بر کیلوگرم) در رقم سینگل کراس ۷۰۴ و در تغذیه با محلول غذایی حاوی ۵۰ درصد آمونیوم بدست آمد که ۳/۲ برابر غلظت فسفر در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم بود. همچنین در مرتبه بعدی در رقم سینگل کراس ۴۱۰ در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات بیشترین غلظت فسفر شاخساره (۱۶/۸۷ گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد که با غلظت فسفر در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات در هر دو رقم سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ تفاوت معنادار نداشت (جدول ۲). کمترین غلظت فسفر شاخساره هم در نسبت صفر به صد در هر دو رقم ذرت حاصل شد که نسبت به یکدیگر تفاوت معنادار نداشتند (جدول ۲). نتایج نشان داد یک روند افزایشی در غلظت فسفر ریشه تا میزان ۳۷/۵ درصد آمونیوم کاربردی

جدول ۱- تجزیه واریانس غلظت عناصر پرمصرف در شاخساره و ریشه ذرت تحت تأثیر نسبت آمونیوم به نیترات و نوع رقم
Table 1- Analysis of variance for macronutrient concentration in shoot and root of maize affected by $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and cultivar type

منابع تغییر S.O. V	درجه آزادی Df	غلظت نیتروژن ریشه Root nitrogen concentration	غلظت نیتروژن شاخساره Shoot nitrogen concentration	غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration	غلظت فسفر شاخساره Shoot phosphorus concentration	غلظت پتاسیم ریشه Root potassium concentration	غلظت پتاسیم شاخساره Shoot potassium concentration
بلوک Block	3	5.34 ^{ns}	2.62 ^{ns}	0.57 ^{ns}	0.55 ^{ns}	11.16*	2.77 ^{ns}
نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	4	110.63**	187.29**	494.25**	195.73**	51.61**	118.11**
رقم ذرت Maize Cultivar	1	71.21**	31.22**	88.28**	12.61**	125.56**	25.76**
نسبت آمونیوم به نیترات × رقم ذرت $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ×ratio Cultivar	4	22.96**	10.46*	21.86**	4.62**	11.29*	1.87 ^{ns}
خطا Error	27	2.81	2.85	2.85	0.7	3.72	1.23
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)	-	5.26	7.18	8.85	6.57	7.64	4.35

^{ns}, **, * به ترتیب عدم معناداری، معناداری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

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

است.

تأثیر نسبت آمونیوم به نیترات بر غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ

نتایج آنالیز واریانس نشان داد برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی با رقم به ترتیب در سطح احتمال پنج درصد بر غلظت کلروفیل a و در سطح یک درصد بر غلظت کارتنوئید و شاخص سبزیگی برگ معنادار بود (جدول ۳). در حالیکه غلظت کلروفیل b برگ فقط تحت تأثیر اثرات ساده نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی و رقم در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۳).

به طوری که در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات ۲۶/۹ درصد کاهش در غلظت پتاسیم شاخساره نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم رخ داد. از آنجایی که ارتباط ضدیتی^۱ بین آمونیوم و پتاسیم حکمفرماست، بنابراین در جذب این دو یون توسط ریشه گیاه رقابت وجود دارد و همین امر سبب کاهش غلظت پتاسیم گیاه با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی می شود (Wang & Below, 1998). مارشنر (Marshner, 2012) معتقد است به دلیل همانند بودن اندازه یون هیدراته این دو یون (آمونیوم و پتاسیم) رقابت بین آنها بر سر جذب مکان‌های یکسان روی ریشه ایجاد می شود که با افزایش آمونیوم مقدار پتاسیم کاهش می یابد. نتایج نشان داد در رقم سینگل کراس ۷۰۴ غلظت پتاسیم شاخساره ۶/۴ درصد بیشتر از رقم سینگل کراس ۴۱۰ بود که به دلیل اختلافات ژنتیکی بین این دو رقم ذرت

جدول ۲- مقایسه میانگین اثر برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات و رقم ذرت بر غلظت عناصر پرمصرف در ریشه و شاخساره ذرت
Table 2- Mean comparisons of the $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and maize cultivar interaction effect on macronutrient concentrations in the root and shoot of maize

رقم Cultivar	نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	غلظت نیتروژن ریشه Root nitrogen concentration	غلظت نیتروژن شاخساره Shoot nitrogen concentration	غلظت فسفر ریشه Root phosphorus concentration	غلظت فسفر شاخساره Shoot phosphorus concentration	غلظت پتاسیم ریشه Root potassium concentration
(گرم بر کیلوگرم) g kg^{-1}						
(سینگل کراس ۷۰۴) Single cross 704	0:100 12.5:87.5 25:75 37.5:62.5 50:50	30.80 ^{cd} 29.48 ^{de} 37.72 ^a 34.94 ^b 33.15 ^{bc}	18.20 ^e 19.03 ^e 24.95 ^c 31.33 ^a 28.53 ^b	12.58 ^e 13.16 ^e 26.93 ^a 27.79 ^a 24.39 ^b	5.67 ^e 10.21 ^d 13.55 ^c 16.31 ^b 18.02 ^a	23.69 ^{de} 29.82 ^a 27.29 ^{ab} 26.04 ^{cd} 21.79 ^{ef}
(سینگل کراس ۴۱۰) Single cross 410	0:100 12.5:87.5 25:75 37.5:62.5 50:50	23.59 ^f 27.76 ^e 34.90 ^b 32.62 ^{bc} 33.88 ^b	18.87 ^e 18.71 ^e 22.04 ^d 26.16 ^{bc} 27.42 ^b	6.75 ^f 10.81 ^e 21.86 ^c 19.28 ^d 27.27 ^a	4.57 ^e 10.75 ^d 14.40 ^c 16.66 ^b 16.87 ^{ab}	22.79 ^e 28.92 ^{ab} 26.64 ^{bc} 25.96 ^{cd} 19.58 ^g

در هر ستون، حروف مشابه نمایانگر عدم اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند

Means followed by the same letters in each column are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

a و b در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات و عدم اختلاف معنادار با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات باشد.

سلطان و همکاران (Sultana et al., 2009) اظهار کردند که افزایش نیتروژن گیاه می‌تواند در افزایش مقادیر کلروفیل a و b در گیاه موثر باشد. پابلایونز و همکاران (Poblaciones et al., 2009) همبستگی خوبی بین نیتروژن و غلظت کلروفیل در برگ گندم مشاهده کردند. ژو و همکاران (Zhu et al., 2014) در بررسی اثر نسبت‌های متفاوت نیترات به آمونیوم بر رشد گیاه پرونلا باغی (*Prunella vulgaris*) دریافتند که به‌ترتیب بیشترین و کمترین مقدار کلروفیل در نسبت‌های ۷۵ به ۲۵ و صفر به ۱۰۰ حاصل شد.

قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2023) در بررسی اثر ۵ محلول غذایی (محلول غذایی تمام قدرت و نیم قدرت هوگلند با نسبت صفر به صد آمونیوم به نیترات، محلول غذایی باری و میلر با نسبت ۳۰ به ۷۰ آمونیوم به نیترات، محلول غذایی الکساندر با نسبت ۵ به ۹۵ آمونیوم به نیترات و محلول غذایی رواکورا با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات) بر شاخص سبزیگی برگ دو رقم ذرت در کشت بدون خاک دریافتند که بیشترین و کمترین مقدار این شاخص به‌ترتیب در محلول غذایی رواکورا و نیم قدرت هوگلند در هر دو رقم مشاهده شد. آنها اینگونه استدلال کردند که اولاً محلول غذایی رواکورا برخلاف محلول غذایی نیم قدرت هوگلند دارای دو شکل نیتروژن (نیترات و آمونیوم) در ترکیب خود بود.

در رقم سینگل کراس ۷۰۴، تغذیه گیاهان با محلول دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات منجر به ۳۱ درصد کاهش در غلظت کلروفیل a برگ نسبت به گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی ۲۵ درصد آمونیوم (با بیشترین میزان کلروفیل) شد. غلظت کلروفیل a برگ در رقم سینگل کراس ۴۱۰ با افزایش آمونیوم در محلول غذایی تا ۲۵ درصد روند صعودی و با افزایش بیشتر سهم آمونیوم روند نزولی نشان داد (جدول ۴). در بین دو رقم، بیشترین غلظت کارتنوئید برگ در رقم سینگل کراس ۷۰۴ و در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات ثبت شد که ۴/۱ برابر غلظت کارتنوئید در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم بود. در هر دو رقم با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی به بیش از ۲۵ درصد، غلظت کارتنوئید برگ به‌طور معناداری کاهش یافت (جدول ۴). با افزایش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی غلظت کلروفیل b برگ به‌طور معناداری در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم افزایش یافت. بیشترین غلظت کلروفیل b برگ در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات حاصل شد که البته با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ اختلاف معناداری نداشت. همچنین در رقم سینگل کراس ۷۰۴، غلظت کلروفیل b برگ، ۹/۳۵ درصد بیش از رقم سینگل کراس ۴۱۰ بود (جدول ۴). نیتروژن با شرکت در حلقه پورفیرین به‌طور مستقیم در ساخت کلروفیل نقش دارد (Ahmadi et al., 2004). از آنجایی که غلظت نیتروژن شاخساره در نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات در رقم سینگل کراس ۷۰۴ بیشترین مقدار بود (جدول ۲)، این امر احتمالاً می‌تواند دلیل بیشتر بودن مقادیر کلروفیل

جدول ۳- تجزیه واریانس غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در شاخساره ذرت تحت تأثیر نسبت آمونیوم به نیتрат و نوع رقم
 Table 3- Analysis of variance for photosynthetic pigments concentration in shoot of maize affected by $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and cultivar type

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کارتنوئید Carotenoids	شاخص سبزیگی برگ Leaf greenness index
بلوک Block	3	0.05 ^{ns}	0.06 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.96 ^{ns}
نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	4	27.12**	19.76**	12.72**	284.88**
رقم ذرت Maize Cultivar	1	1.71**	2.34**	0.50**	82.66**
نسبت آمونیوم به نیترات × رقم ذرت Cultivar × $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	4	0.46*	0.15 ^{ns}	0.18**	14.59**
خطا Error	27	0.14	0.08	0.01	2.78
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)	-	3.87	5.47	6.04	5.37

^{ns}, ** و * به ترتیب عدم معناداری، معناداری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

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

تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات بیشترین مقدار را داشت. در نسبت مذکور شاخص سبزیگی برگ در ارقام سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ به ترتیب ۴۳ و ۴۶ درصد افزایش نسبت به شاخص سبزیگی برگ گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد آمونیوم نشان داد (جدول ۴).

تأثیر نسبت آمونیوم به نیترات بر عملکرد

نتایج آنالیز واریانس نشان داد برهمکنش نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی با رقم به ترتیب در سطح احتمال یک درصد بر وزن تازه شاخساره و در سطح احتمال پنج درصد بر وزن تازه ریشه و کارایی مصرف آب براساس وزن تازه و خشک معنادار بود (جدول ۵). اما اثر ساده نسبت آمونیوم به نیترات محلول غذایی در سطح احتمال یک درصد بر محتوای نسبی رطوبت برگ و سطح برگ و اثر ساده رقم در سطح احتمال یک درصد بر محتوای نسبی رطوبت برگ و در سطح ۵ درصد بر سطح برگ معنادار بود (جدول ۵). بیشترین محتوای نسبی رطوبت برگ در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد که در مقایسه با محلول غذایی فاقد آمونیوم ۲۰ درصد افزایش نشان داد (جدول ۶). نتایج نشان داد با افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی محتوای نسبی رطوبت برگ شروع به کاهش کرد تا اینکه در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات با ۲۶ درصد کاهش در مقایسه با نسبت ۲۵ به ۷۵ کمترین محتوای نسبی رطوبت برگ ثبت شد.

دوم، این محلول غذایی دارای غلظت نیتروژن بیشتری نسبت به مابقی محلول‌های غذایی بود. آنها گزارش کردند که همبستگی مثبت و معناداری بین غلظت نیتروژن شاخساره و شاخص سبزیگی برگ ($r = 0.70$, $p < 0.01$) وجود داشت. در پژوهش حاضر نیز همبستگی مثبت و معناداری بین غلظت نیتروژن شاخساره و شاخص سبزیگی برگ ($r = 0.64$, $p < 0.01$) وجود داشت. مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۲ با وجود اینکه در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات ۸/۹ درصد کاهش در غلظت نیتروژن شاخساره در رقم سینگل کراس ۷۰۴ در مقایسه با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ به ثبت رسید اما کاهش معنادار در غلظت کلروفیل a در نسبت ۵۰ به ۵۰ در قیاس با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ تقریباً ۳۲ درصد بوده است (جدول ۴). این اتفاق نشان می‌دهد که در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات گیاه دچار سمیت آمونیوم شده و با وجود غلظت زیاد نیتروژن، در تولید کلروفیل a کاهش رخ داده است. این شرایط برای کلروفیل b هم وجود داشت. به طوری که ۳۱/۴ درصد کاهش در غلظت کلروفیل b در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در قیاس با گیاهان تغذیه شده با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات مشاهده شد. از طرف دیگر ثبت کمترین غلظت پتاسیم شاخساره در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در هر دو رقم ذرت (جدول ۲) استدلال دیگری برای کاهش غلظت کلروفیل در این نسبت آمونیوم به نیترات است (جدول ۴).

ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2008) گزارش کردند که پتاسیم اثر فزاینده‌ای در تقویت ساخت ATP، کلروفیل a و b در غلات دارد. نتایج نشان داد در هر دو رقم ذرت شاخص سبزیگی برگ در گیاهان

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر نسبت آمونیوم به نیترات و رقم ذرت بر غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی در برگ ذرت

Table 4- Mean comparisons of the $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and maize cultivar effect on photosynthetic pigments concentration in the leaf of maize

Maize Cultivar (رقم ذرت)	Single cross 704 (سینگل کراس ۷۰۴)					Single cross 410 (سینگل کراس ۴۱۰)				
(نسبت آمونیوم به نیترات) $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	0:100	12.5:87.5	25:75	37.5:62.5	50:50	0:100	12.5:87.5	25:75	37.5:62.5	50:50
(mg g ⁻¹ FW)										
(کلروفیل a) Chlorophyll a	8.40 ^{de}	9.30 ^c	12.13 ^a	11.62 ^{ab}	8.30 ^{de}	8.23 ^{de}	8.51 ^d	11.94 ^a	11.35 ^b	7.87 ^e
کارتنوئید Carotenoids	0.91 ^e	1.52 ^d	3.72 ^a	3.22 ^b	0.91 ^e	0.64 ^f	1.60 ^d	3.16 ^{bc}	3.02 ^c	0.73 ^f
شاخص سبزیگی Leaf greenness index	27.20 ^{de}	29.68 ^c	38.90 ^a	36.88 ^{ab}	22.23 ^f	26.43 ^e	28.95 ^{cd}	38.57 ^a	35.80 ^b	26.05 ^e
نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio										
کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	0:100	12.5:87.5	25:75	37.5:62.5	50:50	0:100	12.5:87.5	25:75	37.5:62.5	50:50
	3.51 ^c	4.57 ^b	7.09 ^a	6.94 ^a	4.76 ^b					
رقم ذرت Maize Cultivar										
کلروفیل b Chlorophyll b (mg g ⁻¹ FW)	(سینگل کراس ۷۰۴) Single cross 704					(سینگل کراس ۴۱۰) Single cross 410				
	5.61 ^a					5.13 ^b				

میانگین‌های دارای حروف مشابه، نمایانگر عدم اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات با بیشترین سطح برگ (۰/۶۸ متر مربع در گیاه) نشان داد (جدول ۶). با توجه به اینکه در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ کاهش معنادار نشان داد (جدول ۴)، بالتبع آن میزان فتوسنتز، توسعه سلولی و سطح برگ هم کاهش یافت. مارشمر (Marschner, 2012) معتقد است زمانی که گیاه بیش از حد بهینه آمونیوم را جذب کرده و نتواند آن را آسمیله کند تجمع آمونیوم در گیاه رخ می‌دهد. آمونیوم آسمیله نشده وارد برگ‌ها شده و در بسیاری از فعالیت‌های حیاتی گیاه مانند فتوسنتز اختلال ایجاد می‌کند. چن و همکاران (Chen et al., 1998) گزارش کردند ساخت سیتوکینین با افزایش سهم آمونیوم دچار کاهش شده و از آنجایی که نقش سیتوکینین در توسعه و انبساط سلولی است، بنابراین کاهش سطح برگ در گندم رخ داد. دوک و کالینز (Duke & Collins, 1985) بیان کردند که پتاسیم در بهبود فعالیت آنزیم‌های موثر در آسمیلاسیون آمونیوم نقش بسزایی دارد. بدیهی است کاهش غلظت پتاسیم سبب افزایش میزان آمونیوم غیرآسمیله در گیاه می‌شود.

کاندلبایندر و همکاران (Kandlbinder et al., 1997) اظهار کردند گیاهانی که از آمونیوم جهت تأمین نیتروژن استفاده شد دچار اختلال در تنظیم فرآیند اسمزی می‌شوند. استدلال آنها این بود که این گیاهان نمی‌توانند در حفظ ساخت آنیون‌های آلی موفق باشند. در صورتی که یکی از اثرات تغذیه گیاهان با نیترات، تولید اسیدهای آلی و به دنبال آن تولید آنیون‌های آلی است. آنیون‌های آلی می‌توانند با پتاسیم تشکیل نمک‌هایی را دهند که از نظر اسمزی بسیار فعالند و توانایی تنظیم فعالیت‌های اسمزی را دارا هستند.

در پژوهش حاضر اولاً زیاد بودن سهم آمونیوم در محلول غذایی (۵۰ درصد) و دوماً روند کاهش غلظت پتاسیم در شاخساره با افزایش سهم آمونیوم (جدول ۲) تأثیر بسزایی در کم شدن محتوای نسبی رطوبت برگ در نسبت ۵۰ به ۵۰ داشت. بیشتر بودن غلظت پتاسیم شاخساره در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نسبت به رقم سینگل کراس ۴۱۰ (جدول ۲)، دلیل احتمالی بیشتر بودن محتوای نسبی رطوبت برگ در رقم ۷۰۴ نسبت به رقم سینگل کراس ۴۱۰ بود (جدول ۶).

نتایج نشان داد با کاربرد ۵۰ درصد نیتروژن به شکل آمونیوم در محلول غذایی سطح برگ ذرت کاهش یافت (جدول ۶). در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات سطح برگ گیاه ۳۸ درصد کاهش در مقایسه

جدول ۵- تجزیه واریانس وزن تازه شاخساره و ریشه، کارایی مصرف آب، سطح برگ و محتوای نسبی رطوبت برگ تحت تأثیر نسبت آمونیوم به نیترات و نوع رقم

Table 5- Analysis of variance for shoot and root fresh weight, water use efficiency, leaf area and leaf relative water content affected by $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and cultivar type

منابع تغییر S.O. V	درجه آزادی Df	محتوای نسبی رطوبت برگ Leaf Relative Water Content	سطح برگ Leaf area	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weight	وزن تازه ریشه Root fresh weight	کارایی مصرف آب براساس وزن تازه Water use efficiency	کارایی مصرف آب براساس وزن خشک Water use efficiency
بلوک Block	3	18.65 ^{ns}	0.00 ^{ns}	470.89 ^{ns}	160.09 ^{ns}	0.71 ^{ns}	0.03 ^{ns}
نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	4	654.60**	0.12**	129978.28**	11426.94**	199.45**	8.60**
رقم ذرت Maize Cultivar	1	211.69**	0.01*	17181.02**	2213.85**	26.36**	1.32**
نسبت آمونیوم به نیترات × رقم ذرت × $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio Cultivar	4	6.63 ^{ns}	0.00 ^{ns}	4520.96**	410.50*	6.92*	0.35*
خطا Error	27	9.22	0.00	1036.26	143.36	1.59	0.09
ضریب تغییرات (%) Coefficient of variation (%)	-	4.07	6.46	4.09	5.06	4.10	5.74

^{ns}, ** و * به ترتیب عدم معناداری، معناداری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.
^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

تازه شاخساره و ریشه در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل کراس ۷۰۴ مشاهده شد که اختلاف معناداری با وزن تازه شاخساره و ریشه گیاهان تغذیه شده با نسبت ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات در همان رقم نداشتند (جدول ۶). در نسبت‌های ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۱۰/۶، ۳۹/۵ و ۳۵/۳ درصد افزایش معنادار در وزن تازه شاخساره ذرت نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم در رقم سینگل کراس ۷۰۴ ثبت شد (جدول ۶). همچنین در رقم سینگل کراس ۴۱۰ در نسبت‌های ۱۲/۵ به ۸۷/۵، ۲۵ به ۷۵ و ۳۷/۵ به ۶۲/۵ و ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات به ترتیب ۳۰/۱، ۵۱/۸ و ۴۶/۷ و ۹/۶ درصد افزایش در وزن تازه شاخساره نسبت به محلول غذایی فاقد آمونیوم مشاهده شد. کمترین وزن تازه ریشه هم در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل کراس ۴۱۰ به ثبت رسید که اختلاف معناداری با وزن تازه ریشه در همین نسبت در رقم ۷۰۴ نداشت (جدول ۶).

با توجه به کاهش غلظت پتاسیم شاخساره (جدول ۲) می‌توان گفت احتمالاً در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات میزان آسمیلاسیون آمونیوم کاهش داشته و به دنبال آن اختلال در فرایند فتوسنتز بیشتر بوده است. سانتوس و همکاران (Santos et al., 2013) نشان دادند که بیشترین تعداد و سطح برگ در گیاهان چمن (*Panicum maximum*) تغذیه شده با نسبت‌های نیترات به آمونیوم ۷۰ به ۳۰ و ۵۵ به ۴۵ بدست آمد. آنها افزایش سطح برگ را به افزایش میزان سیتوکینین نسبت دادند.

همچنین از بین دو رقم سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰، رقم سینگل کراس ۷۰۴ دارای ۵/۶ درصد سطح برگ بیشتری نسبت به رقم ۴۱۰ بود (جدول ۶). علاوه بر اینکه تفاوت در میزان سطح برگ می‌تواند ناشی از اختلافات ژنتیکی بین دو رقم باشد، تفاوت در غلظت نیتروژن برگ هم می‌تواند تأثیرگذار بوده و سبب اختلاف در میزان سطح برگ در بین ارقام شود (Luther & Moler, 1988). مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۲ علاوه بر غلظت نیتروژن، غلظت عناصر فسفر و پتاسیم در شاخساره در رقم سینگل کراس ۷۰۴ به طور معناداری بیشتر از رقم سینگل کراس ۴۱۰ بود. به عبارت دیگر وضعیت تغذیه‌ای بهتر در رقم سینگل کراس ۷۰۴ نسبت به رقم سینگل کراس ۴۱۰، فتوسنتز و توسعه برگ‌های بیشتری را به دنبال داشته است. نتایج نشان داد بیشترین وزن

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر نسبت آمونیوم به نیترات و رقم ذرت بر وزن تازه ریشه و شاخساره، کارایی مصرف آب، سطح برگ و محتوای نسبی رطوبت برگ ذرت

Table 6- Mean comparisons of the effect of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio and maize cultivar on root and shoot fresh weight, water use efficiency, leaf area and leaf relative water content of maize

رقم Cultivar	نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weight (g plant ⁻¹)	وزن تازه ریشه Root fresh weight (g plant ⁻¹)	کارایی مصرف آب براساس وزن تازه Water use efficiency Based on fresh weight (kg m ⁻³)	کارایی مصرف آب براساس وزن خشک Water use efficiency Based on Dry weight (kg m ⁻³)
(سینگل کراس ۷۰۴) Single cross 704	0:100	690.00 ^e	210.33 ^e	27.03 ^e	4.50 ^{ef}
	12.5:87.5	763.75 ^d	232.25 ^d	29.92 ^d	4.90 ^{de}
	25:75	963.00 ^a	289.89 ^a	37.72 ^a	6.62 ^a
	37.5:62.5	933.50 ^{ab}	280.33 ^{ab}	36.56 ^{ab}	6.38 ^{ab}
	50:50	685.50 ^e	207.10 ^e	26.85 ^e	4.22 ^f
(سینگل کراس ۴۱۰) Single cross 410	0:100	592.75 ^f	177.14 ^f	23.21 ^f	3.65 ^g
	12.5:87.5	771.25 ^d	231.61 ^d	30.21 ^d	4.97 ^d
	25:75	900.00 ^{bc}	269.46 ^{bc}	35.25 ^{bc}	6.05 ^{bc}
	37.5:62.5	869.75 ^c	260.12 ^c	43.06 ^c	5.83 ^c
	50:50	694.75 ^e	207.18 ^e	27.21 ^e	4.31 ^f
نسبت آمونیوم به نیترات $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio	0:100	12.5:87.5	25:75	37.5:62.5	50:50
محتوای نسبی رطوبت برگ Leaf Relative Water Content (%)	71.28 ^c	72.85 ^c	85.20 ^a	81.46 ^b	62.20 ^d
سطح برگ Leaf area (m ² plant ⁻¹)	0.46 ^c	0.53 ^b	0.68 ^a	0.65 ^a	0.42 ^d
رقم Cultivar	(سینگل کراس ۷۰۴) Single cross 704				(سینگل کراس ۴۱۰) Single cross 410
محتوای نسبی رطوبت برگ Leaf Relative Water Content (%)	76.90 ^a				72.30 ^b
سطح برگ Leaf area (m ² plant ⁻¹)	0.56 ^a				0.53 ^b

میانگین‌های دارای حروف مشابه، نمایانگر عدم اختلاف معنادار در سطح احتمال پنج درصد براساس آزمون دانکن هستند.

Means followed by the same letters are not significantly different at 5% probability level based on Duncan test.

عملکرد گیاه گشنیز در شرایط کشت بدون خاک می‌باشد. ژو و همکاران (Zhu et al., 2021) دریافتند که در نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات بیشترین جذب نیتروژن و رشد گیاه کلم چینی رخ داد. آنها گزارش کردند افزایش سهم آمونیوم در محلول غذایی سبب سمیت آمونیوم و اسیدی شدن ریزوسفر شد و کاهش در رشد گیاه را به دنبال داشت.

نتایج نشان داد بیشترین کارایی مصرف محلول غذایی براساس وزن تازه و خشک در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات و در رقم سینگل کراس ۷۰۴ به ثبت رسید. به‌طوری‌که به ازای هر یک متر مکعب محلول غذایی مصرفی به‌ترتیب ۳۷/۷ و ۶/۶۲ کیلوگرم علوفه تازه و خشک تولید شد که در قیاس با محلول غذایی فاقد آمونیوم در همان رقم به‌ترتیب ۳۹/۵۴ و ۴۷/۱ درصد افزایش نشان داد. در مناطق خشک و نیمه خشک آب آبیاری به عنوان محدود کننده ترین عامل در نیل به عملکرد بهینه در محصولات کشاورزی مطرح است، بنابراین اندازه‌گیری کارایی مصرف آب (محلول غذایی) می‌تواند

دلیل کاهش وزن ریشه به دلیل افزایش غلظت آمونیوم در ریشه است که از طرفی با ایجاد سمیت و از طرف دیگر با کاهش میزان اسکلت‌های کربنی در نتیجه آسیمیلاسیون آمونیوم جذب شده منجر به کاهش رشد ریشه‌ها شده است (Beritto & Kronzucker, 2002). با توجه به اینکه غلظت رنگیزه‌های فتوسنتزی برگ در گیاهان ذرت تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات، کاهش معناداری نسبت به سطح ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات در هر دو رقم نشان داد (جدول ۴) در نتیجه میزان فتوسنتز، انبساط و توسعه سلولی و همچنین سطح برگ در گیاهان تغذیه شده با این نسبت کاهش و نهایتاً زیست توده گیاه افت کرده است (جدول ۶). کوماری و همکاران (Kumari et al., 2021) گزارش کردند که حداکثر سطح برگ، وزن تازه و خشک گیاه گشنیز با کاربرد نسبت ۷۵ به ۲۵ نیترات به آمونیوم حاصل شد. آنها گزارش کردند در بین نسبت‌های مختلف نیترات به آمونیوم، نسبت ۷۵ به ۲۵ بهترین نسبت نیترات به آمونیوم برای حصول بیشترین

خاک در تولید علوفه جو وجود داشت. آنها بیان کردند برای حفظ آب باید بر روی کشت‌های گلخانه‌ای و بدون خاک تمرکز کرد. نتیجه حاصل از پژوهش حاضر در قیاس با نتایج پژوهش‌های بیان شده به وضوح نشان می‌دهد که کارایی مصرف آب در تولید علوفه در شرایط کشت بدون خاک بسیار بیشتر از کشت‌های مزرعه‌ای است.

نتیجه‌گیری

بر مبنای نتایج پژوهش حاضر بیشترین وزن تازه شاخساره و ریشه ارقام ذرت سینگل کراس ۷۰۴ و سینگل کراس ۴۱۰ در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۲۵ به ۷۵ آمونیوم به نیترات حاصل شد. با توجه به محدودیت منابع آبی و نزولات جوی، استفاده بهینه از حداقل آب برای تولید حداکثر محصولات کشاورزی را باید مدنظر قرار داد. بر این مبنای استفاده از محلول غذایی مورد استفاده در این پژوهش با نسبت آمونیوم به نیترات ۲۵ به ۷۵ برای دستیابی به بیشترین عملکرد و کارایی مصرف محلول غذایی در کشت بدون خاک ذرت علوفه‌ای در شرایط مشابه این پژوهش قابل توصیه است.

نشان‌دهنده میزان صرفه‌جویی در آب (محلول غذایی) باشد (al., Rudnick et al., 2016). مارشنر (Marschner, 2012) گزارش کرد که تأمین پتاسیم در حد بهینه سبب باز و بسته شدن و کارکرد طبیعی روزنه‌ها شده و در نتیجه بهبود کارایی مصرف آب گیاه را به دنبال دارد. در نسبت ۵۰ به ۵۰ آمونیوم به نیترات در دو رقم سینگل کراس ۷۰۴ و ۴۱۰ با کاهش غلظت پتاسیم شاخساره در مقایسه با نسبت ۱۲/۵ به ۸۷/۵ کاهش در کارایی مصرف محلول غذایی رخ داد. نادری و همکاران (Naderi et al., 2015) نشان دادند بیشترین کارایی مصرف آب برابر با ۲/۲۷ کیلوگرم ماده خشک ذرت در رقم سینگل کراس ۷۰۴ از مصرف یک متر مکعب آب در کشت روباز (مزرعه‌ای) حاصل شد. محمدنژاد و همکاران (Mohammadnejad et al., 2015) بیشترین کارایی مصرف آب از تولید علوفه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ را ۱/۶ کیلوگرم بر متر مکعب در کشت مزرعه‌ای گزارش کردند. لیو و همکاران (Liu et al., 2023) بیشترین کارایی مصرف آب از تولید ماده خشک ذرت را در کشت مزرعه‌ای ۳/۴۷ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش کردند. المولتوم و همکاران (Elmulthum et al., 2023) گزارش کردند تفاوت فاحشی بین کارایی مصرف آب در کشت مزرعه‌ای و کشت بدون

منابع

1. Adeyemi, T.A., Adeoye, S.A., Ogunyemi, T.J., Adedeji, E.A., Oluyemi, B., & Ojob, V.O.A. (2020). Comparisons of nutrient solutions from organic and chemical fertilizer sources on herbage yield and quality of hydroponically produced maize fodder. *Journal of Plant Nutrition*, 44(9), 1349–1364. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845382>
2. Aghajanzadeh, T.A., & Hafez alkotob, A. (2020). Effect of nitrate and ammonium nitrate on growth, sulfur metabolism and gene expression of sulfate transporters, adenosine triphosphate sulfurylase and adenosine 5'-Phosphosulfate reductase in canola (*Brassica napus* L.) and broccoli (*Brassica oleraceae* L.). *Journal of Plant Research*, 33(4), 781-796. (In Persian with English abstract)
3. Ahmadi, A., Ehsanzadeh, P., & Jabbari, F. (2004). *Introduction to plant physiology*. Vol I, Tehran University Press, 653p. (In Persian)
4. Alexander, K.G., Miller, M.H., & Beauchamp, E.G. (1991). The effect of an NH_4^+ enhanced nitrogen source on the growth and yield of hydroponically grown maize (*Zea mays* L.). *Journal of Plant Nutrition*, 14(1), 31-44. <https://doi.org/10.1080/01904169109364181>
5. Ali, A., Tucker, T.C., Thompson, T.L., & Salim, M. (2001). Effects of salinity and mixed ammonium and nitrate nutrition on the growth and nitrogen utilization of barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 186, 223–228. <https://doi.org/10.1046/j.1439-037x.2001.00471.x>
6. Anonymous. (2018). Report on the introduction of a new early maturing single cross hybrid maize 410 Taha (KSC 410) with suitable adaptability and desirable grain yield for cultivation in different regions of the country. Agricultural Research, Education and Extension Organization."
7. Assefa, G., Urge, M., Animut, G., & Assefa, G. (2020). Effect of variety and seed rate on hydroponic maize fodder biomass yield, chemical composition, and water use efficiency. *Biotechnology in Animal Husbandry*, 36, 87-100. <https://doi.org/10.2298/BAH2001087A>
8. Banijamal, S.M., & Bayat, H. (2014). Effect of different ammonium and calcium different dosages on nutritional status, *Rosa hybrida* L. performance and quality in hydroponic system. *Journal of Greenhouse Cultivation Science and Technology*, 4(1), 29-38. (In Persian)
9. Barrs, H.D., & Weatherley, P.E. (1962). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3), 413-428. <https://doi.org/10.1071/BI9620413>
10. Beritto D.T., & Kronzucker, H.J. (2002). NH_4^+ toxicity in higher plants: a critical review. *Journal of Plant Physiology*, 159(6), 567-584. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-0774>
11. Bittsanský, A., Pilinszky, K., Gyulai, G., & Komives, T. (2015). Over coming ammonium toxicity. *Plant Science*, 231, 184-190. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2014.12.005>

12. Boschieroa, B.N., Mariano, E., Azevedoc, R.A. & Trivelin, P.C.O. (2019). Influence of nitrate - ammonium ratio on the growth, nutrition, and metabolism of sugarcane. *Plant Physiology and Biochemistry*, 139, 246-255. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.024>
13. Bruning-Fann, C., & Kaneene, J.B. (1993). The effect of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on animal health. *Veterinary Human Toxicology*, 35(3), 237-253.
14. Cao, H., Ge, Y., Liu, D., Cao, Q., Chang, S.X., Chang, J., Song, X., & Lin, X. (2011). Nitrate/ammonium ratio affect ryegrass growth and nitrogen accumulation in a hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 34, 206-216. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.533322>
15. Chen, J.G., Cheng, S.H., Cao, W.X., & Zhou, X. (1998). Involvement of endogenous plant hormones in the effect of mixed nitrogen source on growth and tillering of wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 87-97.
16. Chen, J. (2007). Rapid urbanization in China: a real challenge to soil protection and food security. *Catena* 69(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.019>
17. Delshad, M., Babalar, M., & Kashi, A.K. (2000). Effect of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio of nutrient solutions on greenhouse tomato cultivars in hydroponic systems. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 31(3), 613-625. (In Persian)
18. Duke, S.H., & Collins, M. (1985). The role of K in legume dinitrogen fixation. In R. D. Munson (ed). *Potassium in Agriculture*. Am. Soc. Agron. Madison, WI p 443-465.
19. Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Carrigna, L., Ma, B.L., & Neave, P. (1999). Guidelines for comparisons among different corn-maturity rating systems. *Agronomy Journal*, 91(6), 122-131. <https://doi.org/10.2134/agronj1999.916946x>
20. Elmuthum, N.A., Zeineldin, F.I., Al-Khateeb, S.A., Al-Barrak, K.M., Mohammed, T.A., Sattar, M.N., & Mohmand, A.S. (2023). Water use efficiency and economic evaluation of the hydroponic versus conventional Cultivation systems for green fodder production in Saudi Arabia. *Sustainability*, 15, 822. <https://doi.org/10.3390/su15010822>
21. Errebhi, M., & Wilcox, G.E. (1990). Plant species response to ammonium-nitrate concentration ratios. *Journal of Plant Nutrition*, 13(8), 1017-1029. <https://doi.org/10.1080/01904169009364132>
22. Gangolli, S.D., Van Den Brandt, P.A., Feron, V.J., Jan-Zowesky, C., Koeman, J.H., Speijers, G.J.A., Spiegelhalter, B., Walker R., & Winshnok, J.S. (1994). Nitrate, nitrite and N-nitroso compounds. *European Journal of Pharmacology*, 292(1), 1-38. [https://doi.org/10.1016/0926-6917\(94\)90022-1](https://doi.org/10.1016/0926-6917(94)90022-1)
23. Ghorbani, M., kiani, S.H., Moharrery, A., & Fallah, S. (2023). The effect of ionic composition of the nutrient solutions on growth, macronutrients concentration and yield of two fodder maize (*Zea mays* L.) cultivars in soilless culture. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 14(1), 31-51.
24. Guo, J., Jia, Y., Chen, H., Zhang, L., Yang, J., Hu, X., Ye, X., Li, Y., & Zhou, Y. (2019). Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat are affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply. *Scientific Reports*, 9, 1-12.
25. Hachiya, T., & Sakakibara, H. (2017). Interactions between nitrate and ammonium in their uptake, allocation, assimilation, and in plants. *Journal of Experimental Botany*, 68(10), 2501-2512. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw449>
26. Homas, A.L., & Sodek, L. (2005). Development of the nodulated soybean plant after flooding of the root system with different sources of nitrogen. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3), 291-297.
27. Jones, J.B. Jr. (2001). Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
28. Kandlbinder, A., da Cruz, C., & Kaiser, W.M. (1997). Response of primary plant metabolism to the N-source. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 160, 269-274. <https://doi.org/10.1002/jpln.19971600221>
29. Kumari, R., Bedi, S., Dhatt, A.S., & Sethi, V.P. (2021). Effect of Proportion of NO_3^- and NH_4^+ in Nutrient Solution and Growing Seasons on Yield and Quality in Coriander. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 23, 891-902. [doi: 10.16807073.2021.23.4.14.3](https://doi.org/10.16807073.2021.23.4.14.3)
30. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350-382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)
31. Liu, M., Liang, F., Li, Q., Wang, G., Tian, Y., & Jia, H. (2023). Enhancement growth, water use efficiency and economic benefit for maize by drip irrigation in Northwest China. *Scientific Reports*, 13, 8392. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35611-9>
32. Luther, L.K., & Moler, R.L. (1988). Source and timing of spring topdress nitrogen on wheat in Idaho. *Agronomy Journal*, 80(4), 641-654. <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000040020x>
33. Mahlangu, R.I.S., Maboko, M.M., Sivakumar, D., Soundy, P., & Jifon, J. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, yield and quality response to nitrogen fertilization in a non-circulating hydroponic system. *Journal of Plant Nutrition*, 39, 1766-1775. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1187739>
34. Marschner, P. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
35. Mengel, K., & Kirkby, E.A. (2001). *Principles of Plant Nutrition*. 5th Ed. Boston: Kluwer Academic Publishers, U.S.A.
36. Mohammadnejad, A., Najafi, N., & Nishabouri, M.R. (2015). Effects of three types of organic fertilizers on the growth characteristics and water use efficiency of corn at different levels of soil compaction. *Journal of Soil*

- Management and Sustainable*, 5(2), 25–47.
37. Naderi, N., Ahmadi, M.Z., FazlOula, R., Shahnazari, A., & Khavari Khorasani, S. (2015). Evaluating the effect of different methods of deficit irrigation on yield, yield components and irrigation water productivity of forage maize. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 3(9), 522-530.
 38. Naik, P.K., Dhuri, R.B., Swain, B.K., & Singh, N.P. (2012). Nutrient changes with the growth of hydroponics fodder maize. *Indian Journal of Animal Nutrition*, 29(2), 161-163.
 39. Najafi, N., & Parsazadeh, M. (2010). Effect of nitrogen form and pH of nutrient solution on the shoot concentration of phosphorus, nitrate, and nitrogen of spinach plant in hydroponic culture. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 1(1), 41-55.
 40. Ningoji, S.N., Thimmegowda, M.N., Boraiah, B., Anand, M.R., Krishna Murthy, R., & Asha, N.N. (2020). Effect of seed rate and nutrition on water use efficiency and yield of hydroponics maize fodder. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(1), 71–79.
 41. Peng, W., Zhang-kui, W., Xi-chao, S., Xiao-huan, M.U., Huan, C., Fan-jun, C., Lixing, Y., & Guo-hua, M.I. (2018). Interaction effect of nitrogen form and planting density on plant growth and nutrient uptake in maize seedlings. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(5), 1120-1129. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61977-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61977-X)
 42. Poblaciones, M.A.J., Lopez-Bellido, L., & Rafel, J. (2009). Field estimation of technological bread-making quality in wheat in wheat. *Filed Crops Research*, 112(2-3), 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.03.011>
 43. Rabie, R.K., Arima, Y., & Kumazawa, K. (1980). Effect of combined nitrogen on the distribution of photosynthetic assimilates in nodulated soybean plant as revealed by ¹⁴C. *Soil Science and Plant Nutrition*, 26(1), 79-86. <https://doi.org/10.1080/00380768.1980.10433214>
 44. Roosta, H.R. (2010). The comparison of ammonium or nitrate-grown lettuce and spinach in a hydroponic system. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 1, 57-64. (In Persian with English abstract)
 45. Rothstein, D., & Cregg, B.M. (2005). Effects of nitrogen form on nutrient uptake and physiology of Fraser fir (*Abies fraseri*). *Forest Ecology and Management*, 219(1), 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.043>
 46. Russell, W., & Hallauure, A.R. (1988). *Corn in hybridization of crop plants*. Fehr WR and Hadley HH (Eds.). American Society of Agronomy, Madison. WI.
 47. Rudnick, D., Irmak, S., Ferguson, R., Shaver, T., Djaman, K., Slater, G., Bereuter, A., Ward, N., Francis, D., Schmer, M., Wienhold, B., & Van Donk, S. (2016). Economic return versus crop water productivity of maize for various nitrogen rates under full irrigation, limited irrigation, and rainfed Settings in South Central Nebraska. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 142(6), 04016017.
 48. Santamaría P., Elia A., Papa G., & Serio, F. (1998). Nitrate and ammonium nutrition in chicory and rocket salad plants. *Journal of Plant Nutrition*, 21, 1779-1789. <https://doi.org/10.1080/01904169809365523>
 49. Santos, J.H.S., Bona, F.D., & Monteiro, F.A. (2013). Growth and productive responses of tropical grass Panicum maximum to nitrate and ammonium supply. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 42(9), 622-628. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000900003>
 50. Sattelmacher, B., Klotz, F., & Marschner, H. (1990). Influence of the nitrogen level on root growth and morphology of two potato varieties differing in nitrogen acquisition. *Plant and Soil*, 123, 131-137.
 51. Savvas, D., Passam, H.C., Olympios, C., Nasi, E., Moustaka, E., Mantzos, N., & Barouchas, P. (2006). Effects of ammonium nitrogen on lettuce grown on pumice in a closed hydroponic system. *Journal of Horticultural Science*, 41(7), 1667-1673. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.41.7.1667>
 52. Shahoori S., Sepehr E., & Rahimi, A. (2018). Effect of different levels of nitrogen and different ratios of nitrate: ammonium on chemical composition and essential oil of denaii thyme in saline and non-saline conditions. *Applied Soil Research*, 7(2), 29-43.
 53. Smith, G.S., Johnston, C.M., & Cornforth, I.S. (1983). Comparison of nutrient solutions for growth of plants in sand culture. *New Phytologist*, 94(4), 537–548.
 54. Smith, R.L., Mills, H.A., Hoveland, C.S., & Hanna, W.W. (1990). Influence of influence of ammonium: nitrate ratios on the growth and nitrogen uptake of pearl millet. *Journal of Plant Nutrition*, 13(5), 541-553. <https://doi.org/10.1080/01904169009364098>
 55. Stewart, Z.P., Paparozic, L.T., Djanaguiramana, M., & Shapiro, C.A. (2019). Lipid-based Fe- and Zn-nanoformulation is more effective in alleviating Fe- and Zn-deficiency in maize. *Journal of Plant Nutrition* 42(14), 1693–1708. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1617314>
 56. Sultana, S., Ullah, J., Karim, F., & Asaduzzaman, J. (2009). Response of mungbean to integrated nitrogen and weed managements. *American-Eurasian Journal of Agronomy*, 2(2), 104-108.
 57. Wang, X.T., & Below, F.E. (1998). Accumulation and partitioning of mineral nutrients in wheat as influenced by nitrogen form. *Journal of Plant Nutrition*, 21(1), 49-61. <https://doi.org/10.1080/01904169809365382>
 58. Wen, X., Ikeda, H., & Oda, M. (2000). The absorption, translocation, and assimilation of urea nitrate or ammonium in tomato plant at different plant growth stages in hydroponic culture. *Scientia Horticulturae* 84(3-4), 275-283. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00108-9)
 59. Woodson, W.R., & Boodley J.W. (1982). Effects of nitrogen form and potassium concentration on growth,

- flowering and nitrogen utilization of greenhouse roses. *Journal of American Society for Horticultural Science*, 107(2), 275-278. <https://doi.org/10.21273/JASHS.107.2.275>
60. Zhang, Y., Lin X., Zhang, Y., Zheng, S.J., & Du, S. (2005). Effects of nitrogen levels and nitrate/ammonium ratios on oxalate concentrations of different forms in edible parts of spinach. *Journal of Plant Nutrition*, 28(11), 2011-2025. <https://doi.org/10.1080/01904160500311086>
61. Zhang, F.C., Kang, S.Z., Li, F.S., & Zhang, J.H., (2007). Growth and major nutrient concentrations in *Brassica campestris* supplied with different $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios. *Journal of Integrative Plant Biology*, 49(4), 455-462. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2007.00373.x>
62. Zheng, Y., Aijun, J., Tangyuan, N., Xud, J., Zengjia, L., & Gaoming, J. (2008). Potassium nitrate application alleviates sodium chloride stress in winter wheat cultivars differing in salt tolerance. *Journal of Plant Physiology*, 165(14), 1455-1465. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.01.001>
63. Zhu, Z.B., Yu, M.M., Chen, Y.H., Guo, Q.S., Zhang, L.X., Shi, H.Z., & Liu, L. (2014). Effects of ammonium to nitrate ratio on growth, nitrogen metabolism, photosynthetic efficiency and bioactive phytochemical production of *Prunella vulgaris*. *Pharmaceutical Biology*, 52(12), 1518-1525. <https://doi.org/10.3109/13880209.2014.902081>
64. Zhu, Y., Qi1, B., Hao, Y., Liu, H., Sun, G., Chen, R., & Song, S. (2021). Appropriate $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio triggers plant growth and nutrient uptake of flowering Chinese cabbage by optimizing the pH value of nutrient solution. *Frontiers in Plant Science*, 12(1-16). <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.656144>



Research Article

Vol. 37, No. 5, Dec.-Jan., 2023, p. 769-785

Projected Precipitation Extremes in Lake Urmia Basin under Climate Change

N. Ebrahimi¹, A. Zarrin^{2*}, A. Mofidi³, A.A. Dadashi-Roudbari⁴

1, 2, 3 and 4- M.Sc, Associate Professors and Postdoctoral Research Associate of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

Received: 10-04-2023
Revised: 08-07-2023
Accepted: 18-07-2023
Available Online: 24-07-2023

How to cite this article:

Ebrahimi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Projected precipitation extremes in Lake Urmia basin under climate change. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 769-785. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81891.1270>

Introduction

Climate change has led to changes in the frequency, intensity, duration, and spatial distribution of climate extremes. During the last decade (2011-2020), the average global temperature was 0.1 ± 1.1 °C higher than in the preindustrial era. Iran and especially the Urmia Lake basin is one of the most vulnerable areas to climate change. Urmia lake basin has received the special attention of policymakers and planners since it is the location of Lake Urmia, and it also holds nearly 7% of Iran's water resources. A huge program of dam construction and irrigation networks has been started in this basin in the northwest of Iran since the late 1960s. Despite the increasing attention to Lake Urmia since 1995, the water level of this lake has decreased. During the drought of 1990-2001, Lake Urmia experienced a decrease in its level without any recovery and is decreasing at an alarming rate. Therefore, it is necessary to project the future climate of the Urmia Lake basin and especially extreme precipitation based on the latest climate change models.

Materials and Methods

The CMIP6 models were used to investigate the future projection of extreme precipitation in the Lake Urmia basin. Considering the horizontal resolution, availability of daily data, and climate sensitivity, we selected five models including GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL. The horizontal resolution of all five models is 0.5°. The 25-year historical period (1990-2014) and the 25-year projection period for the near future (2026-2050) were chosen to analyze the extreme precipitation in the Urmia Lake Basin. The future projection was considered under three shared socioeconomic pathways (SSPs) scenarios. These scenarios include SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 scenarios. Mean bias error (MBE) and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) were computed to evaluate the individual models and the multi-model ensemble generated by Bayesian Model Average (BMA) method. To assess extreme precipitation, we used four indices including the Number of heavy precipitation days (R10mm), the number of very heavy precipitation days (R20mm), the Maximum 1-day total precipitation (Rx1day), and the Simple Daily Intensity Index (SDII).

Results and Discussion

The performance of five CMIP6 individual models and the multi-model ensemble in the Lake Urmia basin during the period of 1990 to 2014 was evaluated against eight ground stations. The investigation of the annual precipitation showed that this variable is underestimated in CMIP6 models in the basin averaged. The maximum and minimum bias values model was seen in Saqez station by -9.64 mm for the MRI-ESM2-0 and -0.43 mm for the UKESM1-0-LL, respectively. The highest average MBE in the Urmia Lake basin was respectively obtained



©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.2023.81891.1270>

for GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL models. Among the examined models, MPI-ESM1-2-HR has shown the highest efficiency among the examined individual models.

Variations in the number of heavy precipitation days during the historical period (1990-2014) have distinguished three main areas for the Lake Urmia basin. The main hotspot of heavy precipitations in the Urmia Lake basin is located in the southwest of Kurdistan province with a long-term average of 25.4 days. The next hotspots are the northwest and the northeast of the basin. In the historical period (1990-2014), the precipitation intensity index Rx1day experienced considerable variability. Based on CMIP6-MME, the value of the Rx1day index in the Urmia Lake basin is estimated between a minimum of 16.3 mm and a maximum of 63.3 mm. The maximum variation of this index is seen in the southern areas of the basin, especially on the border with Iraq.

Conclusion

Evaluation of individual CMIP6 models showed that these models underestimated precipitation in the Lake Urmia basin during the historical period (1990-2014). The CMIP6-MME has significantly improved precipitation estimation. The results of the investigation of days with heavy and very heavy precipitation showed that the two indices R10mm and R20mm are increasing in most areas of the Lake Urmia basin by the middle of the 21st century. Trend analysis showed that the days with heavy and very heavy precipitation will increase under different SSP scenarios in most areas of the Lake Urmia basin, especially in the northern and western regions. Also, days with heavy and very heavy precipitation will have a greater contribution than normal precipitation days in the future. It is expected that the intensity of precipitation will increase in the coming decades in the Lake Urmia basin, and this increase is more for the western and northern regions than for other regions of the basin. This result may potentially increase the flood risk in Lake Urmia.

Keywords: Climate change, CMIP6-MME, Extreme precipitation, Urmia Lake basin

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۶۹-۷۸۵

پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم

نسرین ابراهیمی^۱ - آذر زرین^{۲*} - عباس مفیدی^۳ - عباسعلی داداشی رودباری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

چکیده

سطح آب و وسعت دریاچه ارومیه در طی سال‌های اخیر نسبت به میانگین بلند مدت، کاهش چشمگیری داشته و ادامه حیات آن را با تهدید جدی مواجه کرده است. لذا بررسی دقیق وضعیت بارش حوضه و پیش‌نگری آن در آینده به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی اثرگذار در برنامه‌ریزی‌های آینده ضروری است. این پژوهش با هدف بررسی وضعیت بارش‌های فرین حوضه دریاچه ارومیه در آینده نزدیک انجام شده است. برای این منظور از داده‌های بارش پنج مدل از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) و آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی استفاده شده است. برای کاهش خطای مدل‌های منفرد، یک مدل همادی (CMIP6-MME) بر اساس روش میانگین‌گیری بیزین (BMA) از مدل‌های منفرد تولید شد. درستی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی CMIP6-MME با دو سنجه میانگین اربیبی خطا (MBE) و مجذور میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRMSE) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مدل‌های منفرد در برآورد بارش در حوضه دریاچه ارومیه کم‌برآوردی دارند. مدل همادی تولید شده مقدار دو سنجه MBE و NRMSE را در سطح حوضه به مقدار قابل توجهی کاهش داد که بر این اساس نسبت به مدل‌های منفرد از کارایی بالاتری برخوردار است. یافته‌ها بیانگر آن است که، حوضه دریاچه ارومیه روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین بیش‌تری را در آینده نزدیک تجربه خواهد نمود. شدت بارش روزانه در بخش‌های بزرگی از حوضه، بخصوص در مناطق غربی و شمالی، روند افزایشی خواهد داشت. بطور کلی ریسک ناشی از بارش‌های سیل‌آسا در حوضه دریاچه ارومیه در دوره آینده نزدیک بسیار محتمل است که لازم است برنامه‌های اقدام اقلیمی و پیش‌گیرانه همانند مدیریت ریسک اقلیمی در اولویت برنامه‌ریزی‌های مرتبط با این منطقه باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه دریاچه ارومیه، فرین‌های بارشی، مدل‌های CMIP6

مقدمه

فرین در سراسر جهان افزایش یابند (IPCC, 2021). تغییرات شدت بارش به نسبت بالایی به مقدار کل رطوبتی که جو می‌تواند در خود نگه دارد وابسته است. بنابراین انتظار می‌رود با توجه به رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (CC) شدت بارش با آهنگ حدوداً ۶ تا ۷ درصد به ازای هر درجه از گرمایش افزایش یابد (Trenberth, 2011). در چنین شرایطی با افزایش فرین‌های بارشی چرخه آب جهانی و منطقه‌ای نیز تغییر خواهد کرد (Liu et al., 2015). به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین انواع مخاطرات طبیعی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک، فرین‌های

تغییر اقلیم منجر به تغییر در فراوانی، شدت، مدت و گستره مکانی فرین‌های اقلیمی شده است (IPCC, 2013). طی دهه گذشته (۲۰۲۰-۲۰۱۱) میانگین دمای جهانی 1 ± 0.1 درجه سلسیوس نسبت به دوره قبل از انقلاب صنعتی بالاتر بوده است (WMO, 2020). افزایش دمای جهانی باعث افزایش تبخیر از سطح و محتوای آب موجود در جو شده است. در پاسخ به گرمایش جهانی، انتظار می‌رود که بارش‌های

۱، ۲، ۳ و ۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیاران و پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: zarrin@um.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

بارشی تأثیر زیادی بر زندگی مردم، زیرساخت‌های شهری، کشاورزی و محیط‌زیست دارند (IPCC, 2014). بنابراین پیش‌نگری تغییرات بارش‌های فرین و تأثیر آن بر جامعه، تحت گرمایش جهانی بسیار مهم و ضروری است.

تغییر اقلیم دیگر موضوعی مربوط به آینده نیست، بلکه در حال حاضر بر بسیاری از مناطق جهان تأثیر گذاشته است. ایران و به‌ویژه حوضه دریاچه ارومیه به دلیل ظرفیت سازگاری محدود یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق از تغییر اقلیم هستند. حوضه دریاچه ارومیه از آنجا که نزدیک به ۷ درصد از منابع آب ایران را در اختیار دارد مورد توجه ویژه سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است. برنامه عظیمی از شبکه‌های سد سازی و آبیاری در این حوضه مهم در شمال‌غرب ایران از اواخر دهه ۱۹۶۰ میلادی (نیمه دوم دهه ۴۰ خورشیدی) آغاز شده است. با وجود توجه روزافزون نسبت به دریاچه ارومیه از سال ۱۹۹۵ (۱۳۷۳ خ)، سطح آب این دریاچه کاهش یافته است. بنابراین، برنامه‌های احیای دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ در دستور کار قرار گرفته است. دریاچه ارومیه از زمان خشکسالی ۱۹۹۰-۲۰۰۱ بدون هیچ بهبودی کاهش سطح خود را تجربه کرده و با سرعت نگران‌کننده‌ای در حال کاهش است (Hasemi, 2011). حتی با احیای مجدد دریاچه در سال‌های گذشته، طی سال‌های اخیر مجدد سطح خود را از دست داده است. لذا ضرورت دارد وضعیت اقلیم آینده حوضه دریاچه ارومیه و بخصوص بارش‌های فرین بر اساس جدیدترین مدل‌های تغییر اقلیم مورد مطالعه دقیق قرار گیرد تا در گام بعدی برای تدوین برنامه اقدام اقلیمی برای این حوضه استراتژیک در کشور اطلاعات لازم فراهم گردد. بر این اساس مسئله اصلی تحقیق حاضر شناسایی وضعیت بارش‌های فرین به عنوان یک ریسک جدی ناشی از تغییر اقلیم در حوضه دریاچه ارومیه به عنوان یکی از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، کشاورزی و صنعتی ایران است.

ارزیابی پیامدهای تغییر اقلیم در آینده نیازمند فراهم نمودن داده‌های اقلیمی با تفکیک افقی بالا است تا امکان بررسی شرایط پیش رو میسر گردد. مدل‌های گردش کلی (GCMs) برای درک اقلیم جهانی و ارزیابی متغیرهای اقلیمی یک ابزار کلیدی هستند (IPCC, 2013). با این حال، GCMها به دلیل فرمول‌بندی ریاضی، تفکیک افقی، شرایط آغازین و واداشتها عدم قطعیت و اربیی زیادی مواجه هستند که کاربرد آن‌ها را در مقیاس منطقه‌ای و محلی محدود می‌کند. برای رفع محدودیت‌های گفته شده از GCMها، تولید چند مدلی همادی و تصحیح اربیی که در برخی منابع از آن‌ها با عنوان مقیاس‌کاهی آماری نیز نام‌برده می‌شود (Coulibaly et al., 2005)، راهکاری مناسب برای بررسی پیامدهای تغییر اقلیم در مقیاس محلی و منطقه‌ای است.

بارش‌های فرین یکی از پیامدهای آشکار تغییر اقلیم است. بطوری که در سال‌های اخیر باعث خسارات قابل توجهی در مناطق مختلف جهان شده است. همین امر باعث شده است تا این جنبه از تغییر اقلیم

به‌شکل جدی مورد بررسی پژوهشگران مختلف قرار گیرد. مطالعات بی شماری در سطح جهانی (Seneviratne & Hauser, 2020; Deng et al., 2021; Ryan et al., 2022)؛ منطقه‌ای (Thackeray et al., 2022) و حتی محلی (Nie & Sun, 2022) روند افزایشی در خصوصیات بارش‌های فرین را گزارش کرده‌اند. بخش قابل توجهی از مطالعاتی که فرین‌های بارشی را مورد بررسی قرار داده‌اند پیش‌نگری آن را با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP3، CMIP5 و CMIP6 انجام داده‌اند. این مطالعات عموماً از دو منظر به بررسی فرین‌های بارشی پرداخته‌اند. دسته اول به درستی سنجی مدل‌های CMIP برای برآورد فرین‌های بارشی پرداخته‌اند (Li et al., 2022; Faye & Akinsanola, 2022; Pimonsree et al., 2023). نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 از کارایی بالایی برای برآورد بارش و فرین‌های بارشی در اقلیم‌های مختلف برخوردار هستند. دسته دوم نیز صرفاً تغییرات و بی‌هنجاری‌های بارش و فرین‌های بارشی را در چشم انداز آینده مد نظر قرار داده‌اند (Meresa et al., 2022; Xu et al., 2022). نتایج این مطالعات تغییر الگوی بارش‌ها و فرین‌های بارشی را همانطور که در گزارش ششم (AR6) هیات بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC, 2021) آمده است در سطح جهانی تایید کرده‌اند.

ایران در سال‌های اخیر با افزایش بی‌سابقه دما، افزایش خشکسالی، افزایش بارش‌های سیل‌آسا و امواج گرمایی مواجهه بوده است. از جمله این مخاطرات می‌توان به سیل فروردین ۱۳۹۹، خشکسالی بی‌سابقه ۱۴۰۰، بارش‌های سیل‌آسای تابستان ۱۴۰۱، امواج گرمایی بی‌سابقه تابستان در چند سال اخیر و بسیاری دیگر از این موارد اشاره کرد که همگی نشان دهنده افزایش قابل توجه فرین‌های اقلیمی در ایران هستند. همانند مطالعات جهانی، فرین‌های بارشی در ایران نیز در پژوهش‌های مختلفی مورد توجه قرار گرفته است. این مطالعات را بسته به نوع داده و روش، می‌توان در دسته‌های مختلفی قرار داد. تعدادی از مطالعات از داده‌های ایستگاهی برای بررسی فرین‌های بارشی استفاده نموده‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از آن است که، شدت بارش‌ها در ایران طی دهه‌های گذشته روند افزایشی داشته است (Alavinia & Zarei, 2021; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022a). دسته دیگری از مطالعات، فرین‌های بارشی را با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل مورد بررسی قرار دادند. این مطالعات سعی نمودند تغییرات زمانی-مکانی بارش‌های فرین در ایران را بررسی نمایند (Malaekheh et al., 2022; Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2022b). گروه دیگری از مطالعات چشم انداز آینده فرین‌های بارشی در ایران را با استفاده از مدل‌های CMIP5 (Katiraie-Boroujerdy et al., 2019) و CMIP6 (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021; Yazdandoost et al., 2021; Zarrin et al., 2022a; Chamanehfar et al., 2022; Modaresi & Araghi, 2023) مورد

منطقه مورد مطالعه

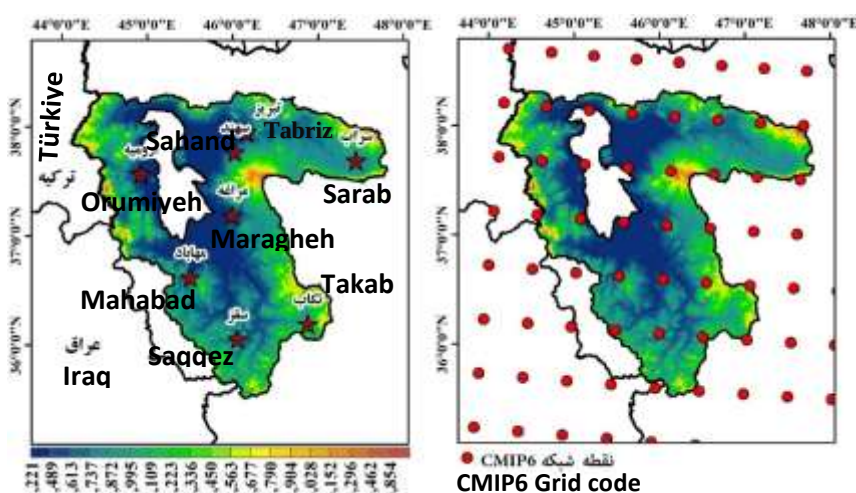
این مطالعه بر روی شمال غرب ایران با تمرکز بر حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است (شکل ۱). حوضه دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین مراکز جمعیتی شمال غرب ایران است. اقلیم نیمه خشک و کوهستانی با ارتفاع بین ۱۲۲۱ متر تا ۳۸۵۴ متر از ویژگی‌های جغرافیایی این حوضه است. عمده فعالیت‌های این حوضه بر کشاورزی متمرکز است که با خشک شدن دریاچه ارومیه طی سال‌های گذشته مشکلات بسیاری را از نظر زیست محیطی، مدیریت منابع آب و کشاورزی به همراه داشته است. دوازده رودخانه آبی چای، آذرشهر چای، صوفی چای، زرینه رود، سیمینه رود، مهاباد چای، گدار چای، بار اندوز چای، شهر چای، نازلو چای، زولا چای و سینیخ چای در این حوضه به دریاچه ارومیه می‌ریزند.

داده‌های مشاهداتی

داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی همدید تبریز، ارومیه، سهند، سراب، مراغه، مهاباد، تکاب و سقز که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است برای درستی سنجی متغیر بارش مدل‌های CMIP6 طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) مورد استفاده قرار گرفته است. مبنای انتخاب این هشت ایستگاه بکارگیری حداکثری ایستگاه‌ها بر اساس پراکنش جغرافیایی مناسب آن‌ها در تمامی مناطق حوضه و طول دوره آماری با کمترین داده مفقود می‌باشد.

توجه قرار دادند. نتایج این مطالعات نشان داد که این مدل‌ها کارایی بالایی در برآورد بارش و فرین‌های بارشی در ایران دارند. همچنین یافته‌های پیشین نشان داد که شدت بارش و روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین در آینده روند افزایشی خواهد داشت. پژوهش‌های انجام شده در سطح جهانی و ایران حاکی از آن است که تغییر اقلیم یک مسئله جدی است و اثرات و پیامدهای این پدیده، بیش از همه در فرین‌های اقلیمی نمود می‌یابد. با این حال، به رغم مطالعات متعددی که در ایران بر روی فرین‌های اقلیمی به انجام رسیده است، اما به طور مشخص کمتر مطالعه‌ای بر روی حوضه دریاچه ارومیه انجام شده است. لذا این مطالعه از چندین جنبه حائز اهمیت خواهد بود. نخست این که، کارایی مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم موسوم به CMIP6 در حوضه دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. علاوه بر آن، نتایج بکارگیری مدل‌ها به شکل منفرد و همادی در سطح حوضه مورد بررسی قرار خواهد گرفت و چشم انداز آینده بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه بررسی خواهد شد. نتایج حاصل از این تحقیق برای برنامه‌ریزی‌های آتی این حوضه مفید واقع خواهد باشد. چنانکه، پیش‌نگری تغییرات بارش‌های فرین به عنوان یکی از جنبه‌های اثرگذار در شرایط فعلی دریاچه ارومیه، توسط سیاستگذاران و مدیران پروژه احیای دریاچه ارومیه مطرح گردیده است. بدین ترتیب، دستاوردهای این تحقیق برای برنامه ریزی و انجام اقدامات فوری می‌تواند مد نظر مدیران و سیاستگذاران قرار گیرد.

مواد و روش‌ها



شکل ۱- موقعیت نقطه شبکه‌های ۰/۵ درجه قوسی CMIP6 (سمت راست) و مقایسه آن با ایستگاه‌های هواشناسی همدید در حوضه دریاچه ارومیه (سمت چپ)

توپوگرافی حوضه با رنگ بر روی نقشه‌ها نشان داده است.

Figure 1- CMIP6 grid points (right side) and its comparison with synoptic stations in Lake Urmia basin (left side)
The topography of the basin is shown in color on the figures

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 (مدل‌های منتخب به شکل برجسته مشخص شده‌اند)

Table 1- Characteristics of CMIP6 models (selected models have been highlighted)

Num شماره	Model مدل	HR	ECS	Num شماره	Model مدل	HR	ECS
1	INM-CM5-0	100	1.9	11	ACCESS-ESM1-5	250	3.9
2	CAMS-CSM1-0	100	2.3	12	CNRM-CM6-1-HR	50	4.3
3	MIROC6	250	2.6	13	KACE-1-0-G	250	4.5
4	GFDL-ESM4	100	2.6	14	IPSL-CM6A-LR	250	4.6
5	BCC-CSM2-MR	100	3.0	15	CESM2-WACCM	250	4.8
6	FGOALS-F3-L	100	3.0	16	CNRM-CM6-1	250	4.8
7	MPI-ESM1-2-HR	100	3.0	17	CESM2	100	5.2
8	EC-Earth3-CC	100	3.1	18	UKESM1-0-LL	250	5.3
9	AWI-CM-1-1-MR	100	3.2	19	HadGEM3-GC31-LL	250	5.6
10	MRI-ESM2-0	100	3.2	20	CanESM5	500	5.6

حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) بر حسب درجه سلسیوس، تفکیک افقی (HR) بر حسب کیلومتر

مدل‌های CMIP6

روزانه پنج مدل برای دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۴) و دوره پیش‌نگری SSP5- و SSP3-7.0، SSP1-2.6، تحت سه سناریو (۲۰۲۶-۲۰۵۰) انجام و یک مدل همدادی از مدل‌های منتخب پنج‌گانه برای بررسی فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه تولید شده است. مدل همدادی تولید شده اگرچه خطای مدل‌های منفرد را تا سطح قابل توجهی کاهش می‌دهد اما این به معنای یقینی بودن نتایج به‌دست آمده نیست.

درستی سنجی مدل‌های منتخب CMIP6

درستی برون‌داد بارش پنج مدل CMIP6 و مدل همدادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ بررسی شد. از داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی هم‌دید (شکل ۱) و دو سنجه آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای بهنجار شده (NRMSE) و میانگین اریبی خطا (MBE) جهت درستی سنجی استفاده شد.

سنجه MBE جهت بررسی اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای (ایستگاه‌های هم‌دید) و مدل استفاده شده و بیانگر انحراف از میانگین می‌باشد. این مقدار می‌تواند مثبت و منفی باشد که نشان دهنده کم برآوردی و بیش‌برآوردی در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌های مشاهداتی است. سنجه ریشه دوم میانگین مربعات خطای بهنجار شده یکی از سنجه‌هایی است که معمولاً از آن برای بررسی کارایی پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (Sorooshian et al., 1993).

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{N} \quad (1)$$

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

در روابط فوق، P_i مقدار برآورد شده بارش CMIP6، O_i مقدار مشاهده‌ای بارش بر اساس داده‌های ایستگاهی، $\bar{O}$ میانگین مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها است.

برای بررسی چشم انداز آینده وضعیت بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه از مدل‌های CMIP6 استفاده شد. با در نظر گرفتن شروط تفکیک افقی مناسب، در دسترس بودن داده‌های روزانه و حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2023) پنج مدل شامل MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4، UKESM1-0-LL و MRI-ESM2-0 انتخاب شدند (جدول ۱). سپس با استفاده از روش درون یابی دو خطی (Bilinear Interpolation) تفکیک افقی مدل‌ها ۰/۵ درجه قوسی شده و اریبی آن‌ها با روش تصحیح مرتبه متوالی (SEC) تصحیح شد (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021). یک دوره تاریخی ۲۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و یک دوره پیش‌نگری ۲۵ ساله برای آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) برای تحلیل بارش و فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. دوره پیش‌نگری آینده تحت سه سناریو خطاسیر مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP) در نظر گرفته شد (Eyring et al., 2016). این سناریوها عبارتند از: سناریوی توسعه پایدار (SSP1-2.6)، سناریوی رقابت‌های منطقه‌ای: بدبینانه (SSP3-7.0) و سناریوی توسعه سوخت-های فسیلی: خیلی بدبینانه (SSP5-8.5).

مدل میانگین‌گیری بیزین (BMA)

مدل میانگین‌گیری بیزین (Bayesian Model Average (BMA)) به‌عنوان یک روش آماری پیشنهادی برای واسنجی مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی/نگری‌های همدادی استفاده می‌شود. وزن BMA برابر با احتمال پسین (Posterior Probability) مدل‌های تولید کننده پیش‌بینی/نگری است که سهم نسبی هر مدل را منعکس می‌کند (Raftery et al., 2005). خروجی BMA یک تابع توزیع احتمال (PDF) است. وزن BMA نشان دهنده مشارکت نسبی مدل‌ها است. در این مطالعه کلیه فرآیندهای مربوط به BMA برای داده‌های

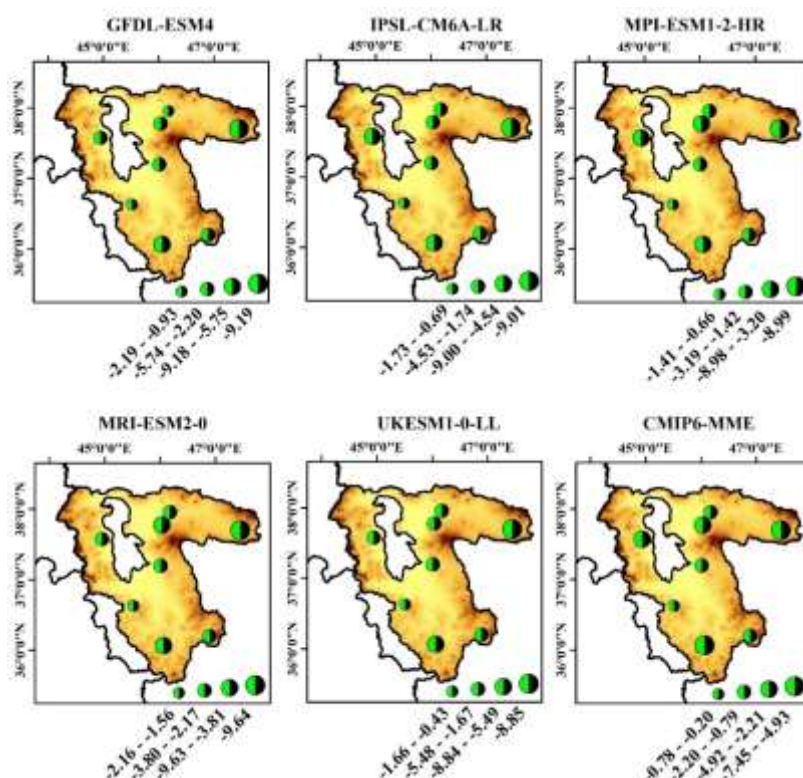
فرین‌های بارشی

نتایج و بحث

درستی سنجی بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده

نتایج بررسی مدل‌های CMIP6 نشان داد که این مدل‌ها در کل حوضه برای بارش سالانه کم‌برآوردی دارند. بیشینه مقدار اریبی با $-۹/۶۴$ میلی‌متر برای مدل MRI-ESM2-0 و کمینه آن با مقدار $-۰/۴۳$ میلی‌متر برای مدل UKESM1-0-LL در ایستگاه سقز دیده شد. متوسط سنجه MBE در حوضه دریاچه ارومیه براساس شکل ۲ به‌ترتیب برای مدل‌های GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL از بیشترین به کمترین به‌دست آمده است. در بین مدل‌های مورد بررسی MPI-ESM1-2-HR بالاترین کارایی را بین مدل‌های منفرد مورد بررسی نشان داده است. اریبی سیستماتیک بارش در حوضه دریاچه توسط مدل‌های CMIP6 ممکن است به عوامل متعددی همانند ارائه ضعیف همرفت کومولوس، برهمکنش بیوسفر-جو، رطوبت خاک و فرایندهای سطح زمین مرتبط باشد (Deng et al., 2021; Faye & Akinsanola, 2022; Li et al., 2022).

فرین‌های بارشی را می‌توان با روش‌های مختلفی محاسبه و بررسی کرد. کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI) که توسط کمیسیون مشترک سازمان جهانی هواشناسی (WMO) و برنامه تحقیقات اقلیم جهانی (WCRP) سازماندهی شده، شاخص‌های فرین مختلفی را توسعه داده است (Zhang et al., 2011). این شاخص‌ها که بر اساس داده‌های روزانه هستند، معمولاً فرین‌ها را به‌شکل سالانه توصیف می‌کنند. از شاخص‌های ETCCDI به‌طور گسترده استفاده شده و کاربرد آن در مطالعات تغییر اقلیم در سطح جهانی تایید شده است (Alexander & Arblaster, 2017). در این پژوهش نیز از شاخص‌های ETCCDI استفاده شده است. شاخص‌های مورد استفاده شده برای فرین‌های بارشی حوضه دریاچه ارومیه، شامل آن دسته از شاخص‌هایی می‌شود که شدت بارش را بررسی می‌کنند. بر این اساس چهار شاخص فرین بارش شامل روزهای همراه با بارش سنگین ($R10mm$)، روزهای همراه با بارش خیلی سنگین ($R20mm$)، بیشینه بارش یک روزه ($Rx1day$) و شدت بارش روزانه ($SDII$) بررسی شده است.

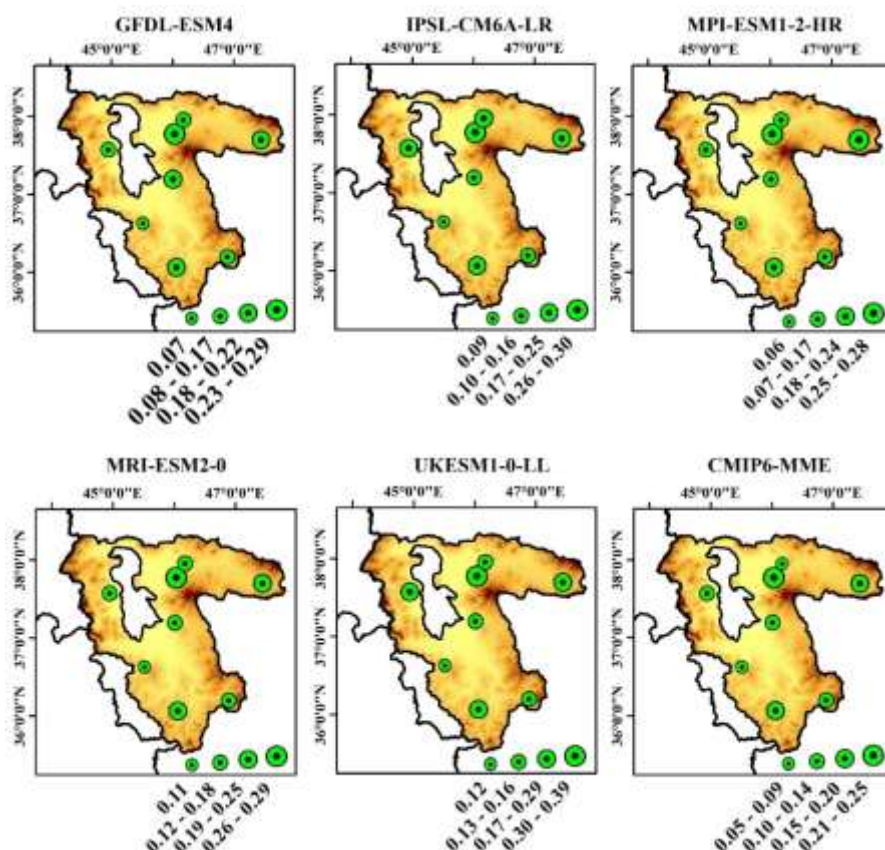


شکل ۲- میانگین اریبی بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه

Figure 2- Average precipitation bias of individual CMIP6 models and multi-model ensemble model generated by BMA method in Lake Urmia basin

درستی‌سنجی مدل همدادی تولید شده با روش BMA نشان داد که این مدل نسبت به مدل‌های منفرد مقدار آریبی را به شکل قابل توجهی در حوضه دریاچه ارومیه کاهش داده است. همانطور که در شکل ۲ هم مشاهده می‌شود مقدار آریبی مدل CMIP6-MME حداقل ۰/۲۰- تا حداکثر ۴/۹۳- میلی‌متر در تغییر است. افزایش کارایی مدل همدادی نسبت به مدل‌های منفرد پیش‌تر توسط زرین و داداشی رودباری (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021) و زرین و همکاران (Zarrin et al., 2022a) را تأیید می‌کند. لذا کاربست مدل‌های منفرد در پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم می‌تواند خطا را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد و بکارگیری مدل همدادی راهکاری مناسب برای کاهش خطای مدل‌ها است. از سوی دیگر بررسی سنجه‌های آماری نشان داد که کارایی مدل‌ها بسته به منطقه جغرافیایی متفاوت است. لذا مدل واحدی وجود ندارد که کاراترین مدل برای نمایش ویژگی‌های کامل یک منطقه جغرافیایی یا حتی یک حوضه آبخیز همانند حوضه دریاچه ارومیه باشد.

سنجه NRMSE نیز نتایج مشابهی را با MBE نشان داده است. بطوری که در هر هشت ایستگاه نماینده مورد بررسی، سراب بالاترین مقدار NRMSE را برای پنج مدل مورد بررسی نشان داده است. مقدار سنجه NRMSE بین حداقل ۰/۰۶ در ایستگاه مهاباد برای مدل MPI-ESM1-2-HR تا حداکثر ۰/۳۹ در ایستگاه سهند برای مدل



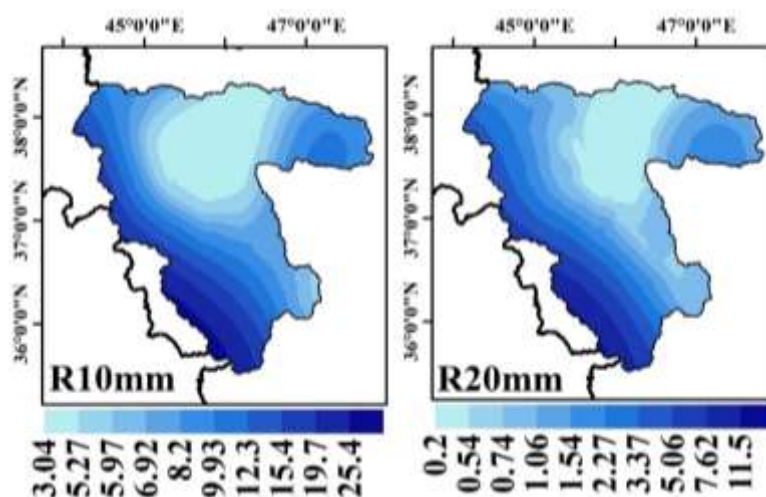
شکل ۳- مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) بارش مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همدادی تولید شده با روش BMA در حوضه دریاچه ارومیه

Figure 3- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) of precipitation of CMIP6 individual models and multi-model ensemble model generated by BMA method in Lake Urmia basin

پیش‌نگری تغییرات آینده روزهای همراه با بارش سنگین در حوضه دریاچه ارومیه نشان داده است که روزهای بارشی با این آستانه در غالب مناطق حوضه دریاچه ارومیه افزایش خواهد داشت. پیش‌نگری متوسط روزهای همراه با بارش سنگین برای دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت سناریوهای سه‌گانه SSP نشان داد بارش‌های سنگین نسبت به دوره تاریخی افزایش خواهند داشت. بر این اساس، روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریو SSP1-2.6 افزایش ۲/۲ روزه، تحت سناریو SSP3-7.0 افزایش ۱/۸ روزه و تحت سناریو SSP5-8.5 افزایش حداکثری ۴ روزه را تجربه خواهد کرد. به جهت پراکنش فضایی در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تغییرات چشمگیری را نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) شاهد نخواهیم بود (شکل ۵).

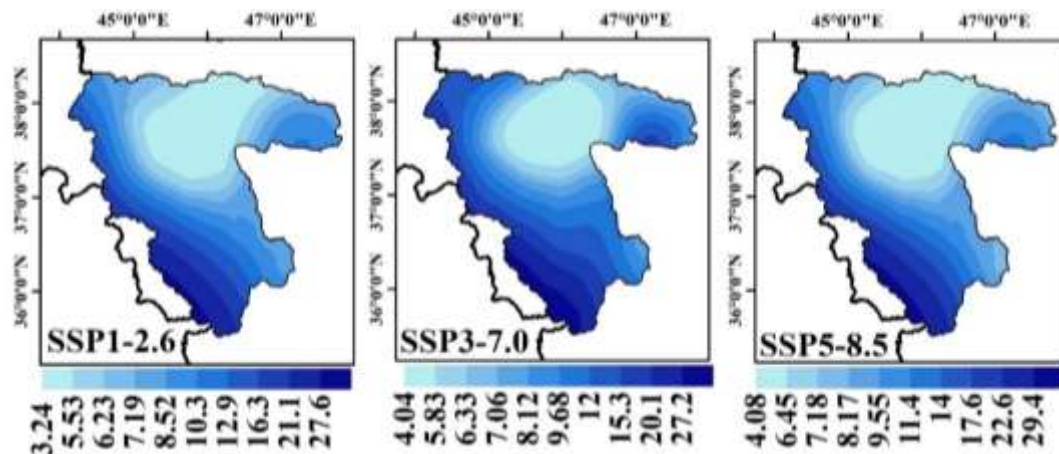
همانطور که گفته شد روزهای همراه با بارش سنگین افزایشی خواهد بود و این مقدار افزایشی یک تهدید جدی برای ریسک سیلاب و مدیریت آب‌های سطحی محسوب می‌شود. همچنین علاوه بر افزایش بارش‌های سنگین به جهت مکانی نیز بر وسعت مناطقی با بارش‌های سنگین بخصوص در مناطق غربی و جنوب غربی حوضه دریاچه ارومیه افزوده خواهد شد. رخداد روزهای همراه با بارش سنگین از جمله شایع ترین مخاطرات اقلیمی و هیدرولوژیکی در ایران است (Zarrin et al., 2022a). بنابراین، افزایش R10mm و همچنین R20mm نشان می‌دهد که سیاست‌های سازگاری و تعدیل باید برای کاهش اثرات احتمالی مرتبط با بارش‌های سیل‌آسا در حوضه دریاچه ارومیه مورد توجه قرار گیرد.

تغییرات روزهای همراه با بارش سنگین طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) سه پهنه اصلی را برای حوضه دریاچه ارومیه آشکار ساخته است. کانون اصلی بارش‌های سنگین حوضه دریاچه ارومیه با متوسط بلند مدت ۲۵/۴ روز در جنوب غربی حوضه در استان کردستان قرار دارد. پس از آن مرز شمال غربی و گوشه شمال شرقی در اطراف سیلان، بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین را تجربه می‌نمایند. با این حال در بخش‌های بزرگی از حوضه متوسط بلندمدت روزهای بارش سنگین کمتر از ۱۰ روز در سال است. حداقل روزهای همراه با بارش سنگین با ۳ روز در سال در مناطق شمالی حوضه مشاهده می‌شود. بررسی بارش‌های خیلی سنگین نشان می‌دهد که در کل حوضه، فراوانی وقوع بارش خیلی سنگین بین ۰/۲ تا ۱۱/۵ روز در سال متغیر است (شکل ۴). حدود ۹۰ درصد از مساحت کل حوضه، بارش خیلی سنگین کمتر از ۵ روز در سال را تجربه می‌کند. همچنین، مناطق مرکزی، شمالی و شرقی حوضه که در حدود نیمی از وسعت حوضه دریاچه ارومیه را شامل می‌گردند، غالباً فراوانی بارش خیلی سنگین کمتر از ۱ روز در سال را تجربه می‌کنند. کانون اصلی بارش‌های خیلی سنگین نیز همانند بارش‌های سنگین در مناطق غربی و جنوب غربی حوضه است. در تحلیل سازوکار وقوع بارش‌های سنگین شمال غرب کشور یافته‌های برخی تحقیقات اخیر بیانگر آن است که عمیق شدن ناوه ترازهای میانی همراه با انتقال رطوبت از عرض‌های جنوبی نقش قابل توجهی در رخداد این بارش‌ها دارد. در فصل بهار وقوع این دسته از بارش‌ها با شکل‌گیری مکرر سامانه بندال در ترازهای میانی و ردسپهر بر روی خاورمیانه همراه است (Khoshiddoust et al., 2016).



شکل ۴- روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) و بارش خیلی سنگین (R20mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰)

Figure 4- Number of heavy precipitation days (R10mm) and very heavy precipitation days (R20mm) in Urmia Lake Basin based on CMIP6-MME during the historical period (1990-2014)



شکل ۵- روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برآورد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 5- Number of heavy precipitation days (R10mm) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

با بارش خیلی سنگین در حوضه دریاچه ارومیه در آینده افزایشی خواهد بود. بیشینه تغییرات افزایشی نیز معطوف به دو منطقه جنوب غربی و شمال غربی حوضه خواهد بود. مقدار افزایش روزهای همراه با بارش خیلی سنگین برای حوضه تحت سناریو SSP3-7.0 بیش تر از SSP5-8.5 است و از آنجاییکه حوضه دریاچه ارومیه یکی از مهم ترین حوضه های ایران به جهت وضعیت بحرانی فعلی دریاچه ارومیه است این افزایش در تعداد روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین یک تهدید جدی برای مدیریت آب های ورودی و خروجی این دریاچه محسوب می شود. در همین راستا طبری (Tabari, 2020) نشان داد رخدادهای فرین بارش و سیل در تمامی مناطق اقلیمی جهان با افزایش آب در دسترس جو در نتیجه گرمایش جهانی افزایش می یابد.

کمینه افزایش روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در مناطق شمالی تا مرکزی دیده می شود (شکل ۷). کانون اصلی روزهای همراه با بارش خیلی سنگین حوضه دریاچه ارومیه منطقه جنوب غربی این حوضه است. زیاد بودن روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در این منطقه با توجه به فاصله از منابع رطوبتی شاید کمی دور از انتظار باشد اما باید توجه داشت که در مقیاس محلی، تأثیر گرمایش جهانی بر فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین بستگی به این دارد که کدام الگوها در مقیاس همید باعث بارش سنگین در مناطق مختلف جغرافیایی می شوند.

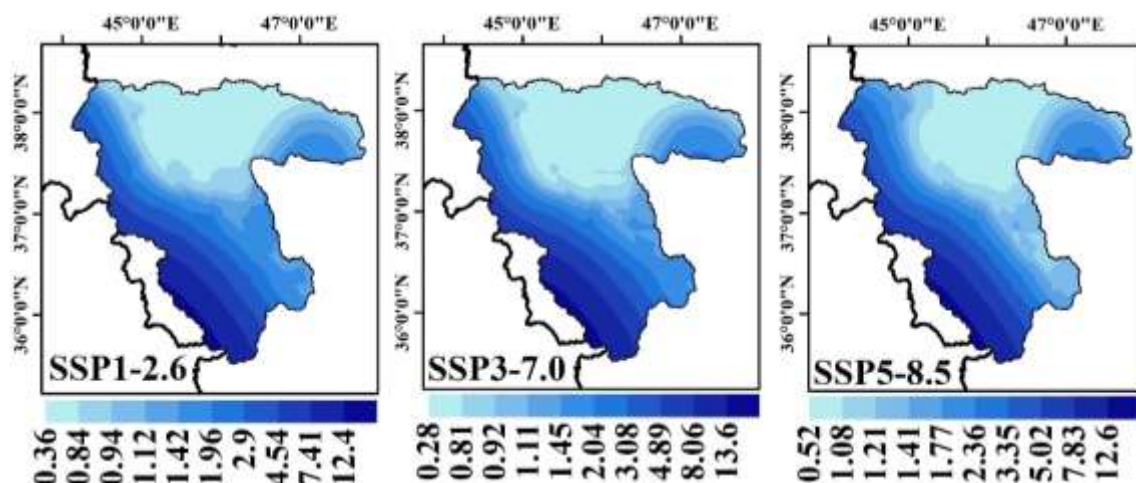
بررسی میانگین دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) دو شاخص شدت بارش RX1day و SDII براساس CMIP6-MME نشان می دهد که مدل همدادی CMIP6 مقدار شاخص RX1day را در حوضه دریاچه ارومیه بین حداقل ۱۶/۳ میلی متر تا حداکثر ۶۳/۳ میلی متر برآورد کرده است. بیشینه تغییرات این شاخص در مناطق جنوبی حوضه بخصوص در مرز با کشور عراق است. پراکندگی فضایی شاخص SDII نیز مشابه

فراوانی وقوع چنین بارش هایی در دهه های اخیر در بسیاری از مناطق نیمکره شمالی افزایش یافته و خسارات گسترده ای را بر جای گذاشته است. در تبیین علت افزایش وقوع این بارش ها و ارتباط آن با گرمایش جهانی و تغییر اقلیم مطالعات متعددی انجام شده است. براساس این مطالعات، واداشتهای بسیاری در افزایش بارش های سنگین و خیلی سنگین نقش دارند که یکی از آنها می تواند تغییر فعالیت امواج راسی در نیمکره شمالی باشد. توضیح بیشتر آن که با گرمایش جهانی ما شاهد پدیده ای موسوم به «تقویت شمالگان» در نیمکره شمالی بوده ایم. بروز این پدیده حرکت کندتر امواج در تراز بالا را سبب می شود که به نوبه خود باعث می شود که سامانه های مقیاس همید در عرض های جغرافیایی میانی ماندگارتر شوند. یافته ها حاکی از آن است که این تغییرات با افزایش فراوانی و شدت رخدادهای فرین اقلیمی مانند خشکسالی، سیل، دوره های سرد و امواج گرمایی همراه است (Francis & Vavrus, 2012). اهمیت امواج راسی در عرض های میانی در شکل گیری بارش های فرین در مناطق مختلفی از جمله آسیای مرکزی نشان داده شده است (Xu et al., 2022). با توجه به اینکه این امواج را می توان ۱۰ روز قبل از بارش ها شناسایی کرد، آشفستگی شناخته شده بر فراز اقیانوس اطلس شمالی ممکن است به عنوان یک پیش نشانگر بالقوه برای بارش های فرین در شمال غربی ایران و به طور مشخص حوضه دریاچه ارومیه عمل کند.

تعداد روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در ایران طی دهه های آتی در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی خواهد بود. تغییرات درون سالی تعداد روزهای بارش خیلی سنگین در آینده بین ۰/۲۸ تا ۱۳/۶۰ روز در نوسان است. این در حالی است که در دوره تاریخی روزهای همراه با بارش خیلی سنگین دامنه بین ۰/۲ تا ۱۱/۵ روزه را نشان دادند. همانطور که پیداست هم در مقدار کمینه و هم برای مقدار بیشینه روزهای همراه

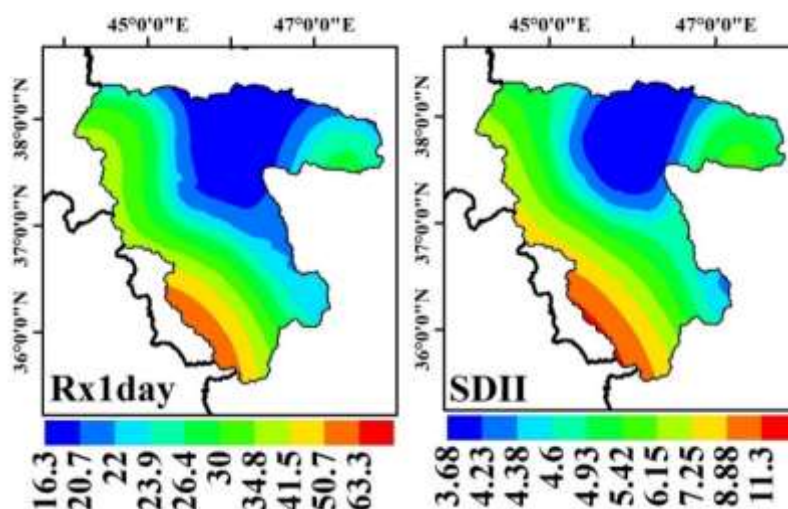
بیشینه بارش یک روزه و شدت بارش روزانه برای آینده نزدیک تحت سناریوهای سه گانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد دو شاخص فرین بارش SDII و Rx1day طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) افزایش خواهند داشت. مقدار افزایش شاخص SDII به نسبت شاخص Rx1day بیش‌تر است و همچنین در سناریو خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) از افزایش بیش‌تری برخوردار است.

با RX1day در حوضه دریاچه ارومیه است (شکل ۷). شدت بارش سالانه بر اساس این شاخص در این منطقه ۱۱/۳ میلی‌متر در روز است. کمینه هر دو شاخص مرتبط با شدت بارش یعنی RX1day و SDII در مناطق مرکزی و بخش‌های شمال حوضه قرار دارد. البته قابل ذکر است که مناطق شمال‌غربی و شمال‌شرقی حوضه کمینه شدت بارش روزانه و بیشینه بارش یک روزه را ندارند. تغییرات شدت بارش در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده مقادیر



شکل ۶- روزهای همراه با بارش خیلی سنگین (R20mm) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 6- heavy precipitation days (R20mm) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

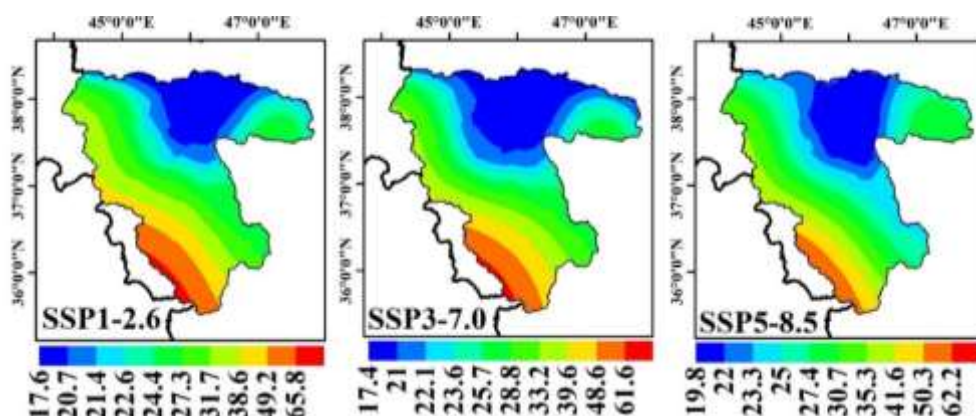


شکل ۷- بیشینه بارش یک روزه (Rx1day) و شدت بارش روزانه (SDII) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴)

Figure 7- Max 1-day precipitation (Rx1day) and Simple daily precipitation index (SDII) in Urmia Lake Basin based on CMIP6-MME during the historical period (1990-2014)

داشت. تشدید بارش‌های فرین به گرمایش جهانی نسبت داده می‌شود و پژوهش‌های مختلفی همانطور که برای حوضه دریاچه ارومیه نیز نشان داده شد، پیش‌بینی کرده‌اند شدت بارش در آینده در سطح جهانی افزایش می‌یابد (Zeder & Fischer, 2020). روند افزایشی شدت بارش تحت شرایط تغییر اقلیم همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد به دلیل ظرفیت رطوبتی بیشتر در جو گرم‌تر است. بطور کلی شدت بارش روزانه تقریباً از رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (CC) پیروی می‌کند که با افزایش هر یک درجه سلسیوس افزایش دما شدت بارش تقریباً ۷٪ افزایش می‌یابد (Trenberth, 2011; Fowler et al., 2020). با توجه به این نکته که بارش‌های فرین در شمال غرب کشور عمدتاً در فصل بهار به وقوع می‌پیوندند (Masoudian, 2005; Khorshiddoust et al., 2016; Azarm et al., 2019; Asadi Rahim-Begi et al., 2022)، بنابراین، انتظار می‌رود در دهه‌های آینده بر مقدار بارش‌های فرین بهار در شمال غرب کشور افزوده شود. در همین راستا، به نظر می‌رسد سهم بارش‌های همرفتی نیز در این منطقه در چشم‌انداز آینده افزایش یابد. چرا که بخش قابل توجهی از بارش‌های فرین بهار در شمال غرب ایران از سازوکار همرفتی بهره می‌برند (Khorshiddoust et al., 2016; Azarm et al., 2019). بطور کلی براساس نتایج چهار شاخص فرین R20mm, R10mm، SDII و RX1day انتظار می‌رود که به دلیل افزایش آهنگ گرمایش جهانی (IPCC, 2021) الگوهای زمانی-مکانی بارش در حوضه دریاچه ارومیه بی‌نظم‌تر شوند که بر این اساس شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه افزایشی‌تر می‌شود.

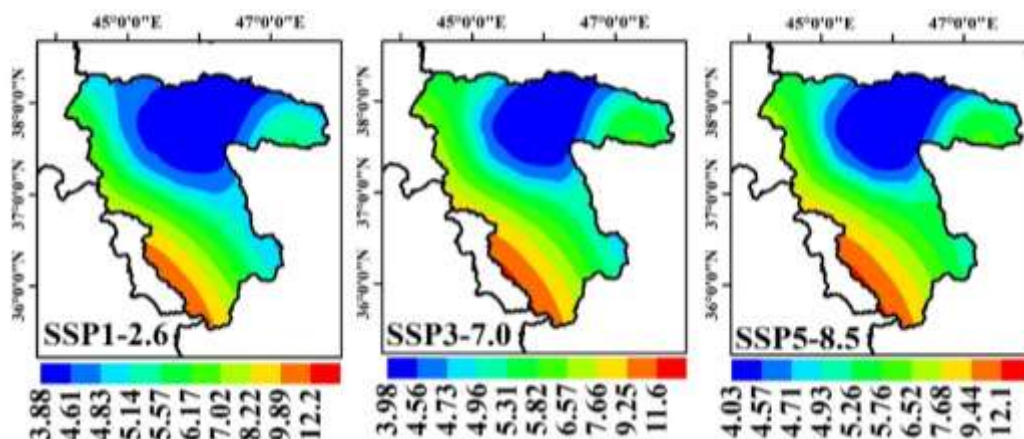
بیشینه متوسط بی‌هنجاری RX1day با ۲/۵ میلی‌متر و بیشینه بی‌هنجاری نیز حدود ۱ میلی‌متر در روز (۰/۹ میلی‌متر) آمده است. کمینه هر دو شاخص SDII و RX1day در مناطق نیمه استپی و مناطق شمالی حوضه است، بطوری که کمینه شاخص RX1day با مقدار ۱۷/۴ میلی‌متر تحت سناریو SSP3-7.0 و کمینه شاخص SDII با ۳/۸۸ میلی‌متر در روز تحت سناریو SSP1-2.6 به دست آمده است. از طرف دیگر بیشینه هر دو این شاخص‌ها در پهنه‌های کوهستانی و مرتفع حوضه در مناطق شرقی و غربی حوضه قرار دارد. به عبارتی در پهنه‌های کوهستانی سردسیر حوضه دریاچه ارومیه بی‌هنجاری شدت بارش بیش‌تر از پهنه اقلیمی نیمه استپی است و بیش‌تر دستخوش تغییر می‌شود. اثرات ترمودینامیکی پهنه‌های کوهستانی، دسترسی رطوبت جو را تغییر داده که در بیشتر مواقع منجر به افزایش بارش‌های فرین و بخصوص شدت بارش خواهد شد (Zhang et al., 2021). این اثرات تغییرات بارش‌های فرین را به شدت وابسته به منطقه می‌کند که در حوضه دریاچه ارومیه نیز این تغییرپذیری مشاهده شد. شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه افزایش قابل توجهی را در آینده نزدیک نشان داده است که یک تهدید جدی برای مدیریت منابع آب‌های سطحی است و به نوعی می‌توان اذعان داشت که در پهنه‌هایی که بی‌هنجاری شدت بارش در آن افزایش زیادی دارد مناطق با خطر بالای احتمال وقوع سیل هستند. نتیجه به دست آمده از بررسی شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه بسیار مهم است؛ چرا که در شرایط تغییر اقلیم بیش از مقدار متوسط بارش، شدت آن تغییر بیش‌تری خواهد



شکل ۸- بیشینه بارش یک روزه (Rx1day) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)

تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 8- Max 1-day precipitation (Rx1day) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios



شکل ۹- شدت بارش روزانه (SDII) در حوضه دریاچه ارومیه مبتنی بر برون‌داد CMIP6-MME طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) تحت

سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5

Figure 9- Simple daily precipitation index (SDII) in Lake Urmia basin based on CMIP6-MME in near future (2026-2050) under SSP1-2.6, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios

نتیجه‌گیری

فرین‌های اقلیمی یکی از جدی‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که افزایش آن‌ها تحت شرایط تغییر اقلیم پیامدهای بسیاری را به دنبال داشته است. بر این اساس این پژوهش به پیش‌نگری اقلیمی بارش‌های فرین حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 پرداخته است. نتایج اصلی این پژوهش به شرح زیر است:

بررسی درستی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولید شده با روش BMA نشان داد که مدل‌های CMIP6 برای بارش در هشت ایستگاه مورد بررسی در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) دارای کم برآوردی هستند. مدل همادی CMIP6-MME کارایی بارش را به شکل قابل توجهی افزایش داد. کارایی بالاتر مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد CMIP6 پیش‌تر برای ایران (Zarrin & Dadashi-Roudbari, 2021) و حوضه دریاچه ارومیه (Zarrin et al., 2022b) مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین کارایی بالاتر مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد در مناطق مختلفی همانند دشت‌های شمال چین (Bai et al., 2020) اوراسیا (Zhao et al., 2021) و هند (Dey et al., 2022) تأیید شده است. بدین ترتیب نتایج پژوهش حاضر مجدداً یافته‌های پیشین را مبنی بر کارایی بالاتر مدل‌های همادی در پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای در مقایسه با مدل‌های منفرد مورد تأیید قرار داده است.

نتایج بررسی روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین تا میانه قرن بیست و یکم نشان داد دو شاخص R10mm و R20mm در بیش‌تر مناطق حوضه دریاچه ارومیه افزایش می‌یابند. مقدار افزایش روزهای همراه بارش سنگین و خیلی سنگین در آینده تحت سناریو SSP5-8.5 بیش‌تر از دو سناریو دیگر خواهد بود. افزایش این بارش‌ها

تحت شرایط تغییر اقلیم در شمال شرق ایالات متحده آمریکا (Guilbert et al., 2015)، اندونزی (Tangang et al., 2017) و آسیای مرکزی (Dike et al., 2020) نیز نشان داده شده است.

پژوهش‌های مختلفی همچون فیشر و ناتی (Fischer and Knutti, 2015)، پنگالارو و همکاران (Pangaluru et al., 2018) و فولر و همکاران (Fowler et al., 2020) افزایش روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین و بطور کلی فرین‌های بارشی را به فعالیت‌های انسانی و غلظت‌های بالاتر گازهای گلخانه‌ای (GHG) نسبت داده‌اند که منجر به تغییرات قابل توجهی در شدت بارش و افزایش بارش‌های سنگین و خیلی سنگین می‌شود که این تحقیق نتایج پیشین را تأیید می‌کند. به طور دقیق‌تر، براساس تئوری‌پردازی‌های سال‌های اخیر، در بطن گرمایش جهانی، ظهور پدیده «تقویت شمالگان» شدت و فراوانی وقوع فرین‌های جوی و اقلیمی را در نیمکره شمالی سرعت بخشیده است (Francis & Vavrus, 2012; 2015; Cohen et al., 2014; 2020; Screen & Simmonds, 2014; Overland et al., 2021). در چارچوب تئوری یادشده، همان‌طوری که افروزش (Afrouzeh, 2018) نیز نشان داد، افزایش فرین‌های اقلیمی (از جمله شدت و فراوانی وقوع بارش‌های سنگین و خیلی سنگین) در خاورمیانه و ایران قابل تبیین بوده و می‌توان آن را به تغییر رفتار بزرگ مقیاس گردش جو در نیمکره شمالی بویژه تغییر فعالیت امواج راسبی نسبت داد. از سویی، عدم آشکارسازی و لحاظ نمودن پدیده‌هایی چون تقویت شمالگان و گرمایش سریع و ناگهانی بوقوع پیوسته در محدوده قطب شمال در طی دو دهه اخیر در مدل‌های اقلیمی آینده‌نگر این دغدغه را ایجاد خواهد نمود که لحاظ نمودن پدیده تقویت شمالگان و پسخورهای اقلیمی ناشی از آن در سامانه اقلیمی، می‌تواند موجب کم-برآوردی و عدم قطعیت بالای مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای

بارش در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره آینده نزدیک نشان از افزایش این متغیر تحت رابطه کلاسیوس-کلاپیرون (CC) (Trenberth, 2011) را تا میانه قرن بیست و یکم دارد. علاوه بر این، افزایش بیشتر در شدت بارش تحت سناریوی خیلی بدبینانه SSP5-8.5 پیش‌نگری شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده که به نوعی برجسته‌ترین نتیجه بدست آمده در این تحقیق است؛ انتظار می‌رود شدت بارش طی دهه های آتی در حوضه دریاچه ارومیه افزایش پیدا کند و این افزایش برای مناطق غربی و شمالی بیش‌تر از سایر مناطق حوضه است که می‌تواند به‌طور بالقوه خطر بارش‌های سیل‌آسا را در حوضه دریاچه ارومیه به‌طور چشمگیری افزایش دهد. همچنین نشان داده شده است که افزایش شدت بارش‌های محلی به بازخوردی ابر همرفتی مربوط است که می‌تواند تا حدی تغییرات شدت بارش را در سطح حوضه توضیح دهد. اما باید توجه داشت ارتباط بازخوردی ابر همرفتی با تغییر اقلیم به دلیل تغییرات چرخش دما و گردش بزرگ مقیاس جو دارای عدم قطعیت است (Fowler et al., 2020) و نیازمند پژوهش‌های بیش‌تر و مستقلى در این زمینه برای حوضه دریاچه ارومیه و سایر مناطق کشور است.

موجود در برآورد وضعیت اقلیم آینده گردد (Screen et al., 2018). به طوری که در دهه‌های آینده، فرین‌های جوی و اقلیمی بسیار بیشتر، گسترده‌تر و شدیدتر از چشم انداز ارائه شده در مدل‌های کنونی پیش‌نگری اقلیمی بوقوع پیوندند.

تحلیل سناریوهای مختلف SSP با مدل CMIP6-MME در این مطالعه نشان داد که در بیشتر مناطق حوضه دریاچه ارومیه بخصوص در مناطق شمالی و غربی روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین روند افزایش خواهد داشت و روزهایی با بارش سنگین و خیلی سنگین سهم بیش‌تری را به نسبت روزهای بارشی معمول در آینده خواهند داشت. این نتیجه در افزایش روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین ایران را که زرین و همکاران (Zarrin et al., 2022a) گزارش کرده‌اند، تأیید می‌کند.

افزایش شدت بارش در طول قرن بیست و یکم بخشی از پاسخ گسترده سامانه‌های بارشی به پدیده گرمایش جهانی است که پیش‌تر در گزارش ششم هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم نیز بر آن تأکید شده است (IPCC, 2021). افزایش قابل توجه شدت بارش در حوضه دریاچه ارومیه می‌تواند پیامدهایی از قبیل سیل داشته باشد. پیش‌نگری شدت

منابع

1. Afrouzeh, M. (2018). Analysis of the activity of Rossby waves in the Northern Hemisphere and its relationship with the temporal and spatial variability of precipitation in the Middle East. M.S Thesis in climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
2. Alavinia, S.H., & Zarei, M. (2021). Analysis of spatial changes of extreme precipitation and temperature in Iran over a 50-year period. *International Journal of Climatology*, 41, E2269-E2289. <https://doi.org/10.1002/joc.6845>
3. Alexander, L.V., & Arblaster, J.M. (2017). Historical and projected trends in temperature and precipitation extremes in Australia in observations and CMIP5. *Weather and Climate Extremes*, 15, 34-56. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.02.001>.
4. Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(11), 2723-2737. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.333263.669118>.
5. Azarm, K., Mofidi, A., & Khorshiddoust, A.M. (2019). Investigation of the mesoscale mechanisms for the occurrence of convective precipitation in the North West of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(3), 553-573. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/JESPHYS.2019.261456.1007023>.
6. Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D.L., Feng, P., & Tang, J. (2021). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain. *International Journal of Climatology*, 41, E171-E186. <https://doi.org/10.1002/joc.6674>.
7. Chamanefar, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I., & Modaresi, F. (2022). Future projection for extreme indices of precipitation and temperature over the period 2026-2100 based on the output of CMIP6 models (Case study: Mashhad). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 16(5), 963-976. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1401.16.5.7.2>.
8. Cohen, J., Screen, J.A., Furtado, J.C., Barlow, M., Whittleston, D., & Comou, D. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geoscience*, 7, 627-637. <https://doi.org/10.1038/ngeo2234>
9. Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Kwok, R., Overland, J., & Yoon, J. (2020). Divergent consensus on Arctic amplification influence on mid-latitude severe winter weather. *Nature Climate Change*, 10(1), 20-29. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0662-y>
10. Coulibaly, P., Dibike, Y.B., & Anctil, F. (2005). Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 483-496. <https://doi.org/10.1175/JHM409.1>
11. Deng, X., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Lewis, S.C., & Ritchie, E.A. (2021). Evaluation of extreme temperatures over Australia in the historical simulations of CMIP5 and CMIP6 models. *Earth's Future*, 9(7), e2020EF001902. <https://doi.org/10.1029/2020EF001902>

12. Dey, A., Sahoo, D.P., Kumar, R., & Remesan, R. (2022). A multimodel ensemble machine learning approach for CMIP6 climate model projections in an Indian River basin. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9215-9236. <https://doi.org/10.1002/joc.7813>
13. Dike, V.N., Lin, Z., Fei, K., Langendijk, G.S., & Nath, D. (2022). Evaluation and multimodel projection of seasonal precipitation extremes over central Asia based on CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology*, 42(14), 7228-7251. <https://doi.org/10.1002/joc.7641>
14. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
15. Faye, A., & Akinsanola, A.A. (2022). Evaluation of extreme precipitation indices over West Africa in CMIP6 models. *Climate Dynamics*, 58(3-4), 925-939. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05942-2>
16. Fischer, E.M., & Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6), 560-564. <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE2617>
17. Fowler, H.J., Lenderink, G., Prein, A.F., Westra, S., Allan, R.P., Ban, N., & Zhang, X. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(2), 107-122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>
18. Francis, J.A., & Vavrus, S.J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical Research Letters*, 39(6), L06801. <https://doi.org/10.1029/2012GL051000>
19. Francis, J.A., & Vavrus, S.J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environmental Research Letters*, 10, 14005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/014005>
20. Goodman, S. J., Blakeslee, R., Christian, H., Koshak, W., Bailey, J., Hall, J., & Gatlin, P. (2005). The North Alabama lightning mapping array: Recent severe storm observations and future prospects. *Atmospheric Research*, 76(1-4), 423-437. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.035>
21. Guilbert, J., Betts, A.K., Rizzo, D.M., Beckage, B., & Bomblies, A. (2015). Characterization of increased persistence and intensity of precipitation in the northeastern United States. *Geophysical Research Letters* 42(6), 1888-1893. <https://doi.org/10.1002/2015GL063124>
22. Hasemi, M. (2011). *A socio-technical assessment framework for integrated water resources management (IWRM) in Lake Urmia Basin, Iran* (Doctoral dissertation, Newcastle University).
23. IPCC (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Part A: Global and 248 Sectoral Aspects. In Contribution of working group II to the fifth assessment report of the 249 intergovernmental panel on climate change (pp. 1–1132). Cambridge, UK, New York, NY: Cambridge University Press.
24. IPCC, A. (2013). *Climate change 2013: the physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1535.
25. IPCC. (2021). Summary for policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, et al. (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (pp. 3–32). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
26. Katiraie-Boroujerdy, P.S., Akbari Asanjan, A., Chavoshian, A., Hsu, K.L., & Sorooshian, S. (2019). Assessment of seven CMIP5 model precipitation extremes over Iran based on a satellite-based climate data set. *International Journal of Climatology*, 39(8), 3505-3522. <https://doi.org/10.1002/joc.6035>
27. Khorshiddoust, A.M., Mofidi, A., Rasouli, A.A., & Azarm, K. (2016). A Synoptic analysis for the occurrence of springtime heavy rainfall in the Northwest of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(8), 53-82. (In Persian)
28. Li, Z., Liu, T., Huang, Y., Peng, J., & Ling, Y. (2022). Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global land. *Earth's Future*, 10(8): e2021EF002500. <https://doi.org/10.1029/2021EF002500>
29. Liu, J., Hertel, T.W., Diffenbaugh, N.S., Delgado, M.S., & Ashfaq, M. (2015). Future property damage from flooding: sensitivities to economy and climate change. *Climatic Change*, 132, 741-749. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1478-z>
30. Malaekheh, S., Safaie, A., Shiva, L., & Tabari, H. (2022). Spatio-temporal variation of hydro-climatic variables and extreme indices over Iran based on reanalysis data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3725-3752. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02223-0>
31. Masoudian, S.A. (2005). Recognition of precipitation regimes of Iran using cluster analysis. *Geographical Research Quarterly*, 37(52), 47-59. (In Persian)
32. Meresa, H., Tischbein, B., & Mekonnen, T. (2022). Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*, 111(3), 2649-2679. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3>
33. Modaresi, F., & Araghi, A. (2023). Projecting future reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04465-6>
34. Nie, Y., & Sun, J. (2022). Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021.

- Geophysical Research Letters*, 49(4), e2021GL097446. <https://doi.org/10.1029/2021GL097446>
35. Overland, J.E., Ballinger, T.J., Cohen, J., Francis, J.A., Hanna, E., Jaiser, R., & Zhang, X. (2021). How do intermittency and simultaneous processes obfuscate the Arctic influence on midlatitude winter extreme weather events? *Environmental Research Letters*, 16(4), 043002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdb5d>
36. Pangaluru, K., Velicogna, I., C Sutterley, T., Mohajerani, Y., Ciraci, E., Sompalli, J., & Saranga, V.B.R. (2018). Estimating changes of temperatures and precipitation extremes in India using the Generalized Extreme Value (GEV) distribution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-33. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-522>
37. Pimonsree, S., Kamworapan, S., Gheewala, S.H., Thongbhakdi, A., & Prueksakorn, K. (2023). Evaluation of CMIP6 GCMs performance to simulate precipitation over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 282, 106522. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106522>
38. Raftery, A.E., Gneiting, T., Balabdaoui, F., & Polakowski, M. (2005). Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. *Monthly Weather Review*, 133(5), 1155-1174. <https://doi.org/10.1175/MWR2906.1>
39. Ryan, C., Curley, M., Walsh, S., & Murphy, C. (2022). Long-term trends in extreme precipitation indices in Ireland. *International Journal of Climatology*, 42(7), 4040-4061. <https://doi.org/10.1002/joc.7475>
40. Screen, J.A., & Simmonds, I. (2014). Amplified mid-latitude planetary waves favour particular regional weather extremes. *Nature Climate Change*, 4, 704-709. <https://doi.org/10.1038/nclimate2271>
41. Screen, J.A., Deser, C., Smith, D.M., Zhang, X., Blackport, R., Kushner, P.J., & Sun, L. (2018). Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. *Nature Geoscience*, 11(3), 155-163. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0059-y>
42. Seneviratne, S.I., & Hauser, M. (2020). Regional climate sensitivity of climate extremes in CMIP6 versus CMIP5 multimodel ensembles. *Earth's Future*, 8(9), e2019EF001474. <https://doi.org/10.1029/2019EF001474>
43. Sorooshian, S., Duan, Q., & Gupta, V. K. (1993). Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the Sacramento Soil Moisture Accounting Model. *Water Resources Research*, 29(4), 1185-1194. <https://doi.org/10.1029/92WR02617>
44. Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
45. Tangang, F., Juneng, L., & Aldrian, E. (2017). Observed changes in extreme temperature and precipitation over Indonesia. *International Journal of Climatology*, 37(4), 1979-1997. <https://doi.org/10.1002/joc.4829>
46. Thackeray, C.W., Hall, A., Norris, J., & Chen, D. (2022). Constraining the increased frequency of global precipitation extremes under warming. *Nature Climate Change*, 12(5), 441-448. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01329-1>
47. Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47(1-2), 123-138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
48. WMO (2020). WMO statement on the state of the global climate in 2019. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnumid=10211
49. Xu, H., Chen, H., & Wang, H. (2022). Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 42(1), 635-651. <https://doi.org/10.1002/joc.7264>
50. Xu, P., Wang, L., & Ming, J. (2022). Central Asian precipitation extremes affected by an intraseasonal planetary wave pattern. *Journal of Climate*, 35(8), 2603-2616. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0657.1>
51. Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105369>
52. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 643-660. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>
53. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022a). Spatiotemporal variability, trend, and change-point of precipitation extremes and their contribution to the total precipitation in Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), 2923-2944. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03098-6>
54. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022b). Evaluation of reanalysis-based, satellite-based, and "bias-correction"-based datasets for capturing extreme precipitation in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(4), 67. <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00903-8>
55. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Evaluation of CMIP6 models in estimating temperature in Iran with emphasis on equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR). *Iranian Journal of Geophysics*, 17(1), 39-56. (In Persian). <http://doi.org/10.30499/ijg.2022.344862.1430>
56. Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022a). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179, 441-464. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02904-x>
57. Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Kadkhoda, E. (2022b). Drought projection in the Urmia Lake basin under SSP Scenarios until the End of the 21st Century. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1499-1516. (In Persian). <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343700.669278>

58. Zeder, J., & Fischer, E.M. (2020). Observed extreme precipitation trends and scaling in Central Europe. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100266>
59. Zhang, W., Furtado, K., Wu, P., Zhou, T., Chadwick, R., Marzin, C., & Sexton, D. (2021). Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 7(31), eabf8021. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abf8021>
60. Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., & Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851-870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
61. Zhao, Y., Qian, C., Zhang, W., He, D., & Qi, Y. (2021). Extreme temperature indices in Eurasia in a CMIP6 multi-model ensemble: Evaluation and projection. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5368-5385. <https://doi.org/10.1002/joc.7134>



Evaluation of Combined Agricultural Drought Index (CDI), Prediction Methods Based on Satellite Images via Deep Learning and Machine Learning Approaches

N. Shamloo¹, M.T. Sattari^{2*}, Kh. Valizadeh Kamran³, H. Apaydin⁴

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mtsattar@gmail.com)

3- Professor Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Geography & Planning, University of Tabriz, Tabriz, Iran

4- Professor Department of Agricultural, Faculty of Agriculture, University of Ankara, Ankara, Turkey

Received: 07-06-2023
Revised: 27-08-2023
Accepted: 20-09-2023
Available Online: 23-09-2023

How to cite this article:

Shamloo, N., Sattari, M.T., Valizadeh Kamran, Kh., & Apaydin, H. (2023). Evaluation of combined agricultural drought index (CDI) prediction methods based on satellite images via deep learning and machine learning methods. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 787-807. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82798.1293>

Introduction

Drought is one of the greatest challenges of our time due to the dangers it poses to the world. In arid and semi-arid regions, it is necessary to continuously monitor agricultural systems that face water shortages and frequent droughts. Therefore, it is necessary to have large-scale information about agricultural systems and land use for managing and making decisions for the sustainability of food security. Continuous monitoring of drought requires a large amount of information to be processed with great speed and accuracy. Due to the complexity and impact of various factors on drought, in recent years, the methods of combining several factors to create a comprehensive drought index have received much attention. Machine learning and deep learning methods can provide a more accurate and efficient tool to predict droughts and be used in drought risk management. The review of sources shows that until now no studies have been conducted in the field of drought monitoring using deep learning approach and satellite images in the catchment area of Lake Urmia in Iran. A large part of its economic activities is dedicated to agriculture. The increase in temperature, the increase in evaporation-transpiration and the excessive use of water resources for agriculture have caused an upward trend in the frequency of droughts in this basin during consecutive years, one of the harmful effects of which is a significant decrease in the lake level. Therefore, for drought management in this basin, it is very important to identify drought behavior so It is very important to determine appropriate and reliable indicators to measure and predict the effects of droughts. According to the investigations, it was observed that most of the studies in the field of drought in this basin have been carried out from the meteorological point of view, or by individual plant indicators, so in this study, using the approach of principal component analysis, we tried to provide a composite drought index for drought modeling and forecasting.

Materials and Methods

In this research, satellite images and deep learning and machine learning methods have been used to predict the Combined Drought Index. For this purpose, satellite images were first obtained for the study area and pre-processing was done on the data. Then, all the data were converted to a scale with a spatial resolution of 500 meters, and the VCI index was calculated using NDVI data, the TCI index using the land surface temperature product, and the CWSI index using the Modis evapotranspiration product, and finally, CDI drought index 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.2023.82798.1293>

calculated using principal component analysis method. Then the correlation between CDI data and other meteorological variables including evapotranspiration, potential evapotranspiration, land surface temperature during the day, and land surface temperature at night was calculated. Finally, the CDI index is modeled using deep learning and machine learning methods.

Results and Discussion

This study modeled the Combined Drought Index based on a different combination of input variables and deep learning and machine learning methods. Examining the results showed that the variables of the normalized difference vegetation index, the land surface temperature during the day and at night, evapotranspiration, and potential evapotranspiration were the most influential parameters for modeling the CDI index, and all four methods with acceptable accuracy and error have been able to model the combined drought index. The CART model with a correlation coefficient of 0.96, RMSE equal to 0.029, and Nash Sutcliffe coefficient of 0.92 was chosen as the best model among the methods.

Conclusion

In this research, different combinations of input variables extracted from satellite image products were evaluated in the form of 6 independent scenarios to predict the Combined Drought Index. By examining the evaluation parameters including correlation coefficient, Nash Sutcliffe coefficient, and root mean square error, it was found that all four methods can estimate the combined drought index with acceptable accuracy and error. Among all the methods, the CART method performed better ($R=0.96$ and $RMSE=0.029$) than the other methods for predicting the time series of the Combined Drought Index. On the other hand, the SVM method has been able to model the combined drought index with acceptable accuracy ($R=0.94$ and $RMSE=0.034$). However, contrary to expectations, two deep learning methods were able to model the combined drought index with less accuracy than machine learning methods. In general, by examining the results, it was found that with the method presented in this research, it is possible to accurately predict the CDI combined drought index time series and predict drought in different periods of plant growth, and use its results for regional drought management and policies, especially in Basins without statistics.

Keywords: Agricultural drought, Combined Drought Index (CDI), Deep learning and machine learning, Satellite images

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۷۸۷-۸۰۷

ارزیابی روش‌های پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی کشاورزی (CDI) براساس تصاویر ماهواره‌ای با روش‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین

نازیلا شاملو^۱ - محمدتقی ستاری^{۲*} - خلیل ولی زاده کامران^۳ - حالت آپ آیدین^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۹

چکیده

باتوجه به بحران خشکیدگی دریاچه ارومیه، مطالعه وضعیت پوشش گیاهی و خشکسالی کشاورزی محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه که یکی از شش حوضه اصلی ایران محسوب می‌شود، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این مطالعه ابتدا یک شاخص ترکیبی خشکسالی (Combined CDI) (Drought Index) مبتنی بر شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، وضعیت دمایی گیاهی (TCI) و شاخص تنش آبی محصول (CWSI) با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS قرارگرفته در ماهواره TERRA معرفی و محاسبه گردید. سپس با روش‌های درخت تصمیم-طبقه‌بندی و درخت رگرسیون (DT-CART)، ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) و حافظه کوتاه مدت، بلند مدت (LSTM) و حافظه کوتاه مدت دو جهته (BiLSTM)، شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI) معرفی و تخمین زده شد. در فرآیند مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی، محصولات شاخص‌های پوشش گیاهی، تبخیر-تعرق، تبخیر-تعرق پتانسیل، دمای سطح زمین در روز و دمای سطح زمین در شب برگرفته از سنجنده MODIS به‌عنوان ورودی مدل‌ها استفاده شد. در نهایت بررسی عملکرد مدل‌ها براساس ترکیب‌های متفاوتی از ورودی مدل‌ها با استفاده از معیارهای ارزیابی شامل ضریب همبستگی، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب ناش ساتکلیف و همچنین به کمک نمودارهای کلوروگرام، تیلور و ویلونی بصورت بصری انجام شد. نتایج نشان‌داد که متغیرهای دمای سطح زمین در روز، دمای سطح زمین در شب و تبخیر-تعرق موثرترین متغیرها برای مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI) و مطالعه خشکسالی کشاورزی می‌باشند. همچنین مدل CART با ضریب همبستگی ۰/۹۶، میانگین جذر مربعات خطا برابر با ۰/۰۲۹ و ضریب ناش ساتکلیف ۰/۹۲ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. نتایج بدست آمده نشان‌داد که روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق ابزاری توانمند در مدل‌سازی و پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI) بوده و در بررسی و ارزیابی خشکسالی کشاورزی به‌خصوص در حوضه‌های فاقد آمار با اطمینان کافی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: حافظه کوتاه مدت بلند مدت، درخت تصمیم، سنجش از دور، شاخص خشکسالی، ماشین بردار پشتیبان

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: mtsattar@gmail.com

۳- استاد گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۴- استاد گروه مهندسی کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آنکارا، آنکارا، ترکیه

مقدمه

خشکسالی به دلیل به وجود آوردن خطراتی برای جهان، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های عصر ما می‌باشد (Balti et al., 2020). در مناطق خشک و نیمه‌خشک پایش مستمر سیستم‌های کشاورزی که با کمبود آب و خشکسالی‌های مکرر مواجه‌اند، ضروری است (Winkler et al., 2017). نظارت مستمر بر خشکسالی نیازمند حجم وسیع و گسترده‌ای از اطلاعات است تا با سرعت و دقت بسیار زیاد پردازش شوند (Balti et al., 2020). باتوجه به وجود شرایط اقلیمی متنوع، دلایل فیزیکی و پتانسیل بخش‌های تأثیرپذیر، ساختار و عملکرد سیستم نظارت بر خشکسالی می‌بایست مطابق با نیازهای خاص منطقه باشد (Heim Jr & Brewer, 2012).

اگرچه روش‌های پایش خشکسالی هواشناسی توسط سایر محققین به‌گسترده‌ای استفاده شده‌اند، اما درمقایسه با آن بررسی‌های پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی که مربوط به تنش آبی محصول می‌باشد کمتر مورد توجه قرار گرفته‌است. استفاده از روش‌های سنجش از دور، توزیع مکانی و زمانی سریع و پیوسته‌ای از رشد گیاه و خشکسالی ارائه می‌دهند. از آنجایی که روش‌های سنتی پایش خشکسالی توسط سنجش از دور تنها به بررسی یک عامل مانند رشد گیاه یا رطوبت خاک می‌پردازند، نمی‌توانند به خوبی اطلاعات جامعی درباره خشکسالی ارائه دهند. باتوجه به پیچیدگی و تأثیرگذاری عوامل مختلف بر خشکی، در سال‌های اخیر روش‌های ترکیب چندین عامل برای ساخت شاخص جامع خشکسالی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (Yin et al., 2018; AghaKouchak et al., 2015).

پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از مدل‌های تصادفی فقط مقادیر حال و گذشته یک متغیر (دما و بارش) را در نظر می‌گیرد و اثرات سایر متغیرها را نادیده می‌گیرد. از آنجایی که این مدل‌ها، مدل‌های خطی می‌باشند برای پیش‌بینی پدیده‌های پیچیده غیرخطی قابل‌استفاده نمی‌باشند. اخیراً روش‌های یادگیری ماشین و مدل‌های هیبرید به‌عنوان جایگزینی برای مدل‌های آماری، سری‌های زمانی و مدل‌های احتمالی استفاده می‌شوند که قابلیت‌های بسیاری در مدل‌سازی پیش‌بینی سری زمانی غیرخطی و دینامیکی خشکسالی دارند. روش‌های یادگیری ماشین (Machine learning) و یادگیری عمیق (Deep Learning) می‌تواند ابزاری دقیق و کارآمدتر برای پیش‌بینی خشکسالی‌ها ارائه کند و در مدیریت ریسک خشکسالی‌ها استفاده شود (Prodhan et al., 2022). روش‌های یادگیری ماشین توانایی جداسازی اثرات متغیرهای

خطی و تجزیه و تحلیل روابط سلسله‌مراتبی و متغیرهای غیرخطی بین متغیرهای وابسته و مستقل و درنتیجه عملکرد بهتر در مقایسه با روش‌های رگرسیون خطی دارند (Guzmán et al., 2018).

روش‌های یادگیری عمیق می‌توانند روابط پیچیده غیرخطی بین متغیرها را با استفاده از آموزش چند لایه به‌دقت تخمین بزنند (LeCun et al., 2015). همچنین این روش‌ها توانایی کار با داده‌های متوالی را دارند (Cunha et al., 2018). از سویی یادگیری عمیق یک رویکرد بسیار امیدوارکننده برای ترسیم غیرخطی ویژگی‌های عوامل خشکسالی می‌باشد و به‌دلیل مستقل بودن از تئوری توزیع داده‌ها در مقایسه با روش‌های آماری عملکرد دقیق‌تر و بهتری خواهند داشت (Qian et al., 2015). مطالعات گسترده‌ای با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در طبقه‌بندی یا پیش‌بینی خشکسالی انجام شده‌است به‌طور مثال خسروی و همکاران (Khosravi et al., 2015) به بررسی کارایی چهار روش شبکه عصبی (NN)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، ماشین بردار پشتیبان کمترین مربعات (LSSVM) و همچنین یک سیستم فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی (ANFIS) برای مدل‌سازی شاخص‌های هواشناسی و سنجش از دور منطقه شرقی اصفهان در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ پرداختند و نشان دادند که از میان روش‌های مورد مطالعه روش رگرسیون بردار پشتیبان بیشترین کارایی و روش شبکه عصبی کمترین کارایی را در مدل‌سازی سری‌زمانی خشکسالی داشته است.

نیاستی و همکاران (Niasati et al., 2021)، به برآورد تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و تصاویر ماهواره و شاخص‌های خشکسالی پرداختند و پتانسیل بالای الگوریتم‌های یادگیری ماشین در برآورد تبخیرتعرق مرجع را نشان دادند. در مطالعه‌ای (Nay et al., 2018) ابزاری برای پیش‌بینی سلامت شاخص پوشش گیاهی (VHI) با استفاده از یادگیری ماشین توسعه دادند. و همبستگی بالا (۰/۷۵) بین مقادیر مدل شده و واقعی را نشان دادند. همچنین دنگ و همکاران (Dang et al., 2020) از روش‌های رگرسیون بردار پشتیبان، جنگل تصادفی و یادگیری عمیق برای پیش‌بینی محصول استفاده کردند و نشان دادند که روش یادگیری عمیق عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد.

ردی و پراساد (Reddy & Prasad, 2018) با استفاده از روش LSTM و تصاویر سنجنده مودیس شاخص پوشش گیاهی NDVI را در منطقه جزایر نیکوبار در هندوستان پیش‌بینی نمودند. آن‌ها از ۸۶۱ تصویر شاخص پوشش گیاهی NDVI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ استفاده

1- Neural Network

2- Least-Squares Support-Vector Machines

3- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

4- Vegetation Health Index

نرمال شده گیاهی، دمای سطح زمین در روز و شب، تبخیر-تعرق، تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشد. کارایی شاخص ترکیبی خشکسالی و همچنین تعیین متغیرهای مهم اقلیمی و تأثیرگذار در مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه اهداف فرعی دیگر این پژوهش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارای مساحت تقریبی ۵۲۷۰۰ کیلومتر مربع می‌باشد که ۳/۱۵ درصد کل مساحت ایران را و ۷ درصد کل سطح آب‌های کشور را به خود اختصاص داده‌است. این حوضه از ۴۴/۲۲ تا ۴۷/۸۹ درجه شرقی و ۳۵/۶۷ تا ۳۸/۴۷ درجه شمالی گسترش یافته‌است. براساس روش طبقه‌بندی اقلیمی کوپن این منطقه دارای اقلیم نیمه‌خشک می‌باشد. مقدار متوسط بارندگی منطقه حدود ۴۰۰ میلی‌متر در سال است. این حوضه آبریز در سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان واقع شده‌است (et Rezaei Moghadam, 2012).

تصاویر ماهواره‌ای

در این مطالعه از محصولات سنجنده مودیس قرارگرفته در ماهواره ترا به شرح جدول ۱ استفاده شده است. تمامی داده‌ها برای سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ از سایت Google Earth Engine دریافت گردید. با توجه به بازه زمانی ۱۶ روزه تصاویر شاخص پوشش گیاهی، در این مطالعه ۷۰ درصد داده‌ها از تاریخ ۲۰۰۱/۰۱/۰۱ تا ۲۰۱۵/۰۱/۱۷ برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها از تاریخ ۲۰۱۵/۰۲/۰۲ تا ۲۰۲۰/۱۱/۱۶ برای آزمون مورد استفاده قرارگرفته است.

در این مطالعه از تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های یادگیری ماشین و عمیق برای پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی کشاورزی استفاده شده است. به این منظور در ابتدا تصاویر ماهواره‌ای برای منطقه مورد مطالعه دریافت و پیش‌پردازش روی داده‌ها انجام گرفت. سپس تمامی داده‌ها به مقیاس یکسان با رزولوشن مکانی ۵۰۰ متر تبدیل و شاخص‌های VCI با استفاده از داده‌های NDVI، شاخص TCI با استفاده از محصول دمای سطح زمین و شاخص CWSI با استفاده از محصول تبخیر-تعرق سنجنده مودیس محاسبه و در نهایت شاخص ترکیبی خشکسالی CDI با روش آنالیز مولفه‌های اصلی بدست آمد. سپس همبستگی بین داده‌های CDI با سایر متغیرهای هواشناسی شامل تبخیر-تعرق، تبخیر-تعرق پتانسیل، دمای سطح زمین در روز و دمای

نموده و با مدل‌های LSTM و هوش مصنوعی به پیش‌بینی سری زمانی NDVI پرداختند و نشان دادند که روش LSTM عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌های هوش مصنوعی دارد. شن و همکاران (Shen et al., 2020) با استفاده از عوامل مختلف خطر ساز در توسعه خشکسالی بدست آمده از تصاویر ماهواره MODIS و TRMM به توسعه یک شاخص پیچیده سنجش از دور با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق پرداختند و با کمک آن خشکسالی را در استان هنان چین پیش‌بینی نموده و در نهایت نشان دادند که مدل جامع خشکسالی بدست آمده با روش‌های یادگیری عمیق کاربرد دقیقی در پایش خشکسالی هواشناسی و کشاورزی دارد. البلتاگی و همکاران (Elbeltagi et al., 2021) شاخصی به نام شاخص ترکیبی تبخیر-تعرق (CTEI^۱) برای منطقه رودخانه گنگا ارائه دادند و از طریق آن به پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از ۵ روش یادگیری ماشین پرداختند و نشان دادند که روش ماشین بردار پشتیبان (SVM) با ضریب تبیین ۰/۸۲ و میانگین جذر مربعات خطا ۰/۳۳ بهترین روش برای پیش‌بینی خشکسالی می‌باشد. لی و همکاران (Li et al., 2021) به مطالعه پیش‌بینی شاخص خشکسالی نرمال شده پوشش گیاهی در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۸ با روش‌های یادگیری ماشین پرداختند و نشان دادند که روش‌های یادگیری ماشین پتانسیل زیادی برای نظارت بر پویایی پوشش گیاهی و رشد محصول دارد.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از شش حوضه اصلی ایران محسوب می‌شود که به علت شرایط اقلیمی و اجتماعی مناسب، بخش وسیعی از فعالیت‌های اقتصادی در آن به کشاورزی اختصاص یافته‌است (Mohammadi et al., 2018). افزایش دما، بالا رفتن تبخیر-تعرق و استفاده بیش از حد از منابع آب برای کشاورزی موجب روند صعودی در فراوانی خشکسالی در طی سال‌های متوالی در این حوضه گردیده است. تعیین شاخص‌های مناسب و قابل اعتماد به طوری که بتواند اثرات ناشی از خشکسالی در این حوضه را اندازه‌گیری و پیش‌بینی کند، بسیار حائز اهمیت است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، مشاهده گردید که بیشتر مطالعات در زمینه خشکسالی در این حوضه از منظر هواشناسی، یا توسط شاخص‌های منفرد گیاهی انجام گرفته است (Shamloo et al., 2022, Babajafari et al., 2021, Kazempour Choursi et al., 2019). بنابراین در این مطالعه با استفاده از رویکرد آنالیز مولفه‌های اصلی و داده‌های سنجش از دور اقدام به ارائه شاخص ترکیبی خشکسالی شد و با استفاده از روش‌های جدید یادگیری عمیق به مدل سازی و پیش‌بینی خشکسالی پرداخته شد. در حالت کلی هدف از مطالعه حاضر مقایسه عملکرد روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق شامل DT-CART^۲، SVM^۳، LSTM^۴ و BiLSTM^۵ در پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی (CDI^۶) براساس داده‌های شاخص تفاضل

4- Long Short-Term Memory

5- Bidirectional Long Short-Term Memory

6- Combined Drought Index

1- Combined Terrestrial Evapotranspiration Index

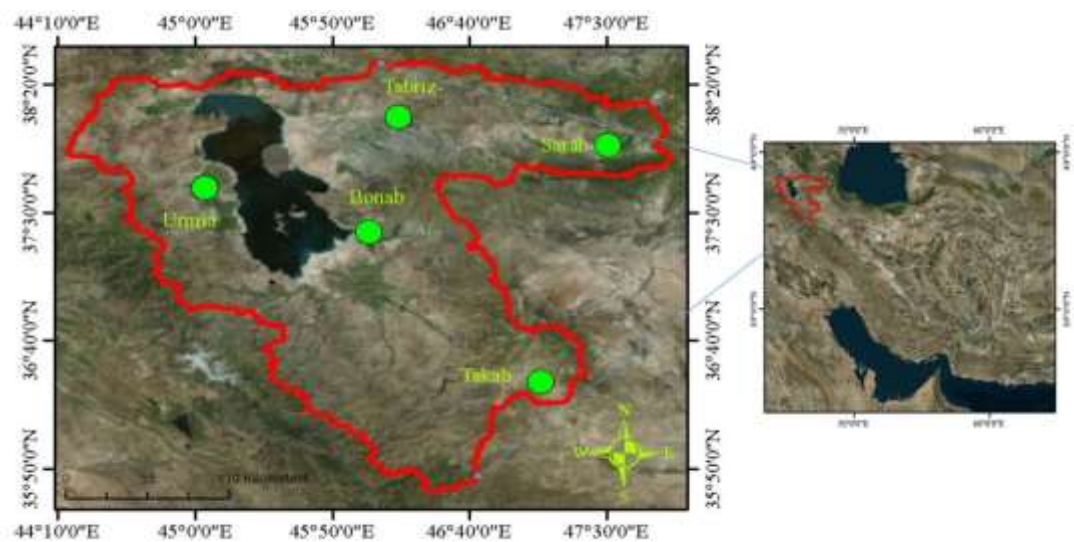
2- Decision Tree-Classification and Regression Tree

3- Support Vector Machine

شاخص‌های خشکسالی

در جدول ۲ شاخص‌های مورد استفاده در این مطالعه و روابط مربوطه برای محاسبه هر شاخص نشان داده شده‌است.

سطح زمین در شب محاسبه شد. در نهایت مدل سازی شاخص CDI با استفاده از روش‌های یادگیری عمیق، یادگیری ماشین و ترکیبی از متغیرهای ورودی مختلف انجام شد. فلوچارت ارائه شده در شکل ۲ فرایند کلی مورد استفاده در این مطالعه برای پیش‌بینی سری زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی را نشان می‌دهد.



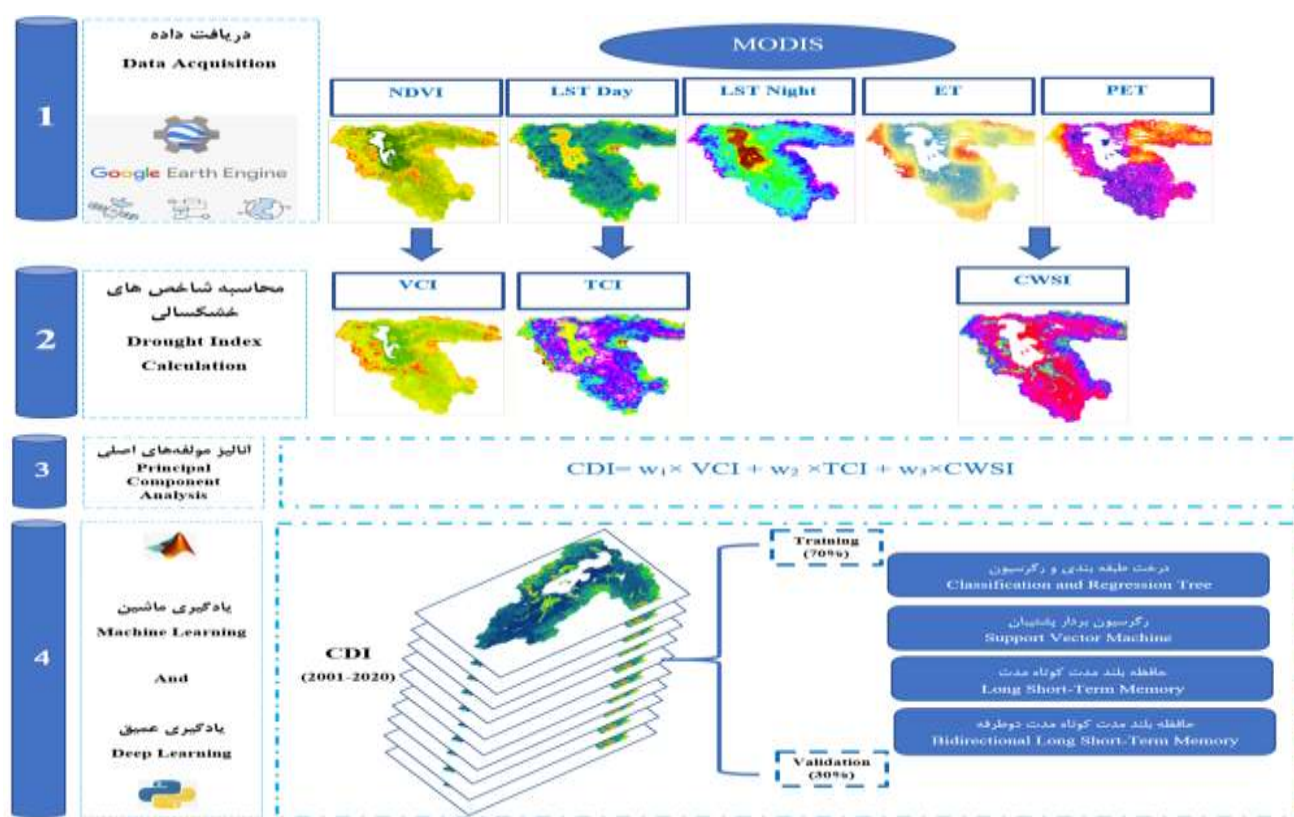
شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the study area

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده

Table1- Satellite products used

محصولات Products	شاخص Index	تعریف Definition	رزولوشن مکانی Spatial Resolution	رزولوشن زمانی Temporal Resolution	سنجنده Sensor
MOD16A2	ET	تبخیر-تعرق Evapotranspiration	500 m	۸ روزه 8 day	MODIS
MOD16A2	PET	تبخیر-تعرق پتانسیل Potential Evapotranspiration	500 m	۸ روزه 8 day	MODIS
MOD11A2	LST _{day}	دمای سطح زمین در روز Land Surface Temperature-Day	1000 m	۸ روزه 8 day	MODIS
MOD11A2	LST _{night}	دمای سطح زمین در شب Land Surface Temperature- Night	1000 m	۸ روزه 8 day	MODIS
MOD13A1	NDVI	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی Normalized Difference Vegetation Index	500 m	۱۶ روزه 16 day	MODIS
MOD13A1	EVI	شاخص بهبود یافته گیاهی Enhanced vegetation index	500 m	۱۶ روزه 16 day	MODIS



شکل ۲- فلوچارت روش انجام مطالعه
Figure 2- Flowchart of the study method

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده

Table 2- used indices

مرجع References	فرمول Formula	شاخص Index
(Tucker, 1979)	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (Normalized Difference Vegetation Index)
(Kogan, 1995)	$VCI = \frac{(NDVI_j - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$	شاخص وضعیت پوشش گیاهی (Vegetation Condition Index)
(Kogan, 1995)	$TCI = \frac{(T_{max} - T_i)}{(T_{max} - T_{min})}$	شاخص وضعیت دمایی (Temperature Condition Index)
(Jackson et al., 1988)	$CWSI = 1 - \frac{ET}{PET}$	شاخص تنش آبی محصول (Crop Water Stress Index)
	$CDI = w_1 \times VCI + w_2 \times TCI + w_3 \times CWSI$	شاخص ترکیبی خشکسالی (Combined Drought Index)

روش آنالیز مؤلفه اصلی (PCA)

روی دومین محور مختصات و به همین ترتیب برای سایر محورها ادامه می‌یابد. با استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی می‌توان تعداد زیادی متغیر همبسته را با تعداد محدودی متغیر جدید که مؤلفه اصلی نامیده می‌شوند و ناهمبسته‌اند جایگزین نمود و به این ترتیب بعد مسأله را کاهش داد. مراحل محاسبات این روش به این ترتیب است (۱) ابتدا مقادیر داده ها در هر بعد از میانگین خودشان در همان بعد کم می‌شوند، (۲) ماتریس

تحلیل مؤلفه اصلی تبدیلی در فضای برداری است که غالباً برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این تحلیل شامل تجزیه مقدار ویژه ماتریس کوواریانس می‌باشد. درواقع در این روش داده‌ها به دستگاه مختصات جدیدی برده می‌شوند که بزرگترین واریانس داده بر روی اولین محور مختصات، دومین واریانس بزرگ بر

این روش‌ها به مدل‌های ماشین‌های بردار پشتیبان و مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان تقسیم‌بندی می‌شوند.

یکی از روش‌های متداول برای حل مسائل غیرخطی، استفاده از توابع کرنل می‌باشد که بر اساس ضرب داخلی داده تعریف می‌شود. درواقع با یک تبدیل غیرخطی از فضای ورودی به فضایی با ابعاد بیشتر (حتی نامتناهی) می‌توان مسائل را به صورت خطی، تفکیک‌پذیر ساخت.

تابع رگرسیون بردار پشتیبان به صورت معادله ۶ بیان می‌شود.

(6) $f(x) = w \times \phi(x) + b$
که در آن f تابع رگرسیون ϕ تابع انتقال و w و b وزن‌ها و بایاس‌ها می‌باشند.

که مساله بهینه‌سازی می‌تواند به صورت معادله ۷ تعریف شود

$$\text{Minimize: } \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \quad (7)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} y_i - f(x) \leq \varepsilon + \xi_i \\ f(x) - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0, i = 1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

که C پارامتر خطا و ξ_i, ξ_i^* سکون متغیرها و ε مقدار مرزی می‌باشد. با استفاده از ضرب لاگرانژ مساله بهینه‌سازی به برنامه‌نویسی درجه دوم و غیرخطی تبدیل می‌شود. که تابع رگرسیون به صورت ذیل بیان می‌شود.

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x, x_i) + b \quad (9)$$

که $K(x, x_i)$ تابع کرنل و α_i, α_i^* متغیرهای دو گانه می‌باشند توابع کرنل هسته رگرسیون بردار پشتیبان هستند. انواع توابع کرنل شامل خطی، چند جمله‌ای، سگموئید و RBF وجود دارد. که در این مطالعه از تابع کرنل RBF که عملکرد خوبی در مطالعات بسیاری داشته‌است استفاده شده‌است (Maroufpoor et al., 2019). تابع کرنل RBF به صورت ذیل بیان می‌شود.

$$K(x, x_i) = \exp(-\gamma \|x_i - x\|^2) \quad (10)$$

که γ پارامتر تابع کرنل و مهمترین عامل در افزایش یا کاهش عملکرد رگرسیون بردار پشتیبان می‌باشد.

مدل LSTM

یکی از انواع شبکه‌های عصبی بازگشتی روش LSTM می‌باشد که برای پیش‌بینی سری‌زمانی با یادگیری طولانی مدت استفاده می‌شوند (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). این یک روش خاص عصبی بازگشتی می‌باشد که برای مدل‌سازی توالی و وابستگی‌های طولانی مدت ساخته شده‌است. LSTM یک تکامل با کیفیت بالا از شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) می‌باشد. این شبکه عصبی برای رفع مشکلات موجود در شبکه‌های عصبی بازگشتی با اضافه نمودن تعاملات بیشتر در هر سلول ارائه شده‌است. روش LSTM به دلیل به

کواریانس داده‌ها محاسبه می‌شود و ۳) سپس براساس این ماتریس مقادیر بردارهای ویژه محاسبه می‌شود. به‌طوری که هر بردار ویژه‌ای که دارای بیشترین مقدار ویژه نیز باشد، به عنوان مؤلفه اصلی در نظر گرفته می‌شود. سپس داده‌هایی که از مقدار میانگین خود در هر بعد کم شده‌اند در مقدار بردار ویژه‌ای که به‌عنوان مؤلفه اصلی در نظر گرفته شده ضرب می‌شود. حاصل محاسبات فوق داده‌هایی است که دارای یک بعد و غیرهمبسته به یکدیگر هستند (Smith., 2002).

پس از محاسبه شاخص ترکیبی خشکسالی براساس روش آنالیز مؤلفه‌های اصلی، به مدل‌سازی و پیش‌بینی این شاخص توسط روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق پرداخته شد.

درخت تصمیم (CART)

CART (Breiman et al., 1984) یک الگوریتم ساخت درخت تصمیم است که توسط (Breiman et al., 1984) ارائه شد. این روش به دلیل ویژگی‌هایی از قبیل استقلال از پارامترها، اجرای آسان و سرعت بالا در بسیاری از مطالعات سنجش از دور شامل طبقه‌بندی و پیش‌بینی استفاده شده‌است (Hu & Dong, 2018; Shao & Lunetta, 2012). برای اولین بار اصطلاح درخت تصمیم را به کار برد و بعد از آن این روش به صورت گسترده در حوزه‌های مختلف علوم به کار برده شد. درخت‌های تصمیم ابزاری قدرتمند و رایج برای طبقه‌بندی و پیش‌بینی می‌باشند. درخت تصمیم روشی است که با استفاده از الگوریتم‌های خاص، داده‌ها را به شکل درخت در کلاس‌ها و دسته‌های مجزا طبقه بندی می‌کند. روش درخت تصمیم، یک مدل تخمینی و ارزیابی و یکی از پرکاربردترین ابزارها و روش‌ها برای طبقه‌بندی و خوشه‌بندی داده‌ها در کاربردهای مختلف داده‌کاوی می‌باشد (Sattari et al., 2012). هدف از این روش، ایجاد یک مدل برای پیش‌بینی عددی متغیر هدف با استفاده از متغیرهای ورودی براساس دسته‌بندی‌های مختلفی است که ارائه می‌دهد.

ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین بردار پشتیبان یکی از روش‌های یادگیری است که در سال ۱۹۹۲ میلادی توسط بوسر و همکاران بر پایه تئوری یادگیری آماری ارائه شد (Boser et al., 1992). آن‌ها طی سال‌های بعد تئوری ابر صفحه بهینه را به‌عنوان طبقه‌بندی کننده خطی ارائه داده و طبقه‌بندی کننده‌های غیرخطی را به کمک توابع کرنل معرفی نمودند. اصول اساسی آن‌چه که امروز به‌عنوان ماشین بردار پشتیبان شناخته می‌شود نتایج کارهای بوسر و همکاران است و در نهایت گسترش ماشین بردار پشتیبان براساس رگرسیون نیز در سال ۱۹۹۵ توسط وپنیک به نتیجه رسید (Vapnik, 1995). ماشین بردار پشتیبان مبتنی بر کمینه کردن ساختاری ریسک می‌باشد که از نظریه آموزش آماری گرفته شده‌است.

باشند.

مقدار اولیه این توالی $x(x_1)$ در اولین واحد LSTM اجرا می‌شود و اولین لایه پنهان h_1 و سلول به روز شده c_1 نتیجه می‌دهد. در گام زمانی T ، ورودی LSTM (c_{t-1}, h_{t-1}) می‌باشد که خروجی h_t و سلول به روز شده c_t می‌باشد (Hochreiter & Schmidhuber, 1997).

شکل ۴ معماری و جزئیات روش LSTM را نشان می‌دهد.

بنابراین در LSTM لایه پنهان h_t توسط معادلات ۱۱ تا ۱۶ محاسبه خواهد شد.

$$i_t = \sigma(W_i X_t + U_i h_{t-1} + b_i) \quad (11)$$

$$f_t = \sigma(W_f X_t + U_f h_{t-1} + b_f) \quad (12)$$

$$O_t = \sigma(W_o X_t + U_o h_{t-1} + b_o) \quad (13)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c X_t + U_c h_{t-1} + b_c) \quad (14)$$

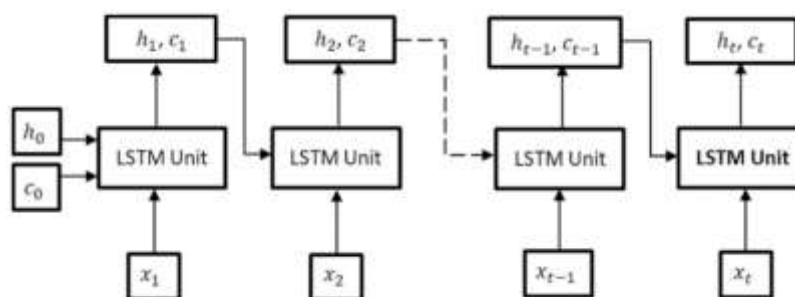
$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \quad (15)$$

$$h_t = \tanh(C_t) * O_t \quad (16)$$

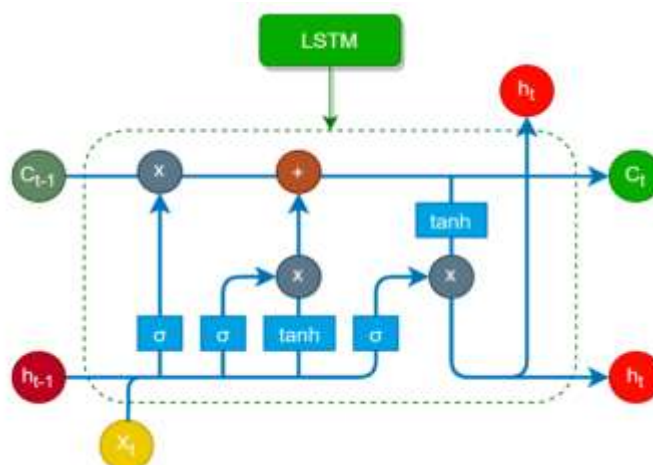
خاطر سپردن اطلاعات برای طولانی مدت روشی خاص می‌باشد که از چهار لایه تعاملی ضروری که روش‌های ارتباطی مختلفی با یکدیگر دارند تشکیل شده است. همچنین این روش از یک بلوک حافظه تشکیل شده است. که این بلوک‌ها سلول گفته می‌شود. به طوری که اطلاعات در یک سلول ذخیره شده و توسط دروازه‌های کنترل به سلول‌های دیگر منتقل می‌شود. با کمک این دروازه‌ها تجزیه و تحلیل اطلاعات به سادگی و بادقت انجام می‌شود. واحدهای LSTM یا بلوک‌ها بخشی از شبکه عصبی تکرار شونده هستند. شبکه عصبی تکرار شونده برای استفاده از فرایندهای حافظه مصنوعی که به این الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای شبیه‌سازی اندیشه انسان کمک می‌کنند می‌باشد.

بنابراین مزیت استفاده از LSTM این است که قادر است فرایندهای یادگیری متوالی نظارت‌شده را اجرا کند. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

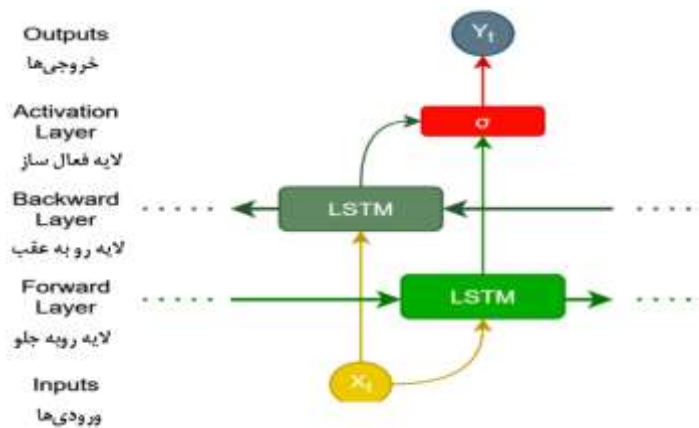
که داده‌های $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ به عنوان داده‌های ورودی برای ارزیابی، خروجی $H=(h_1, h_2, \dots, h_3)$ و سلول‌ها $C=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ می



شکل ۳- روش LSTM (Arslan & Sekertekin, 2019)
Figure 3- LSTM method (Arslan & Sekertekin, 2019)



شکل ۴- معماری روش LSTM (Crisóstomo de Castro Filho et al., 2020)
Figure 4- LSTM method architecture (Crisóstomo de Castro Filho et al., 2020)



شکل ۵- معماری روش BiLSTM (Crisóstomo de Castro Filho et al., 2020)
Figure 5- BiLSTM method architecture (Crisóstomo de Castro Filho et al., 2020)

که CDI^o مقادیر اصلی شاخص ترکیبی خشک سالی و CDI^r مقادیر بدست آمده از مدل‌ها می‌باشد CDI^o و CDI^r مقادیر متوسط داده‌های اصلی و داده‌های ساخته شده توسط مدل می‌باشد. در بررسی نیکویی برازش مدل‌ها مدلی که RMSE (میانگین جذر مربعات خطا) کمتر و R (همبستگی) و NSE (ضریب ناش ساتکلیف) بیشتری داشته باشند، مدل بهتری خواهد بود.

در این مطالعه از نمودارهای کورلوگرام، دیاگرام تیلور و نمودار ویولونی جهت ارزیابی بصری عملکرد مدل‌ها استفاده گردید. نمودار کورلوگرام یا ماتریس همبستگی به شکل یک ماتریس است که متغیرها در سطرها و ستون آن تکرار شده‌اند. قطر اصلی این ماتریس شامل هیستوگرام‌هایی برای بررسی توزیع آماری متغیرها و سایر درایه‌های آن شامل نمودارهای پراکندگی برای بررسی رابطه بین متغیرها هستند.

نمودار ویولونی ترکیبی از نمودار جعبه‌ای و نمودار چگالی می‌باشد که اوج‌ها و توزیع داده‌ها را نشان می‌دهد. عرض هر منحنی مربوط به فرکانس تقریبی نقاط داده در هر منطقه است. بنابراین، نقطه سفید در وسط نشانگر مقدار میانه و نوار سیاه ضخیم در وسط، محدوده بین ذره‌ای را نشان می‌دهد. خط سیاه نازک که از نوار سیاه گسترش می‌یابد، حداکثر و حداقل مقادیر را در داده نشان می‌دهد. از نمودارهای ویولون برای مقایسه توزیع بین چند گروه، در مدل‌های پیش‌بینی استفاده می‌شود (Hintz & Nelson, 1998).

دیاگرام تیلور نموداری است که ارزیابی مقایسه‌ای بین چندین مدل را آسان می‌کند. در این نمودار از ضریب همبستگی پیرسون، میانگین مربعات خطا و انحراف معیار برای اندازه‌گیری میزان تطابق بین رفتار داده‌های مدل شده و مشاهده شده استفاده می‌شود (Taylor, 2001).

که X_t به عنوان بردار ورودی، U_t و W_t پارامترهای آموزش و سیگما تابع فعال‌سازی می‌باشد. C_t و h_t به ترتیب خروجی سلول و خروجی لایه می‌باشند.

مدل BiLSTM

مدل BiLSTM یکی دیگر از انواع مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی بازگشتی می‌باشد. جزئیات روش در شکل ۵ نشان داده شده است. درواقع این مدل از دو لایه متصل برای پردازش لایه ورودی تشکیل شده است. یک لایه در جهت توالی داده‌ها و لایه دیگر در خلاف جهت توالی لایه‌ها اعمال می‌شود. در نهایت نتایج توسط روش‌های مختلف ادغام با یکدیگر ترکیب می‌شود (Fan et al., 2014).

در این پژوهش، در روش‌های LSTM و BiLSTM اندازه تکرار در هر دنباله سری زمانی ۲۰۰ و از بهینه ساز لحظه‌ای (Adam) برای آموزش شبکه استفاده شد.

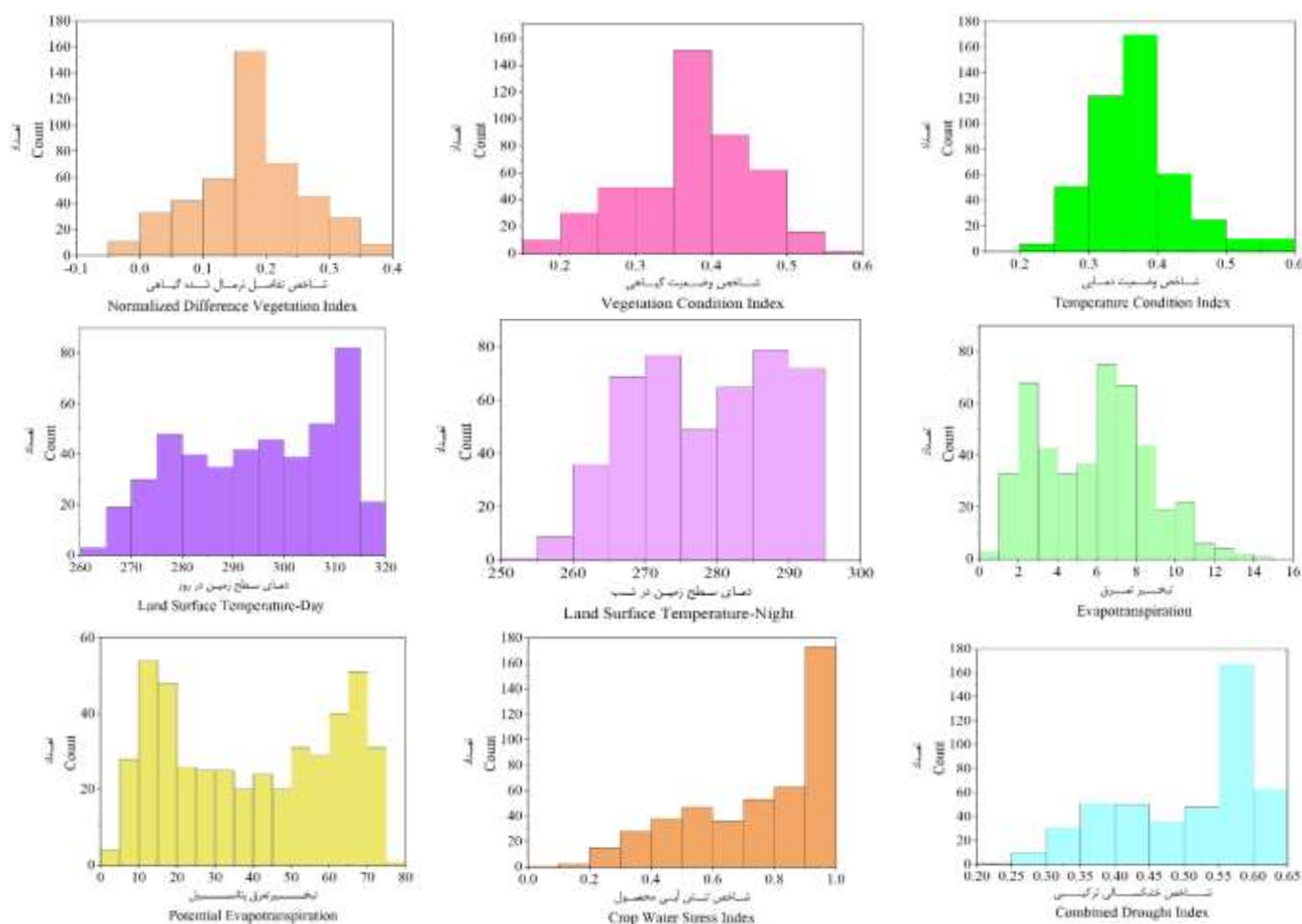
ارزیابی عملکرد مدل

به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های ارائه شده از روش‌های نموداری و محاسباتی استفاده شد. در روش‌های محاسباتی از پارامترهای مختلف ضریب همبستگی (Rao, 1973)، میانگین مربعات خطا (Nash) (Willmott & Matsuura, 2005) و ضریب ناش ساتکلیف (& Sutcliffe, 1970) برای ارزیابی نیکویی برازش استفاده شد.

$$R = \frac{\sum(CDI^o - \overline{CDI^o})(CDI^r - \overline{CDI^r})}{\sqrt{\sum(CDI^o - \overline{CDI^o})^2 \sum(CDI^r - \overline{CDI^r})^2}} \quad (17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(CDI^r - CDI^o)^2}{n}} \quad (18)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(CDI^r - CDI^o)^2}{\sum(CDI^o - \overline{CDI^o})^2} \quad (19)$$



شکل ۶- هیستوگرام داده‌های استفاده شده در منطقه مورد مطالعه

Figure 6- Histogram of the data used in the study area

نتایج و بحث

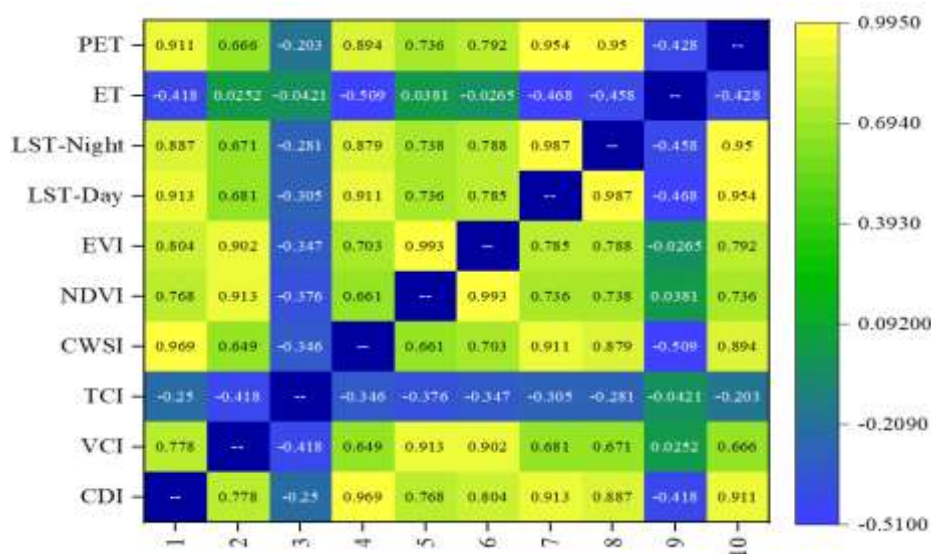
تصویر ۶ هیستوگرام داده‌های مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

از شکل ۶ مشاهده می‌شود که متغیرهای مورد استفاده در مدل سازی از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند. در روش‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی احتیاجی به نرمال بودن توزیع داده‌ها نمی‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های دمای سطح زمین در روز، دمای سطح زمین در شب و شاخص تنش آبی محصول CWSI و شاخص ترکیبی خشکسالی چوله به راست و داده‌های شاخص وضعیت گیاهی، شاخص وضعیت دمایی، تبخیر-تعرق و تبخیر-تعرق پتانسیل چوله به چپ می‌باشند. جهت بررسی دقت تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده ابتدا همبستگی بین داده‌های دمای سطح زمین در روز، دمای سطح زمین در شب با داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای متوسط روزانه در ۵ ایستگاه هواشناسی محاسبه گردید.

جهت انجام این پژوهش حوضه آبریز دریاچه ارومیه انتخاب شد. ابتدا تصاویر شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی، شاخص بهبود یافته گیاهی، تبخیر-تعرق، تبخیرتعرق پتانسیل، دمای سطح زمین در روز، دمای سطح زمین در شب برای سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ دانلود شد. پس از پیش پردازش و حذف قسمت‌های دارای ابرناکی سری زمانی مقادیر متوسط حوضه محاسبه و سپس شاخص‌های وضعیت گیاهی (VCI)، وضعیت دمایی (TCI) و شاخص تنش آبی محصول (CWSI) محاسبه و شاخص ترکیبی خشکسالی با استفاده از روش آنالیز مولفه‌های اصلی محاسبه گردید در نهایت مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی بر اساس ترکیب مختلفی از ورودی‌ها تحت عنوان سناریوهای مختلف و با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق انجام شد.

جدول ۳- همبستگی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی با داده‌های سنجش از دور
Table 3- Correlation of meteorological station data with remote sensing data

ایستگاه هواشناسی Station	داده Data	همبستگی Correlation		
		دما حداقل Tmin	دما حداکثر Tmax	دما متوسط Tmean
تبریز Tabriz	دمای سطح زمین در روز LST day	0.919	0.929	0.935
	دمای سطح زمین در شب LST night	0.945	0.956	0.960
	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI	0.672	0.671	0.677
ارومیه Urmia	دمای سطح زمین در روز LST day	0.920	0.934	0.947
	دمای سطح زمین در شب LST night	0.932	0.943	0.956
	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI	0.646	0.650	0.658
مراغه Maragheh	دمای سطح زمین در روز LST day	0.829	0.922	0.918
	دمای سطح زمین در شب LST night	0.870	0.947	0.948
	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI	0.562	0.592	0.597
مهاباد Mahabad	دمای سطح زمین در روز LST day	0.907	0.941	0.945
	دمای سطح زمین در شب LST night	0.920	0.947	0.953
	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI	0.591	0.611	0.616
تکاب Tekab	دمای سطح زمین در روز LST day	0.876	0.939	0.937
	دمای سطح زمین در شب LST night	0.907	0.947	0.956
	شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI	0.602	0.606	0.615



شکل ۷- نقشه همبستگی
Figure 7- Correlation map

جدول ۴- همبستگی شاخص‌ها

Table 4- Correlation

شاخص‌ها	CDI	VCI	TCI	CWSI	NDVI	LST Day	LSTNight	ET	PET
شاخص ترکیبی خشکسالی Combined Drought Index	1	0.778	-0.25	0.969	0.768	0.913	0.887	-0.418	0.911
شاخص وضعیت گیاهی Vegetation Condition Index	0.778	1	-0.418	0.649	0.913	0.681	0.671	0.025	0.666
شاخص وضعیت دمایی Temperature Condition Index	-0.25	-0.418	1	-0.346	-0.376	-0.305	-0.281	-0.042	-0.203
شاخص تنش آبی محصول Crop Water Stress Index	0.969	0.649	-0.346	1	0.661	0.911	0.879	-0.509	0.894
شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی Normalized Difference Vegetation Index	0.768	0.913	-0.376	0.661	1	0.736	0.738	0.038	0.736
دمای سطح زمین در روز Land Surface Temperature-Day	0.913	0.681	-0.305	0.911	0.736	1	0.987	-0.468	0.954
دمای سطح زمین در شب Land Surface Temperature-Night	0.887	0.671	-0.281	0.879	0.738	0.788	1	-0.458	0.950
تبخیر تعرق Evapotranspiration	-0.418	0.025	-0.042	-0.509	0.038	-0.468	-0.458	1	-0.428
تبخیر تعرق پتانسیل Potential Evapotranspiration	0.911	0.666	-0.203	0.894	0.736	0.954	0.950	-0.428	1

سطح زمین در روز و دمای سطح زمین در شب و شاخص وضعیت گیاهی دارد. و از سویی همبستگی منفی و معنی‌داری ۰/۲۵ و ۰/۴۱۸- با شاخص وضعیت دمایی و تبخیر تعرق دارد.

پس از محاسبه همبستگی بین داده‌ها، از ۳۸۶ تصویر، ۷۰ درصد داده‌ها تعداد ۲۷۰ تصویر برای آموزش مدل‌ها و ۳۰ درصد داده‌ها تعداد ۱۱۵ تصویر برای تست استفاده شد. جدول ۵ متغیرهای مختلف برای مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI را تحت عنوان سناریوهای ۱ تا ۶ نشان می‌دهد.

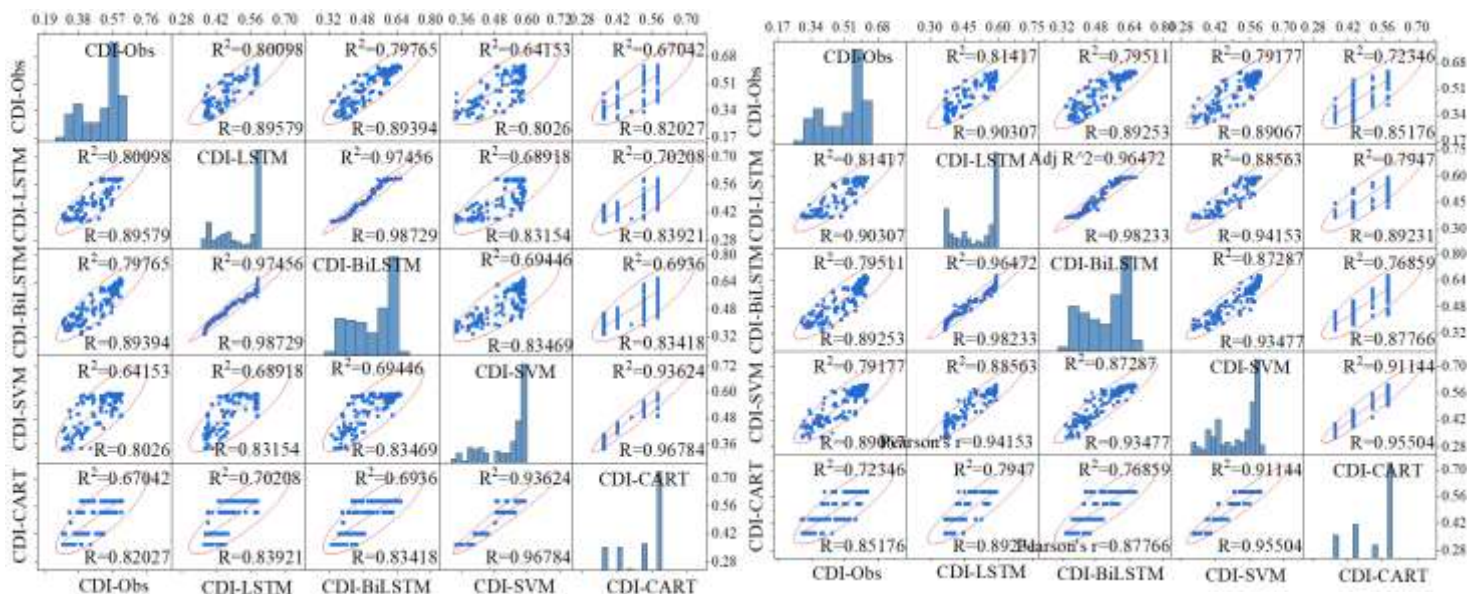
نتایج در جدول ۳ نشان داده شده‌است. همبستگی بالا بین داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی با تصاویر ماهواره‌ای دقت خوب سنجنده مودیس را در این منطقه نشان می‌دهد.

در مرحله بعد همبستگی مقادیر شاخص ترکیبی خشکسالی با دیگر شاخص‌ها محاسبه گردید. در تصویر ۷ و جدول ۴ همبستگی برای مقادیر متوسط شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود شاخص ترکیبی خشکسالی CDI همبستگی بسیار بالایی ۰/۹۱۳ و ۰/۸۸۷ و ۰/۷۷۸ با داده‌های دمای

جدول ۵- متغیرهای ورودی جهت مدل‌سازی شاخص CDI

Table 5- Input variables for CDI index modeling

سناریو Scenario	تعداد متغیرها Number of variables	NDVI	EVI	LST-Day	LST-Night	ET	PET
1	1	✓					
2	2	✓	✓				
3	3	✓	✓	✓			
4	4	✓	✓	✓	✓		
5	5	✓	✓	✓	✓	✓	
6	6	✓	✓	✓	✓	✓	✓



شکل ۸- ماتریس همبستگی سناریو ۱ (سمت چپ) و سناریو ۲ (سمت راست)
Figure 8- Correlation matrix of scenario 1 (left side) and scenario 2 (right side)

مدل برای پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی می‌باشد. و پس از آن مدل SVM با ضریب همبستگی ۰/۹۴ به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. مدل‌های LSTM و BiLSTM با ضریب همبستگی ۰/۹ همبستگی کم‌تری نسبت به مدل‌های SVM و CART از خود نشان داده است.

جدول ۶ خلاصه نتایج مدل‌سازی سناریوهای مختلف با روش‌های LSTM، BiLSTM، SVM و DT-CART برای منطقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

همانطور که از **جدول ۶** نیز مشاهده می‌شود تمامی مدل‌ها با دقت قابل‌قبولی شاخص ترکیبی خشکسالی را مدل نموده‌اند ولی از میان تمامی روش‌ها مدل SVM و CART در سناریوهای ۵ و ۶ با مقدار جذر میانگین مربعات خطا کمتر و ضریب همبستگی بیشتر مدل توانمندتری در پیش‌بینی سری‌زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی می‌باشند.

همچنین از بین تمامی سناریوها سناریو ۶ با مقدار خطای کمتر (۰/۰۲۹) و همبستگی بیشتر (۰/۹۶) و ضریب ناش ساتکلیف بیشتر (۰/۹۲) موثرترین متغیرهای ورودی جهت پیش‌بینی مقادیر CDI را دارا می‌باشند.

در **شکل‌های ۱۱ تا ۱۳** برازش سری‌زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI برای داده‌های صحت‌سنجی توسط مدل‌های مختلف و سناریوهای مختلف در محدوده مورد مطالعه نشان داده شده است. با بررسی تصاویر ۱۱ تا ۱۳ مشاهده می‌شود که تمامی روش‌ها دقت مناسبی در مدل‌سازی و پیش‌بینی سری‌زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی دارند.

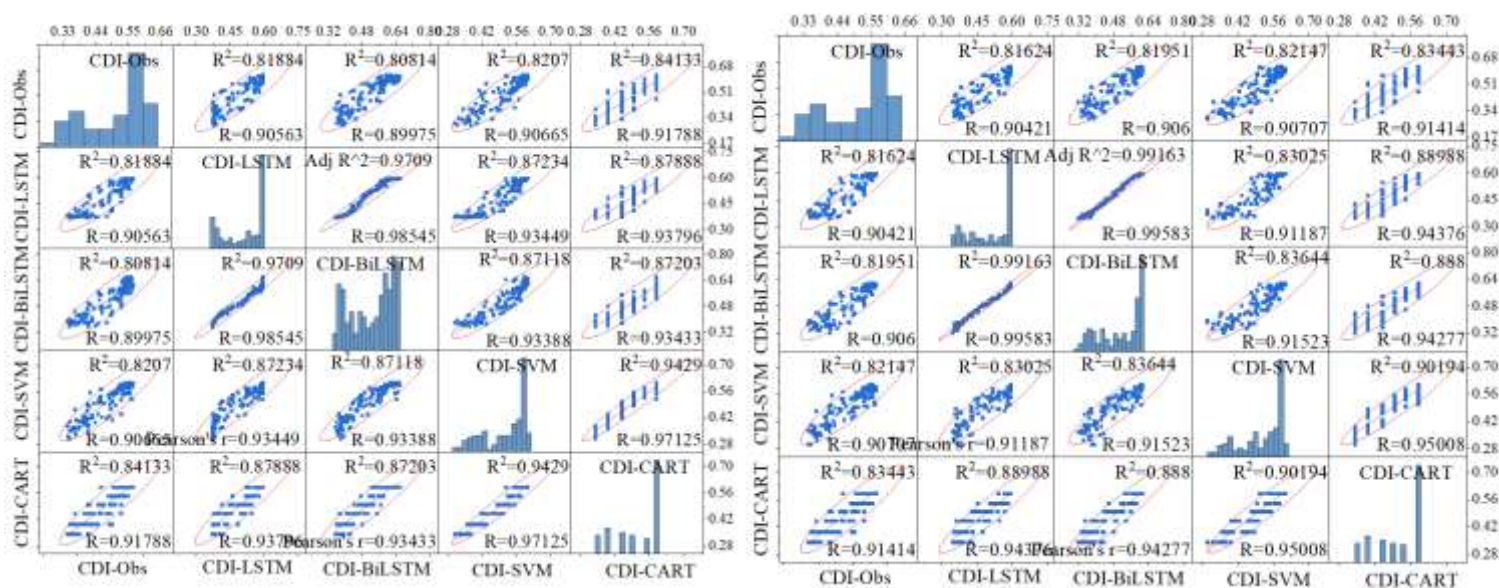
پس مدل‌سازی سناریوها با روش‌های DT-CART، SVM، LSTM و BiLSTM انجام شد که نتایج آن در **شکل‌های ۸ تا ۱۰** نشان داده شده‌است.

در **تصویر ۸** ماتریس همبستگی مدل‌های مختلف در سناریوهای ۱ و ۲ آورده شده است.

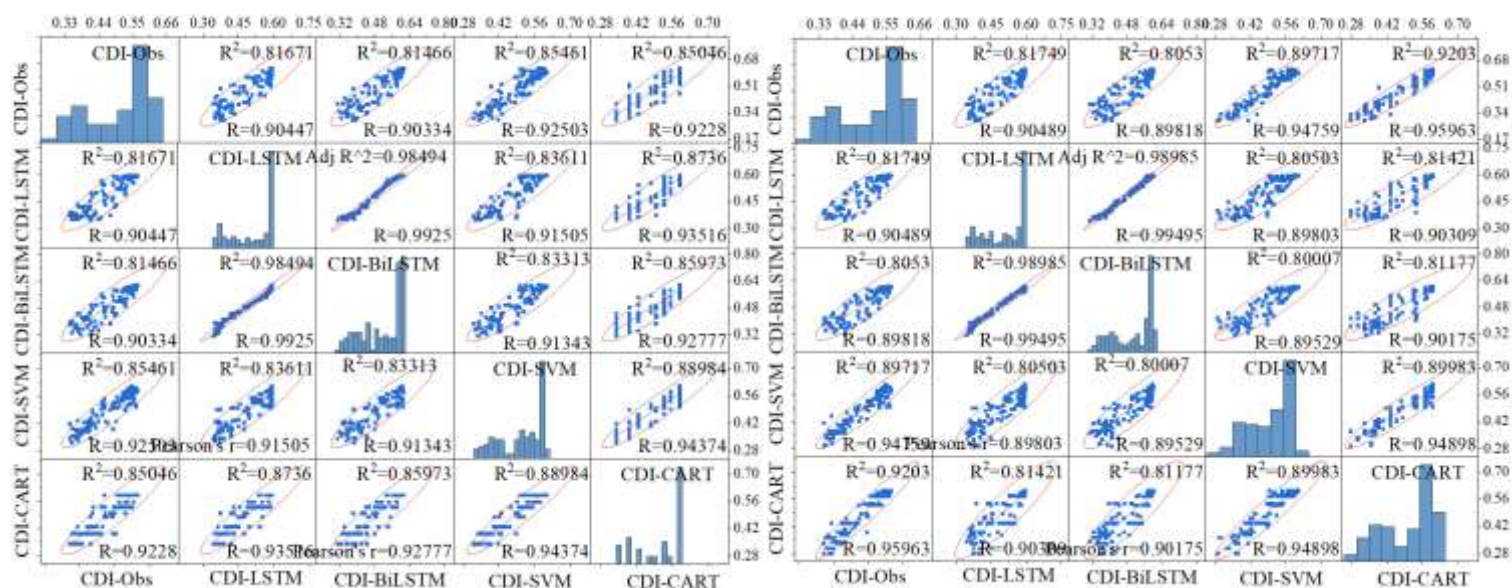
همانطور که در **شکل ۸** مشخص می‌شود در سناریو ۱ که تنها داده ورودی به مدل‌سازی شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی NDVI می‌باشد، مدل‌ها همبستگی کم‌تری نسبت به سناریو ۲ که داده‌های شاخص بهبود یافته گیاهی نیز به عنوان ورودی به مدل در نظر گرفته شده‌اند، دارند. در سناریو ۱ مدل‌های LSTM و BiLSTM با همبستگی ۰/۸۹ بهترین مدل‌ها انتخاب گردید. در سناریو ۲ مدل LSTM با ضریب همبستگی ۰/۹ بهترین برازش را برای پیش‌بینی داده‌های CDI با متغیر ورودی شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی و شاخص بهبود یافته گیاهی از خود نشان داد.

باتوجه به **شکل ۹** در سناریو ۳ با اضافه شدن متغیر ورودی دمای سطح زمین در روز مدل‌های LSTM و SVM با ضریب همبستگی ۰/۹۱ و مدل CART با ضریب همبستگی ۰/۹۲ پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی را انجام داده‌اند ولی در سناریو ۴ با اضافه شدن متغیر دمای سطح زمین در شب به ورودی‌های مدل دقت برازش‌ها تغییر قابل ملاحظه‌ای نداشته‌است.

باتوجه به **شکل ۱۰** در سناریو ۵ با اضافه شدن تبخیر-تعرق به عنوان متغیر ورودی مدل‌های CART و SVM با ضریب همبستگی ۰/۹۲ با دقت تقریباً یکسانی پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی را انجام داده‌اند. سناریو ۶ با اضافه شدن متغیر تبخیر-تعرق پتانسیل به داده‌های ورودی مشاهده شد که مدل CART با ضریب ۰/۹۶ بهترین



شکل ۹- ماتریس همبستگی سناریو ۳ (سمت چپ) و سناریو ۴ (سمت راست)
Figure 9- Correlation matrix of scenario 3 (left) and scenario 4 (right)

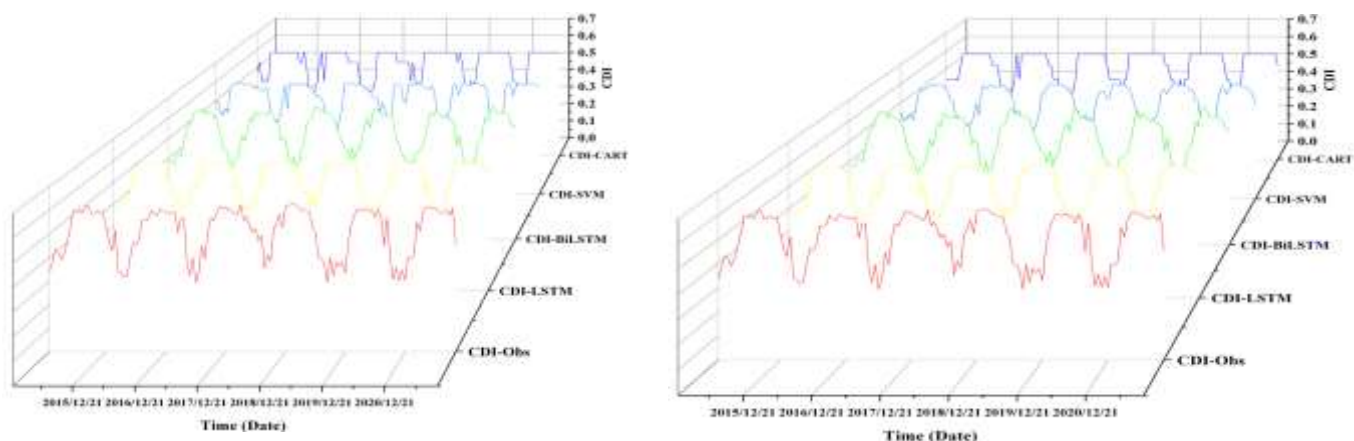


شکل ۱۰- ماتریس همبستگی سناریو ۵ (سمت چپ) و سناریو ۶ (سمت راست)
Figure 10- Correlation matrix of scenario 5 (left) and scenario 6 (right)

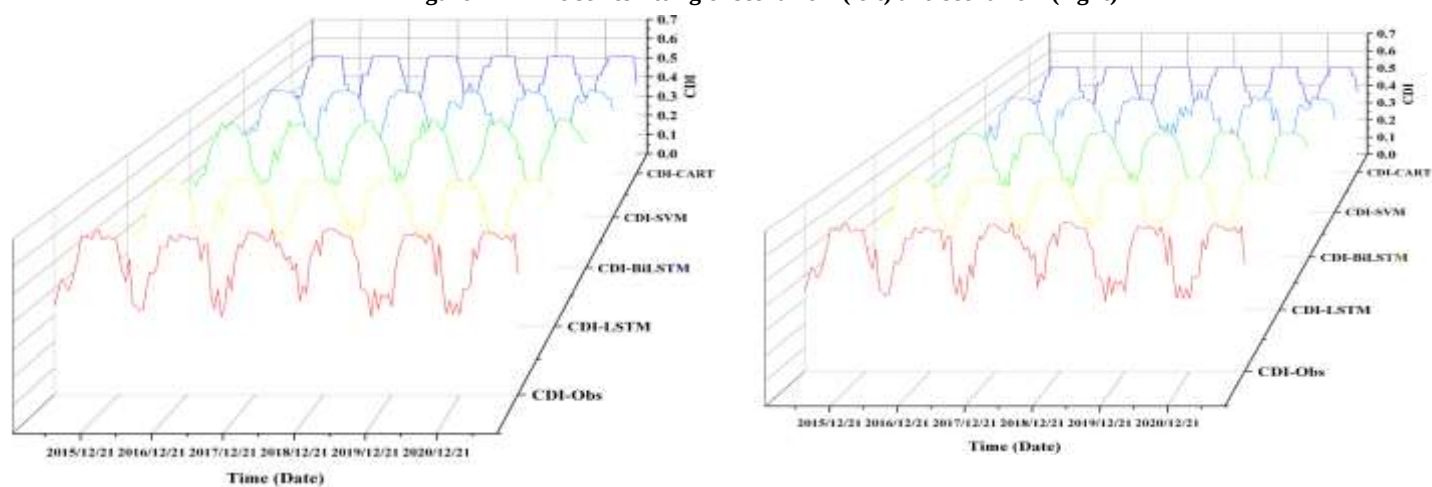
جدول ۶- خلاصه نتایج مدل سازی شاخص CDI با استفاده از مدل‌های مختلف

Table 6- summarizes the results of CDI index modeling using different models

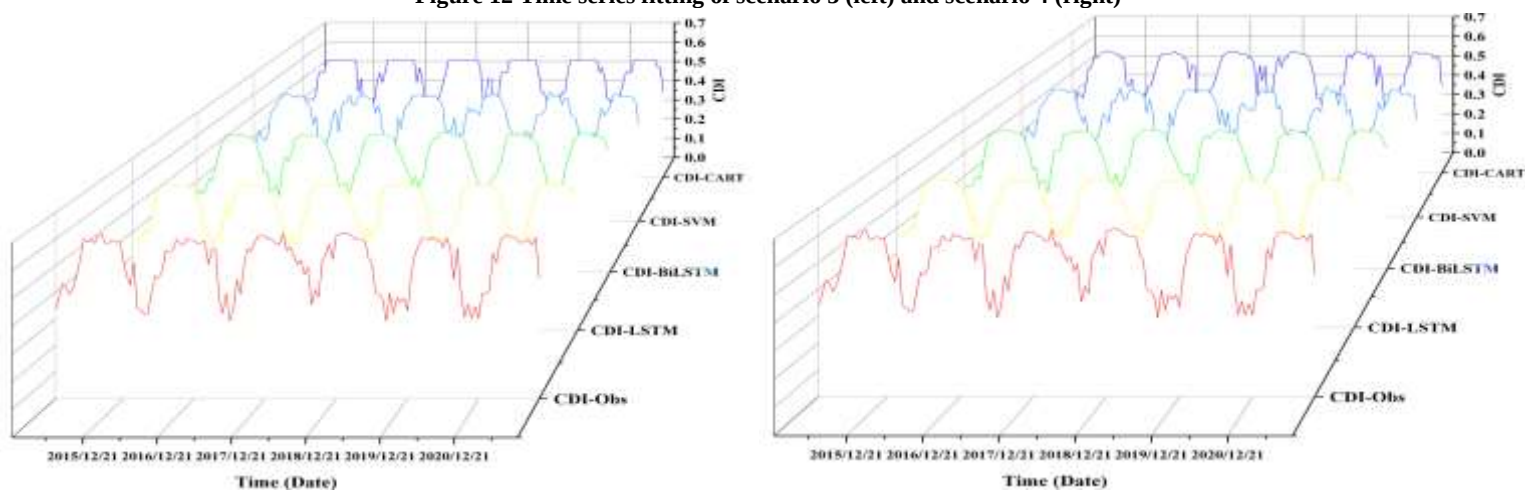
سناریو Scenario	CART			SVM			BiLSTM			LSTM		
	NSE	R	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R	RMSE	NSE	R	RMSE
1	0.64	0.82	0.061	0.61	0.80	0.063	0.56	0.85	0.105	0.83	0.89	0.045
2	0.71	0.85	0.055	0.79	0.89	0.047	0.75	0.89	0.050	0.81	0.90	0.044
3	0.84	0.92	0.041	0.81	0.91	0.044	0.76	0.90	0.050	0.82	0.91	0.044
4	0.83	0.91	0.042	0.81	0.91	0.044	0.81	0.91	0.044	0.82	0.90	0.044
5	0.85	0.92	0.040	0.85	0.92	0.040	0.81	0.90	0.044	0.81	0.90	0.044
6	0.92	0.96	0.029	0.88	0.94	0.034	0.80	0.90	0.045	0.81	0.90	0.044



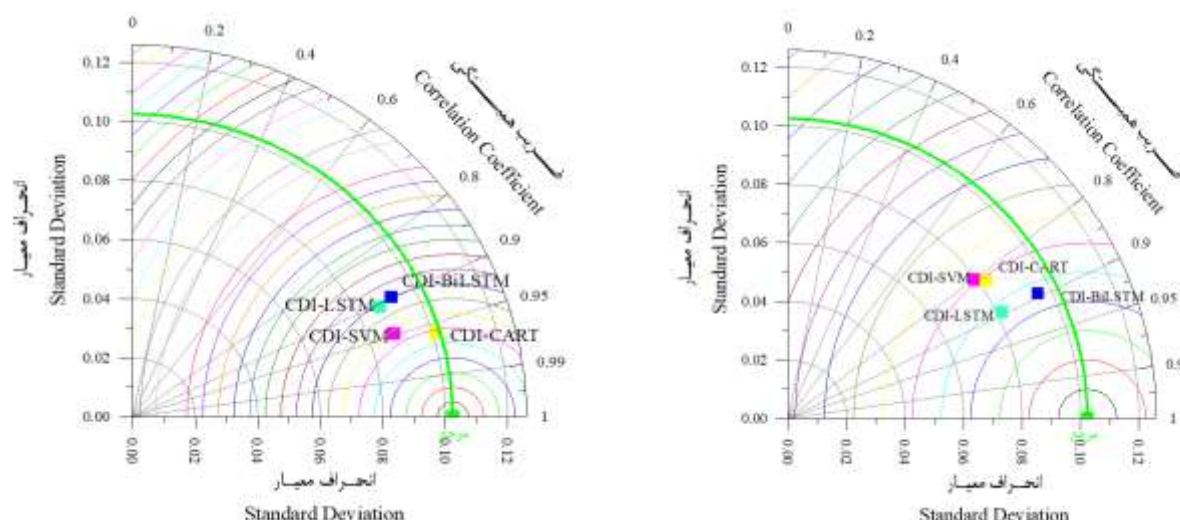
شکل ۱۱- برازش سری زمانی سناریو ۱ (سمت چپ) و سناریو ۲ (سمت راست)
Figure 11- Time series fitting of scenario 1 (left) and scenario 2 (right)



شکل ۱۲- برازش سری زمانی سناریو ۳ (سمت چپ) و سناریو ۴ (سمت راست)
Figure 12 Time series fitting of scenario 3 (left) and scenario 4 (right)



شکل ۱۳- برازش سری زمانی سناریو ۵ (سمت چپ) و سناریو ۶ (سمت راست)
Figure 13- Time series fitting of scenario 5 (left) and scenario 6 (right)



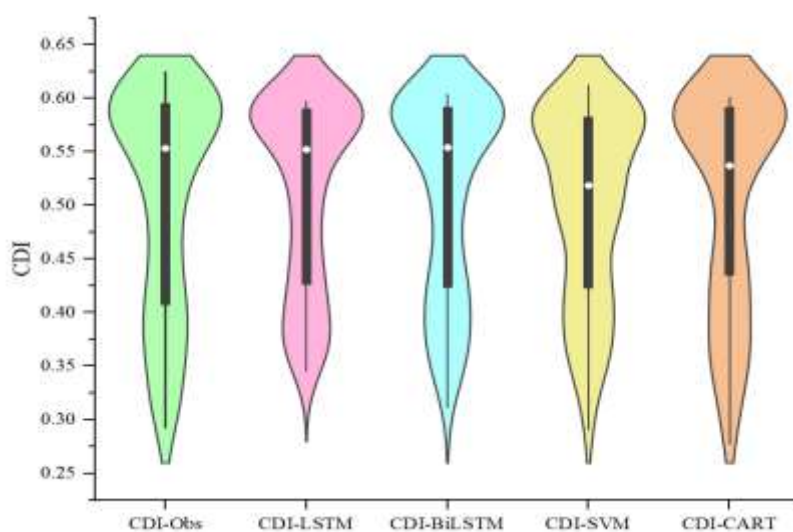
شکل ۱۴- دیاگرام تیلور سناریو ۶ (سمت چپ) و سناریو ۱ (سمت راست)
Figure 14- Taylor diagram of scenario 6 (left) and scenario 1 (right)

بالایی در پیش‌بینی خشکسالی را داشته‌اند. ژو و همکاران (Zhu et al., 2021) نشان داد که روش SVM با توابع کرنل RBF روش توانمند در پیش‌بینی رطوبت خاک و خشکسالی منطقه می‌باشند. در مطالعه‌ای دیگر (Rhif et al., 2020) عملکرد خوب روش LSTM و BiLSTM را در سری زمانی شاخص گیاهی نشان داد. کماسی و شرقی (Komasi & Sharghi, 2017) به پیش‌بینی خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی و شاخص SPI پرداختند و نشان دادند که مدل ترکیبی ماشین بردار پشتیبان موجکی در مقایسه با مدل منفرد ماشین بردار پشتیبان توانایی بسیاری در پیش‌بینی سری زمانی شاخص SPI دارد. کریمزادگان و همکاران (Karimzadegan et al., 2018) به بررسی کارایی مدل‌های شبکه بیزین و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی تراز سطح دریاچه ارومیه با استفاده از پارامترهای تبخیر، بارش، دما، باد، میانگین رطوبت هوا، رواناب ورودی و تراز سطح آب دریاچه پرداختند و عملکرد بهتر مدل حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با شبکه بیزین را نشان دادند.

در شکل ۱۵ نمودار ویولونی داده‌ها برای بهترین سناریو (سناریو ۶) نشان داده شده‌است.

جهت بررسی بهتر عملکرد مدل‌ها از دیاگرام تیلور استفاده شد. با مشاهده مقادیر بدست‌آمده در جدول ۶ سناریو ۱ به‌عنوان بدترین و سناریو ۶ بهترین سناریو انتخاب شدند و در نهایت دیاگرام تیلور برای سناریو ۱ و ۶ در شکل ۱۴ نشان داده شده‌است.

همانطور که ملاحظه می‌شود در سناریو ۶، مدل‌های SVM و CART عملکرد بسیار نزدیک به هم دارند و نزدیک‌ترین مدل به داده‌های مشاهداتی می‌باشد. ولی مدل‌های BiLSTM و LSTM بر خلاف انتظار عملکرد نسبتاً ضعیف‌تری در مقایسه با روش‌های یادگیری ماشین در سناریوهای مختلف از خود نشان داده‌اند. در این مطالعه از روش‌های هوش مصنوعی برای پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی استفاده شد. همانطور که مشاهده شد متغیرهایی مانند متغیرهای دمای روز و دمای شب سطح زمین، تبخیر-تعرق و تبخیر-تعرق پتانسیل عملکرد خوبی بر بهبود پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی داشتند. به‌طور کلی تمامی روش‌ها با دقت مناسبی شاخص ترکیبی خشکسالی را مدل کرده‌اند نتایج بدست‌آمده با نتایج بدست آمده توسط پژوهشگران دیگر همخوانی داشت (Reddy & Prasad, 2018). شریفی پور و همکاران (Sharifi pour et al., 2021)، به پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و چهار روش هوش مصنوعی شامل یادگیری عمیق، الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، ماشین بردار پشتیبان چند طبقه و درخت تصمیم پرداختند. و نشان دادند که تمامی شبکه‌ها توانایی



شکل ۱۵- نمودار ویولونی مدل‌ها (سناریو ۶)
Fig 15- Violin diagram of models (scenario 6)

این پژوهش نشان داد که ترکیب داده‌های ماهواره‌ای مختلف شامل داده‌های دمای سطح زمین در روز و در شب، تبخیر-تعرق، تبخیر-تعرق پتانسیل و شاخص تفاضل نرمال شده گیاهی به عنوان ورودی مدل‌های یادگیری عمیق و یادگیری ماشین می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI گردد. در این پژوهش ترکیب‌های مختلفی از متغیرهای ورودی مستخرج از محصولات تصاویر ماهواره‌ای در قالب ۶ سناریوی مستقل جهت پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی ترکیب‌های مختلف متغیرهای ورودی به مدل‌ها نشان داد افزودن متغیرهای دمای سطح زمین در روز و شب به سناریوی اول و دوم (که تنها شامل شاخص‌های گیاهی بود)، باعث افزایش دقت (از همبستگی ۰/۸۲ به ۰/۹۰) پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی در همه روش‌ها به ویژه مدل‌های SVM و CART می‌گردد. بنابراین مشخص گردید که در حوضه آبریز دریاچه ارومیه متغیر دمای سطح زمین در روز و شب متغیرهای موثری در پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی می‌باشند. با بررسی پارامترهای ارزیابی شامل ضریب همبستگی، ضریب ناش ساتکلیف و جذر میانگین مربعات خطا مشخص شد که هر چهار روش با دقت و خطای قابل‌قبولی می‌توانند، شاخص ترکیبی خشکسالی را تخمین بزنند. به‌طوری‌که از میان همه روش‌ها روش CART عملکرد بهتری (همبستگی ۰/۹۶ و جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۲۹) نسبت به سایر روش‌ها برای پیش‌بینی سری زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI داشت.

با بررسی نتایج مشخص شد که روش SVM نیز با دقت قابل‌قبولی (همبستگی ۰/۹۴ و جذر میانگین مربعات خطا ۰/۰۳۴) توانسته است مدل‌سازی شاخص ترکیبی خشکسالی را انجام دهد. اما برخلاف انتظار دو روش یادگیری عمیق با دقت کمتری (همبستگی ۰/۹۰)

باتوجه به نمودار ویولونی داده‌ها (شکل ۱۵)، مشاهده می‌شود کلیه مدل‌ها کم و بیش دارای توزیع یکسان و مشابه با داده‌های مشاهداتی شاخص ترکیبی خشکسالی می‌باشند.

همانطور که ملاحظه می‌شود حداقل مقدار بدست‌آمده از تمامی مدل‌ها حدود ۰/۲۵ است که با داده‌های مشاهداتی منطبق می‌باشد. از سویی میانه داده‌ها در مدل‌های LSTM، BiLSTM و CART نیز بسیار نزدیک به میانه داده‌های مشاهداتی می‌باشد. در صورتی که میانه داده‌ها در روش SVM مقدار کمتری را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از گسترده‌ترین بلایای طبیعی در جهان می‌باشد که منجر به تهدیدهای جدی برای امنیت آب و غذا و به‌طور بالقوه موجب کاهش عملکرد محصول می‌شود. یکی از عوامل خشکسالی کاهش عملکرد محصول می‌باشد که به مرحله رشد گیاه در زمان وقوع خشکسالی بستگی دارد. بنابراین خشکسالی می‌تواند اثرات مختلفی در مراحل مختلف رشد از خود باقی بگذارد. برای نظارت و ارزیابی عملکرد محصول، بدست‌آوردن سری‌زمانی دقیق خشکسالی بسیار ضروری می‌باشد. حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌علت شرایط اقلیمی و اجتماعی مناسب، بخش وسیعی از فعالیت‌های اقتصادی در آن به کشاورزی اختصاص یافته‌است. از این‌رو در این مطالعه به بررسی روش‌های مختلف یادگیری ماشین و یادگیری عمیق مانند CART، DT، SVM، LSTM و BiLSTM برای پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS پرداخته‌شد که تاکنون در منطقه مورد مطالعه انجام نشده‌است.

خشکسالی به‌خصوص در حوضه‌های فاقد آمار استفاده نمود. در نهایت استفاده از سنجنده‌هایی با قدرت تفکیک بالا از جمله Sentinel می‌تواند در بهبود نتایج پیش‌بینی شاخص ترکیبی خشکسالی و ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی کشاورزی و مدیریت مؤثر و بهنگام خشکی مفید باشد.

نسبت به روش‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند شاخص ترکیبی خشکسالی را مدل‌سازی نمایند. به‌طور کلی با بررسی نتایج مشخص شد که با روش ارائه شده در این پژوهش می‌توان با دقت مناسبی سری‌زمانی شاخص ترکیبی خشکسالی CDI را پیش‌بینی نمود و به ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی در دوره‌های مختلف رشد گیاه پرداخت و از نتایج آن برای مدیریت و سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای

منابع

1. AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452-480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
2. Arslan, N., & Sekertekin, A. (2019). Application of long short-term memory neural network model for the reconstruction of MODIS Land Surface Temperature images. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 194, 105100. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105100>
3. Babajafari, H., Paimazd, Sh., Moghadasi, M., & Hosseinivardanjani, M. (2022). Assessment monitoring spatio-temporal of drought lake Urmia basin using ETDI remote sensing index and SPI ground index. *Journal of Water and Soil Science*, 26(3), 281-302
4. Balti, H., Abbas, A.B., Mellouli, N., Farah, I.R., Sang, Y., & Lamolle, M. (2020). A review of drought monitoring with big data: Issues, methods, challenges and research directions. *Ecological Informatics*, 60, 101136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101136>
5. Boser, B.E., Guyon, I.M., & Vapnik, V.N. (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory. <https://doi.org/10.1145/130385.130401>
6. Breiman, L., Friedman, J., Stone, C.J., & Olshen, R.A. (1984). *Classification and regression trees*. CRC press .
7. Crisóstomo de Castro Filho, H., Abílio de Carvalho Júnior, O., Ferreira de Carvalho, O.L., Pozzobon de Bem, P., dos Santos de Moura, R., Olinio de Albuquerque, A., Rosa Silva, C., Guimarães Ferreira, P.H., Fontes Guimarães, R., & Trancoso Gomes, R.A. (2020). Rice crop detection using LSTM, Bi-LSTM, and machine learning models from Sentinel-1 time series. *Remote Sensing*, 12(16), 2655. <https://doi.org/10.3390/rs12162655>
8. Cunha, R.L., Silva, B., & Netto, M.A. (2018). A scalable machine learning system for pre-season agriculture yield forecast. 2018 IEEE 14th International Conference on e-Science (e-Science) , <https://doi.org/10.1109/eScience.2018.00131>
9. Dang, C., Liu, Y., Yue, H., Qian, J., & Zhu, R. (2020). Autumn crop yield prediction using data-driven approaches: support vector machines, random forest, and deep neural network methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/07038992.2020.1833186>
10. Elbeltagi, A., Kumari, N., Dharpure, J.K., Mokhtar, A., Alsafadi, K., Kumar, M., Mehdinejadani, B., Ramezani Etedali, H., Brouziyne, Y., & Towfiqul Islam, A.R.M. (2021). Prediction of combined terrestrial evapotranspiration index (CTEI) over large river basin based on machine learning approaches. *Water*, 13(4), 547. <https://doi.org/10.3390/w13040547>
11. Fan, Y., Qian, Y., Xie, F.-L., & Soong, F.K. (2014). TTS synthesis with bidirectional LSTM based recurrent neural networks. Fifteenth annual conference of the international speech communication association.
12. Guzmán, S.M., Paz, J.O., Tagert, M.L.M., Mercer, A.E., & Pote, J.W. (2018). An integrated SVR and crop model to estimate the impacts of irrigation on daily groundwater levels. *Agricultural Systems*, 159, 248-259. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.017>
13. Heim Jr, R.R., & Brewer, M.J. (2012). The global drought monitor portal: The foundation for a global drought information system. *Earth Interactions*, 16(15), 1-28. <https://doi.org/10.1175/2012EI000446.1>
14. Hintz, J.L., & Nelson, R.D. (1998). Violin plots: A box plot-density trace synergism. *The American Statistician*, 52(2), 181-184 .
15. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
16. Hu, Y., & Dong, Y. (2018). An automatic approach for land-change detection and land updates based on integrated NDVI timing analysis and the CVAPS method with GEE support. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146, 347-359. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.10.008>
17. Jackson, R.D., Kustas, W.P., & Choudhury, B.J. (1988). A reexamination of the crop water stress index. *Irrigation Science*, 9, 309-317.
18. Karimzadegan, S., Behmanesh, J., & Rezaie, H. (2018). Application of bayesian network and LS-SVM methods in predicting water surface level of Urmia Lake. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(3), 2018.

19. Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., & Ebadi Nehari, Z. (2019). Evaluation of MODIS and TRMM satellite data for drought monitoring in the Urmia lake basin. *Journal of Geography and Environmental Planning*, 30(2), 74.
20. Kogan, F.N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76(5), 655-668. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
21. Komasi, M., & Sharghi, S. (2020). Drought forecasting using wavelet-support vector machine and standardized precipitation index (Case study: Urmia Lake-Iran). *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(7), 83-101.
22. Khosravi, I., Akhundzadeh, M., & Khoshgovtar, M. (2015). Modeling and forecasting the time series of drought indicators with machine learning methods in order to manage risks (case study: Eastern region of Isfahan). *Environmental Risk Management*, 2(1), 51-65. (In Persian with English abstract)
23. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
24. Li, X., Yuan, W., & Dong, W. (2021). A machine learning method for predicting vegetation indices in China. *Remote Sensing*, 13(6), 1147. <https://doi.org/10.3390/rs13061147>
25. Maroufpoor, S., Maroufpoor, E., Bozorg-Haddad, O., Shiri, J., & Yaseen, Z.M. (2019). Soil moisture simulation using hybrid artificial intelligent model: Hybridization of adaptive neuro fuzzy inference system with grey wolf optimizer algorithm. *Journal of Hydrology*, 575, 544-556. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.045>
26. Mohammadi, H., Nasiri Kashani, K., Maleki, S., & Rostami, H. (2018). Identify and prioritize the factors affecting on the drying of Urmia Lake with Integrated Fuzzy DEMATEL; Analytic Network Process (F.D.ANP). *Emergency Management*, 7(1), 13-26.
27. Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
28. Nay, J., Burchfield, E., & Gilligan, J. (2018). A machine-learning approach to forecasting remotely sensed vegetation health. *International Journal of Remote Sensing*, 39(6), 1800-1816. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410296>
29. Niasati, Z., Ebadi, H., & Kayani, A. (2021). Estimation of reference evaporation and transpiration using remote sensing data in Hamadan Bahar Plain. *Iran Water Research*, 15(4), 45-58. (In Persian with English abstract)
30. Prodhan, F.A., Zhang, J., Hasan, S.S., Sharma, T.P.P., & Mohana, H.P. (2022). A review of machine learning methods for drought hazard monitoring and forecasting: Current research trends, challenges, and future research directions. *Environmental Modelling & Software*, 149, 105327.
31. Qian, Y., Zhou, W., Yan, J., Li, W., & Han, L. (2015). Comparing machine learning classifiers for object-based land cover classification using very high resolution imagery. *Remote Sensing*, 7(1), 153-168. <https://doi.org/10.3390/rs70100153>
32. Rao, C. (1973). 10.1002/9780470316436, John Wiley and Sons, New York.
33. Rezaei Moghadam, M.H., Valizadehkamran, Kh., Rostamzadeh, H., & Rezaei, A. (2012) Evaluation of the efficiency of MODIS sensor data in estimating drought (Case study: Urmia Lake catchment). *Geography and Environmental Sustainability*, 5: 37-52.
34. Reddy, D.S., & Prasad, P.R.C. (2018). Prediction of vegetation dynamics using NDVI time series data and LSTM. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 409-419.
35. Rhif, M., Abbes, A.B., Martinez, B., & Farah, I.R. (2020). A deep learning approach for forecasting non-stationary big remote sensing time series. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(22), 1-11.
36. Sattari, M.T., Apaydin, H., Ozturk, F., & Baykal, N. (2012). Application of a data mining approach to derive operating rules for the Eleviyan irrigation reservoir. *Lake and Reservoir Management*, 28(2), 142-152. <https://doi.org/10.1080/07438141.2012.678927>
37. Sharifipour, L., Ghanei-Bafghi, M., Kosari, M., & Sharifipour, S. (2021). Comparing the efficiency of four artificial intelligence methods in drought prediction. *Scientific Journal System*, 8(3), 139-156. (In Persian with English abstract)
38. Shamloo, N., Sattari, M.T., & Apaydin, H. (2022). Agricultural drought survey using MODIS-based image indices at the regional scale: case study of the Urmia Lake Basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1-2), 39-51.
39. Shen, R., Huang, A., Li, B., & Guo, J. (2019). Construction of a drought monitoring model using deep learning based on multi-source remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.006>
40. Shao, Y., & Lunetta, R.S. (2012). Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 70, 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.04.001>
41. Smith, L. (2002). *A Tutorial on Principal Components Analysis*. Page 1-26.
42. Taylor, K.E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
43. Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing*

- of *Environment*, 8(2), 127-150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
44. Vapnik, V.N. (1995). The nature of statistical learning. Theory.
45. Willmott, C.J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79-82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
46. Winkler, K., Gessner, U., & Hochschild, V. (2017). Identifying droughts affecting agriculture in Africa based on remote sensing time series between 2000–2016: rainfall anomalies and vegetation condition in the context of ENSO. *Remote Sensing*, 9(8), 831. <https://doi.org/10.3390/rs9080831>
47. Yin, J., Zhan, X., Hain, C.R., Liu, J., & Anderson, M.C. (2018). A method for objectively integrating soil moisture satellite observations and model simulations toward a blended drought index. *Water Resources Research*, 54(9), 6772-6791. <https://doi.org/10.1029/2017WR021959>
48. Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G.-S., Zhang, L., Xu, F., & Fraundorfer, F. (2017). Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(4), 8-36. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2017.2762307>



Analysis of Crop Precipitation and Its Extreme Events in Markazi Province During the Statistical Period of 1991-1992 to 2020-2021

S. Khansalari^{1*}, M. Omid², M. Fallahzadeh³

1- Assistant Professor in Meteorology, Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: Khansalari@yahoo.com)

2 and 3- Markazi Province Meteorological Administration, Arak, Iran

Received: 13-09-2023
Revised: 28-10-2023
Accepted: 07-11-2023
Available Online: 07-11-2023

How to cite this article:

Khansalari, S., Omid, M., & Fallahzadeh, M. (2023). Analysis of Crop Precipitation and its Extreme Events in Markazi Province during the Statistical Period of 1991-1992 to 2020-2021. *Journal of Water and Soil*, 37(5), 809-828. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84421.1332>

Introduction

Due to global warming and climate change, droughts and extreme precipitation events are increasing. Therefore, it is of special importance to know the characteristics of precipitation in the region in order to manage water resources effectively especially during torrential rainfall events. This can help to reduce the risk of these events and increase water reserves with proper management. These precipitation characteristics which are the objectives of the present study, include the temporal-spatial distribution of precipitation in different parts of the study area, as well as the number of days with and without precipitation and the maximum precipitation occurring in the region. Also, these precipitation characteristics should give us information about extreme precipitation events.

Materials and Methods

This research analyzed the characteristics of precipitation in Markazi province over a 30-year period (from the crop year 1991-1992 to 2020-2021) using statistical methods and the spatial distribution was drawn and analyzed with ArcGIS software. This province includes the 12 meteorological stations of Arak, Mahalat, Saveh, Tafresh, Ashtijan, Komeijan, Khondab, Shazand, Khomein, Delijan, Farmahin and Gharqabad, which the precipitation data of these stations were investigated. The trend of precipitation changes in monthly, seasonal, and annual time scales were also examined using the Mann-Kendall test. Moreover, extreme precipitation was assessed using four indices: total extreme precipitation (R95p), number of days with precipitation above the station's extreme precipitation threshold (R95d), absolute intensity of extreme precipitation (AEPI) and the fraction of total rainfall from events exceeding the extreme threshold (R95pT). The latter index represents the ratio of extreme precipitation to annual precipitation in rainy days (daily rainfall above 1 mm).

Results and Discussion

This study reveals that, on average, 53% of the annual precipitation is accounted for by the maximum index of R95pT, which indicates the percentage of extreme precipitation that occurred at each station relative to its the precipitation of the corresponding year. Knowing the timing of these extreme events can help to manage floods and optimize water resources. More than 20% of these precipitations occurred in March. The spatial distribution of rainfall in Markazi province shows that the south-west regions have the highest average annual and seasonal rainfall, except for the summer season, while the eastern regions have the lowest. The winter season has the highest rainfall on average, followed by spring and autumn. March is the rainiest month with a coefficient of variation of 0.8 and an average



©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.2023.84421.1332>

monthly rainfall of 55.6 mm during the studied period. Due to most extreme precipitation events occurring in this month, it has the highest importance for water storage and management throughout the year. The average precipitation in March ranges from 32.6 mm (Saveh station) to 91.6 mm (Shazand station) across the stations of the province. The maximum rainfall in this month varies from 124.4 to 254.6 mm among the stations of the Markazi province, which is a considerable amount compared to the provincial average crop year. The standard deviation of precipitation in this month is between 28.7 and 61.3 mm, and the coefficient of variation at the stations of the province is between 0.6 and 0.9. Moreover, in terms of average monthly rainfall 22Nov-21Dec, 20Feb-19Mar, and 23Oct-21Nov are the next priority months for water storage management after 20Mar-19Apr, with average monthly rainfall of 39.3, 38.2, and 36.3 mm, respectively. The Mann-Kendall non-parametric test results did not reveal a consistent trend, but it showed that most of the meteorology stations in Markazi province had a significant decreasing trend in the rainfall in 21Jan-19Feb at a 90% confidence level. The analysis of extreme precipitation indices indicated that Shazand station had the highest extreme precipitation threshold value (28 mm), while Saveh and Delijan stations had the lowest (15 mm). The extreme precipitation threshold average of 30 years in other meteorological stations of Markazi province are 21mm in Arak, 17mm in Tafresh, 21mm in Khomeyn, 19mm in Mahallat, 17mm in Komeijan, 16mm in Farmahin, 21mm in Khondab, 17mm Gharqabad and 18mm in Ashtiyan.

Conclusion

The spatial distribution of rainfall in Markazi Province shows that the southwest regions have the highest average annual and seasonal precipitation, except for summer, while the east regions have the lowest. The average monthly rainfall also indicates that March has the highest rainfall among all months of the year, and that about 20% of the annual extreme precipitation occurs in this month.

Keywords: Characteristics of precipitation, Extreme precipitation, Global warming, Extreme precipitation indices, Markazi province

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۲، ص. ۸۰۹-۸۲۸

ویژگی‌های بارش زراعی و فرین‌های آن در استان مرکزی در دوره آماری ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹

سکینه خان‌سالاری^{*۱} - محمود امیدی^۲ - مژگان فلاح‌زاده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۶

چکیده

با توجه به گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و افزایش خشکسالی و رخدادهای بارشی فرین، آشنایی با ویژگی‌های بارش منطقه به منظور مدیریت منابع آب، به‌ویژه در زمان وقوع بارش‌های سیل‌آسا و تبدیل خطرآفرینی این رخدادهای به افزایش ذخایر آبی با مدیریت صحیح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر ویژگی‌های بارش در استان مرکزی در دوره آماری ۳۰ ساله (از سال زراعی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹) با روش‌های آماری، مورد تحلیل و سپس با نرم افزار ArcGIS توزیع مکانی آنها ترسیم و بررسی شد. همچنین روند تغییرات بارش در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون من-کندال مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این بارش فرین با استفاده از چهار شاخص بارش فرین شامل مجموع بارش فرین (R95p)، تعداد روزهایی که در سال مورد بررسی، مقدار بارش در آنها از آستانه بارش فرین آن ایستگاه بیشتر باشد (R95d)، شدت مطلق بارش فرین (AEPI) و کسری از کل بارندگی ناشی از رخدادهای فراتر از آستانه بارش فرین (R95pT) که بیانگر نسبت بارش فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی (بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر) است، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد به‌طور متوسط بیشینه شاخص R95pT، ۵۳ درصد از بارش سال را شامل می‌شود که در صورت آگاهی از زمان وقوع این فرین‌ها مدیریت سیلاب‌ها و استفاده بهینه از منابع آبی از نتایج آن است که بیش از ۲۰ درصد این بارش‌های فرین در فروردین ماه رخ داده است. در این راستا طبق بررسی توزیع مکانی بارش در استان مرکزی، بیشینه وقوع مقدار میانگین بارش سالانه و فصلی به استثنای فصل تابستان در جنوب‌غرب و کمینه آن در مناطق شرقی استان مرکزی قرار دارد و به‌طور متوسط بیشترین بارش در فصل زمستان و سپس در بهار و پاییز رخ داده است. همچنین فروردین‌ماه با ضریب تغییرات ۰/۸ و میانگین بارش ماهانه در طول دوره آماری مورد مطالعه برابر با ۵۵/۶ میلی‌متر پربارش‌ترین ماه است و به دلیل وقوع اکثر بارش‌های فرین در این ماه بیشترین ارزش ذخیره‌سازی و مدیریت آب را در بین ماه‌های سال را دارد. همچنین از دیدگاه مقدار بارش میانگین ماهانه، بعد از فروردین ماه، به‌ترتیب ماه‌های آذر، اسفند و آبان با میانگین بارش ماهانه ۳۹/۳، ۳۸/۲ و ۳۶/۳ میلی‌متر در اولویت مدیریت ذخیره‌سازی آب قرار دارند. نتیجه بررسی روند تغییرات بارش ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال روند یکپارچه‌ای را نشان نمی‌دهد اما می‌توان در حالت کلی گفت تقریباً در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند حداقل در سطح اطمینان ۹۰٪ در بارش بهمن ماه روند کاهشی معنی‌دار وجود دارد. نتایج بررسی شاخص‌های بارش فرین بیانگر وقوع بیشترین مقدار آستانه بارش فرین در ایستگاه شازند (۲۸ میلی‌متر) و کمترین آن در ایستگاه ساوه (۱۵ میلی‌متر) است.

واژه‌های کلیدی: استان مرکزی، ویژگی‌های بارش، بارش فرین، گرمایش جهانی، شاخص‌های بارش فرین

۱- استادیار هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: Khansalari@yahoo.com)

۲ و ۳- اداره کل هواشناسی استان مرکزی، اراک، ایران

مقدمه

بارش یکی از متغیرهای اقلیمی مهم در هر منطقه جغرافیایی به شمار می‌رود. با آگاهی از تغییرات زمانی- مکانی بارش می‌توان تا حدودی از تأثیرات مخرب خشکسالی و سیل جلوگیری (Ling et al., 2021) و از پتانسیل بارش استفاده کرد. بنابراین، بررسی و مطالعه ویژگی‌های بارش هر منطقه از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. ویژگی‌های بارش در هر منطقه شامل شناسایی توزیع مکانی بارش در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه و همچنین تعیین تعداد روزهای همراه با بارش و بدون بارش و بیشینه بارش در آن منطقه است (Alizadeh, 2015).

برای بررسی ویژگی‌های بارش معمولاً تغییرات زمانی و توزیع مکانی بارش در منطقه مورد مطالعه در یک دوره آماری تحلیل می‌شود. به دلیل رفتار غیر خطی و نیز عدم تبعیت بارش از توزیع نرمال (Rasooli et al., 2013)، بسیاری از محققان برای بررسی روند تغییرات زمانی آن در مناطق مختلف در دوره آماری، از آزمون من-کندال استفاده کرده‌اند (برای مثال، لینگ و همکاران (Ling et al., 2021) در شرق چین؛ هان و همکاران (Han et al., 2021) در شهر شیان کشور چین؛ دولان و همکاران (Dollan et al., 2022) در ویرجینیا و مریلند از ایالات شرقی کشور آمریکا؛ عبودی (Ebodé, 2022) در کامرون یک کشور آفریقای مرکزی). بر این اساس، لینگ و همکاران (Ling et al., 2021) در دشت هوانگ-هوای-های^۱ که یک پایگاه تجاری مهم تولید غلات در چین است، بر اساس داده‌های بارش برای این دشت از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۹، با استفاده از آزمون من-کندال، تجزیه و تحلیل مویجک، تابع متعامد تجربی و مدل گرانیگاه، توزیع زمانی- مکانی بارش کل را در مقیاس‌های زمانی مختلف تحلیل کردند. نتایج این پژوهش روند صعودی معنی‌داری را برای بارش زمستانی در دشت هوانگ-هوای-های نشان داد، در حالی که سایر روندهای فصلی معنی‌دار نبودند. همچنین، بارش در این دشت یک توزیع منطقه‌ای رو به کاهش از جنوب شرقی به شمال غربی را نشان داد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) با مطالعه ویژگی‌های بارش در ناحیه تونگژو پکن در ۶۵ سال اخیر با استفاده از داده‌های ۱۱ ایستگاه باران‌سنج در این منطقه و همچنین با استفاده از ۵ ایستگاه باران‌سنج در اطراف منطقه تونگژو پکن، ویژگی‌های بارش در ناحیه تونگژو در مقیاس‌های مکانی، سالانه و درون سالانه را با استفاده از روش تحلیل جامع مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها حاکی از آن بود که میانگین بارندگی سالانه در ناحیه تونگژو در مرکز و شمال غربی بیشتر و در جنوب غربی کمتر است و بارش بین ژوئن تا اوت بیش از ۷۰ درصد از بارش سالانه

را تشکیل می‌دهد. بارش در تابستان کاهش می‌یابد، در حالی که بارش در بهار و پاییز افزایش می‌یابد. همچنین، هان و همکاران (Han et al., 2021) به بررسی کمی تغییرات زمانی- مکانی بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف در منطقه شهر شیان پرداخته‌اند. در این مطالعه نیز از آزمون من-کندال و روش‌های تحلیل مویجک برای تجزیه و تحلیل تغییرات بارش استفاده شده است. از نظر تغییرات زمانی بارش در این منطقه، به جز بارش تابستانی که روند افزایشی با مقدار کمی را نشان می‌دهد، سایر بارش‌های فصلی روند کاهشی مشابیهی با بارش سالانه در طول سال‌های ۲۰۱۸-۱۹۵۱ دارا هستند. بارندگی ماهانه در این منطقه نیز روندهای تغییر متفاوتی داشته است که به طور کلی بارش از ژوئن تا سپتامبر ۵۸/۴ درصد از کل بارش سالانه را تشکیل می‌دهد. برای تغییرات مکانی بارش طی سال‌های ۱۹۶۱-۲۰۱۸، نتایج نشان داد که بارش سالانه و فصلی تفاوت‌های مکانی آشکاری دارند که نشان‌دهنده روند مکانی فزاینده‌ای از شمال به سمت جنوب منطقه است. در کشور ایران نیز مطالعات بسیاری در زمینه بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش در مناطق مختلف کشور و کاربرد آزمون من-کندال انجام شده است (Rasooli et al., 2013; Panahi et al., 2021; Halabian & Ghasemi Siani, 2021). رسولی و همکاران (Rasooli et al., 2013) به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های سالانه در ایران، از داده‌های مجموع بارش سالانه ۵۰ ایستگاه هواشناسی همدیدی و اقلیمی طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۶ استفاده کرده‌اند. در تحقیق ذکر شده، برای نشان دادن روند و معنی‌داری بارش‌های سالانه از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که متغیر بارش روندهای افزایشی و کاهشی در ایران داشته است. بر اساس نتایج این پژوهش بیشترین میزان روند کاهشی بارش طی ۴۰ سال بررسی‌شده در قسمت شمال غرب و بیشترین روند افزایشی در قسمت جنوب غرب کشور ایران رخ داده است. از مطالعات دیگر در زمینه ویژگی‌های بارش در کشور ایران می‌توان به پژوهش میرموسوی و همکارانش (Mir Mosavi et al., 2016) اشاره کرد. در این مطالعه آنها الگوی فضایی بارش‌های سنگین و فوق سنگین در ایران را طی دوره ۱۳۹۰-۱۳۴۰ بررسی و تحلیل کرده‌اند. در این مطالعه، صدک ۹۵ برای بارش‌های سنگین و صدک ۹۹ برای بارش‌های فوق سنگین انتخاب شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که کرانه‌های ساحلی دریای خزر و دامنه غربی رشته کوه زاگرس، دارای بیشینه وقوع بارش‌های سنگین به لحاظ مکانی و زمانی است. مطالعات انجام شده در استان مرکزی محدود و انگشت‌شمار است. برای مثال، عطایی و فنایی (Ataee & Fanaee, 2012) تغییرات متغیرهای اقلیمی را در استان مرکزی در ایستگاه‌های اراک، شمس‌آباد،

شده بارش ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این استان از سال زراعی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹ (۱۹۹۲-۱۹۹۱ تا ۲۰۲۲-۲۰۲۱) استفاده شده است. استان مرکزی دارای ۱۲ شهرستان شامل اراک، محلات، ساوه، تفرش، آشتیان، کمijan، خنداب، شازند، خمین، دلیجان، فرمیه و زرنديه می‌باشد. در این استان، ۱۳ ایستگاه هواشناسی همیدی، با سابقه آماری متفاوت وجود دارد. مختصات و مشخصات اقلیمی ۱۲ ایستگاه همیدی مورد استفاده در این پژوهش در **جدول ۱** آمده است. ایستگاه همیدی تکمیلی فرمیه در سال ۱۴۰۰ افتتاح شده است اما اطلاعات بارش آن از سال زراعی ۱۳۷۰-۱۳۷۱ موجود می‌باشد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. از اطلاعات ایستگاه همیدی زرنديه که در شمالی‌ترین منطقه استان مرکزی قرار دارد، نیز با توجه به دوره کوتاه مدت استفاده نشده است. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی و همچنین نقشه کوهساری منطقه مورد مطالعه در **شکل ۱** نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

در این تحقیق ویژگی‌های بارش، شامل بارش روزانه، ماهانه، فصلی، سالانه، تعداد روزهای همراه با بارش و انحراف معیار و ضریب تغییرات آنها و همچنین بیشینه مقدار بارش، بر اساس داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی از سال زراعی ۱۳۷۰-۱۳۷۱ تا سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با نرم افزار ArcGIS نقشه‌های توزیع مکانی آنها ترسیم و بررسی و تحلیل شده است. همچنین روند تغییرات بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون من-کندال مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. این آزمون ابتدا توسط من (Mann, 1945) در سال ۱۹۴۵ ارائه شد و سپس توسط کندال (Kendall, 1975) در سال ۱۹۷۵ توسعه یافت.

همانند سایر آزمون‌های آماری، این آزمون نیز بر مبنای مقایسه فرض صفر و یک بوده و در نهایت در مورد پذیرش یا رد فرض صفر تصمیم‌گیری می‌نماید. فرض صفر و یک این آزمون به ترتیب نشانگر عدم وجود و وجود روند در سری داده‌هاست. در این آزمون ابتدا اختلاف بین هر یک از جملات سری با همدیگر محاسبه و سپس تابع sgn اعمال می‌شود و پارامتر s با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n sgn(x_j - x_k) \quad (1)$$

که در این رابطه N تعداد جملات سری، x_j و x_k به ترتیب داده‌های زام و k ام سری هستند و تابع sgn نیز به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

تفرش و ساوه طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۶۶ (۴۰ سال) به صورت ماهانه، فصلی و سالانه مطالعه و بررسی کرده‌اند. بر اساس نتایج این پژوهش با کاربرد آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد متغیر میانگین بیشینه دما در بیشتر ماه‌ها بدون روند و تنها در ماه‌های مارس تا اکتبر در ایستگاه تفرش و ماه‌های آوریل و سپتامبر در ایستگاه شمس‌آباد روند مثبت مشاهده شده است. همچنین، بررسی متغیر بارش حاکی از روند منفی همه ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر و عدم روند در سایر ماه‌ها می‌باشد. بررسی فصلی متغیر میانگین بیشینه دما تنها روند افزایشی در هر چهار فصل را در ایستگاه تفرش و روند کاهشی را در فصل پاییز در ایستگاه ساوه نشان می‌دهد. بررسی فصلی متغیر بارش تنها روند کاهشی بارش را در ایستگاه تفرش در فصل تابستان نشان می‌دهد. همچنین، نتایج بررسی سالانه این مطالعه بیانگر روند افزایشی میانگین بیشینه دما در ایستگاه‌های تفرش و شمس‌آباد است در حالیکه بارش سالانه هیچ‌گونه روندی را نشان نمی‌دهد.

با توجه به افزایش دوره خشکی در استان مرکزی و کوتاه شدن دوره وقوع بارندگی و وقوع این بارش‌ها به صورت فرین و با توجه به مطالعات محدود در زمینه بارش در این استان لازم است ویژگی‌های بارش در این منطقه بیشتر بررسی شود تا با آگاهی از زمان وقوع فرین‌ها هم جهت حفاظت و بهره‌برداری بهینه از آب در دسترس در زمان وقوع فرین‌ها بهتر برنامه‌ریزی و مدیریت کرد و هم خطرات بارش فرین، مانند سیل‌های گسترده را کاهش داد. میزان بارش ۳۰۰ میلی‌متر در مناطق خشک توسط بهنیا به عنوان کمینه بارش برای کشت دیم عنوان شده است (Behnia, 1997). با توجه به اینکه متوسط بارش سالانه در استان مرکزی حدود ۲۸۰ میلی‌متر است و در اغلب نقاط استان نیز مقدار بارش سالانه کمتر از ۳۰۰ میلی‌متر است، ضرورت توجه به ویژگی‌های بارش نمایان‌تر می‌شود. از این‌رو هدف پژوهش حاضر بررسی ویژگی‌های بارش شامل مقدار بارش و تغییرات زمانی در بازه‌های مختلف و توزیع مکانی بارندگی با توجه به داده‌های هواشناسی در دسترس با کمک آزمون من-کندال است تا اطلاعات جزئی‌تری از بارش حاصل شود. از سوی دیگر، به دلیل تغییر اقلیم جهانی و افزایش تعداد وقوع رویدادهای فرین بارشی، یکی از اهداف این تحقیق نیز تعیین این آستانه فرین‌های بارشی با استفاده از شاخص‌های مختلف در نقاط ایستگاهی استان مرکزی است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش به منظور بررسی و مطالعه ویژگی‌های بارش در استان مرکزی از مجموعه داده‌های کنترل کیفی شده و صحت‌سنجی

آزمون دو دامنه جهت روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه ۵ برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad (5)$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌دار α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، از $\alpha/2$ استفاده شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. مقدار α برای سطح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۰۱ است. در سطح اطمینان ۹۰ درصد $Z=1/65$ و در سطح اطمینان ۹۵ درصد $Z=1/96$ در نظر گرفته می‌شود. در پژوهش حاضر بررسی روند در دو سطح اطمینان ۹۰ و ۹۵ درصد انجام شده است.

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

سپس واریانس با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود:

$$\operatorname{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad (3)$$

که در این رابطه n تعداد داده‌ها و m تعداد سری‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد و t فراوانی داده‌های با ارزش یکسان است. در ادامه آماره آزمون مطابق با رابطه ۴ استخراج می‌شود.

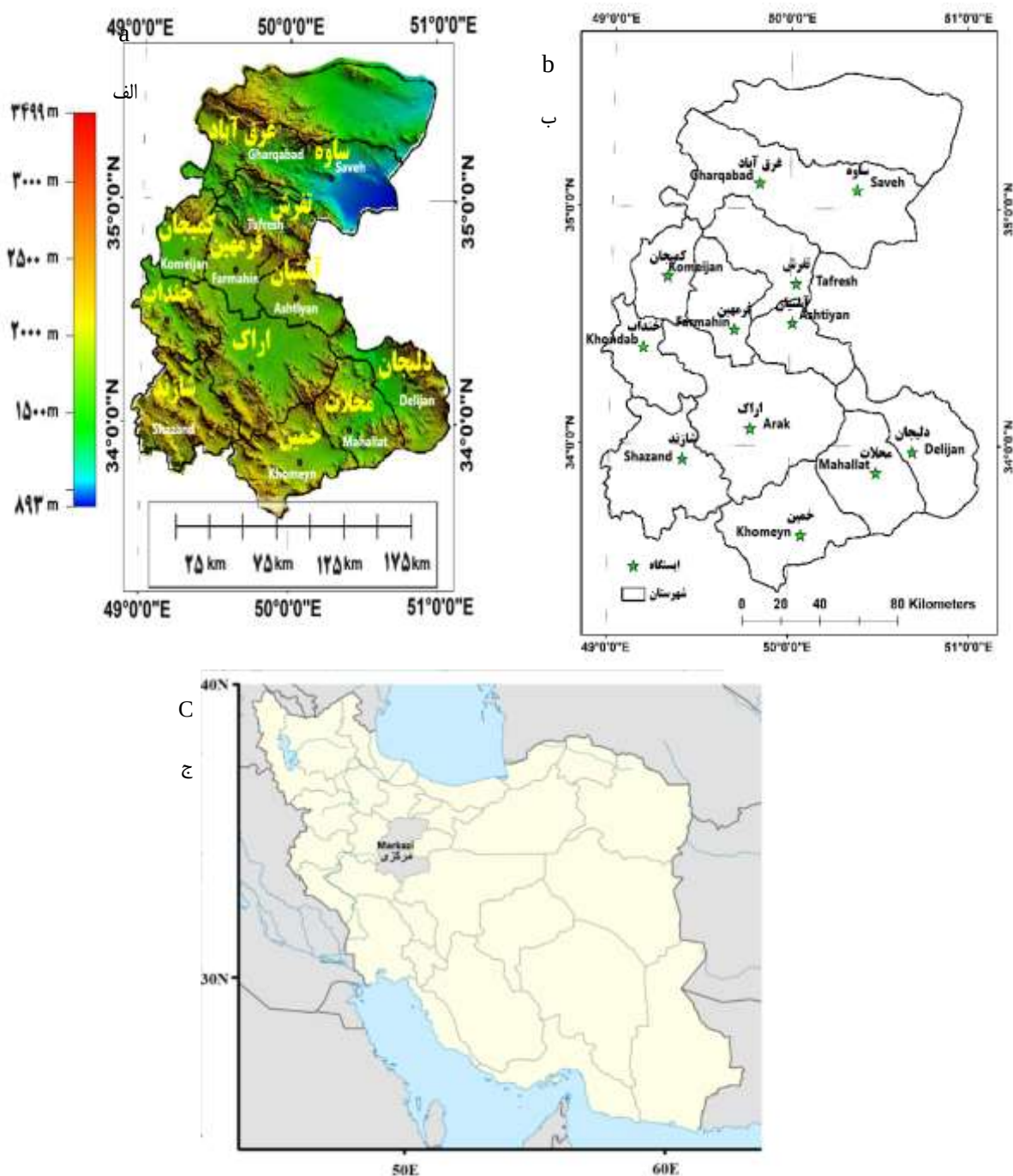
$$z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\operatorname{var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\operatorname{var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

که در این رابطه S پارامتر محاسبه شده در رابطه ۱ است. در یک

جدول ۱- مختصات و مشخصات اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی

Table 1- Coordinates and climatic characteristics of meteorology stations in Markazi province

مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی						
Characteristics of meteorology stations in Markazi province						
ردیف Row	نام ایستگاه Station name	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع ایستگاه از سطح دریا (متر) Station elevation from mean sea level (m)	اقلیم (آمبرزه) Climate (Emberger)	بارش (میلی‌متر) Precipitation (mm)
1	اراک Arak	34°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1702.9	خشک و سرد Arid and cold	309.4
2	ساوه Saveh	35°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	1108	خشک و معتدل Arid and moderate	191.1
3	محلات Mahallat	33°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	1681	خشک و سرد Arid and cold	237.6
4	تفرش Tafresh	34°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	1980	نیمه‌خشک و سرد Semi-arid and cold	313.5
5	کمیجان Komeijan	34°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1741	خشک و سرد Arid and cold	278.2
6	خنداب Khondab	34°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1739	خشک و سرد Arid and cold	306.2
7	شازند Shazand	33°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1913	نیمه‌مرطوب و سرد Sub-humid and cold	487.6
8	دلیجان Delijan	33°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	1524	خشک و سرد Arid and cold	181.1
9	آشتیان Ashtiyan	34°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	2097	خشک و سرد Arid and cold	269.6
10	خمین Khomeyn	33°۰۰'۰۰"	50°۰۰'۰۰"	1834.6	خشک و سرد Arid and cold	294.9
11	غرق‌آباد Gharqabad	35°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1590	خشک و سرد Arid and cold	287.2
12	فرمهین Farmahin	34°۰۰'۰۰"	49°۰۰'۰۰"	1785	خشک و سرد Arid and cold	246.5



شکل ۱- الف) وضعیت کوهساری و ب) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی ج) موقعیت جغرافیایی استان مرکزی
Figure 1- a) The topography and b) the location of the meteorological stations of Markazi province c) the location of Markazi province

۱۳۷۰ تا سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. گرم شدن کره زمین در چند دهه اخیر، نه تنها از نظر میانگین اقلیم، بلکه با توجه به رخداد‌های فرین در مناطق مختلف جهان، به‌طور جدی

همچنین با توجه به گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و وقوع بارش‌های فرین در مناطق مختلف دنیا، بارش فرین در مناطق مختلف این استان با استفاده از داده‌های بارش روزانه در بازه زمانی سال زراعی ۱۳۷۱-

$$R95p_i = \sum_{w=1}^W R_{wj} \text{ \& } R_{wj} > R_{wn}95 \quad (۶)$$

$$R95d / R95p = AEPI \quad (۷)$$

$$R95pT_j = \sum_{w=1}^W R_{wj} / R_j \text{ \& } R_{wj} > R_{wn}95 \quad (۸)$$

که R_{wj} و $R_{wn}95$ به ترتیب مقدار بارش روزانه در روزهای مرطوب (بارش بیش از یک میلی‌متر) در دوره n مقدار آستانه بارش فرین هستند که در این پژوهش مقدار آستانه بارش در مدت ۲۴ ساعت (بارش روزانه) محاسبه شده است.

نتایج و بحث

ویژگی بارش سالانه

ویژگی‌های بارش سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در **جدول ۳** نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات ثبت شده در **جدول ۳** میانگین مجموع سالانه بارش سال زراعی، در چهار ایستگاه شازند، تفرش، اراک و خنداب بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد که البته ایستگاه شازند با میزان ۴۹۰/۱ میلی‌متر اختلاف قابل توجهی با سایر ایستگاه‌های استان دارد. ایستگاه‌های دلیجان و ساوه در شرقی‌ترین نقاط استان کمترین بارش را به میزان ۱۸۲/۳ و ۱۹۲/۸ میلی‌متر دارند. خمین، غرق آباد و کمیجان بارش‌هایی نزدیک به ۳۰۰ میلی‌متر را دارا می‌باشند. در ایستگاه‌های استان به‌جز ایستگاه شازند بارش کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر نیز ثبت شده است. در ایستگاه‌های ساوه و دلیجان بارش سالانه آبی ۷۶/۶ و ۸۸/۵ میلی‌متر نیز گزارش شده است. در طول دوره آماری در ایستگاه ساوه بارش سال آبی هیچ زمانی به ۳۰۰ میلی‌متر نیز نرسیده است و در ایستگاه دلیجان بیشترین بارش سال آبی ثبت شده ۳۰۵/۲ میلی‌متر است.

بر اقلیم تأثیر گذاشته است (Shiu et al., 2012; Papalexiou & Montanari, 2019). علاوه بر این، پیشنگری می‌شود که رخدادهای مرطوب شدید در بسیاری از مناطق خشکی به دلیل گرمایش جهانی بیشتر رخ دهد (Allan and Soden, 2008). در این مطالعه، آستانه بارش فرین با استفاده از صدک‌ها، به روش ژای و همکاران (Zhai et al., 2005) محاسبه شد؛ که این روش به طور گسترده در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (Wang et al., 2012; Wu et al., 2013; Zhang et al., 2014; Cui et al., 2019; Tang et al., 2021). بدین منظور در هر ایستگاه، داده‌های بارش سالانه (بارش روزانه بزرگتر یا مساوی یک میلی‌متر) به صورت صعودی مرتب شدند تا توالی بارش سالانه برای هر سال زراعی از سال ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌دست آید. سپس، میانگین صدک ۹۵ برای توالی بارش ۳۰ ساله در هر ایستگاه به‌عنوان میانگین آستانه بارش فرین تعریف شد (Rwn95 در رابطه ۶). براساس این آستانه بارش فرین، چهار شاخص بارش فرین محاسبه شد که توسط سازمان جهانی هواشناسی، کمیسیون اقلیم‌شناسی و توصیه‌های برنامه تغییر اقلیم و پیش‌بینی تهیه شده است. علاوه بر این، این شاخص‌ها به‌طور گسترده-ای برای انعکاس ویژگی‌های اساسی بارش فرین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Choi et al., 2009; Fatichi & Caporali, 2009; Zhang et al., 2011; Peng et al., 2018; Tang et al., 2021). این شاخص‌ها به صورت خلاصه در **جدول ۲** معرفی شده‌اند و معادلات آنها در روابط ۶ تا ۸ نشان داده شده است (Tang et al., 2021). مجموع بارش فرین بر حسب واحد میلی‌متر (R95p) (رابطه ۶)، تعداد روزهایی که در سال مورد بررسی، مقدار بارش در آنها از آستانه بارش فرین آن ایستگاه بیشتر باشد (R95d) و شدت مطلق بارش فرین بر حسب میلی‌متر بر روز (AEPI) (رابطه ۷) متغیرهای آماری اساسی هستند که بارش فرین را توصیف می‌کنند. کسری از کل بارندگی ناشی از رویدادهای فراتر از آستانه بارش فرین (R95pT) منعکس‌کننده نسبت بارش فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی (بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر) بر حسب درصد است (رابطه ۸).

جدول ۲- معرفی مختصر چهار شاخص بارش فرین در این مطالعه

Table 2- Brief description of the four extreme precipitation indices used in this study

شاخص Index	نام توصیفی شاخص Descriptive name of index	واحد Units
R95p	مقدار بارش در روزهای خیلی مرطوب Precipitation due to very wet days	میلی‌متر mm
R95d	تعداد روزهای با بارش فرین Extreme precipitation days	روز day
AEPI	شاخص شدت مطلق بارش فرین Absolute intensity extreme precipitation Index	میلی‌متر بر روز mm day ⁻¹
R95pT	نسبت بارش فرین به کل بارش در روزهای خیلی مرطوب Extreme precipitation to total precipitation of very wet days	%

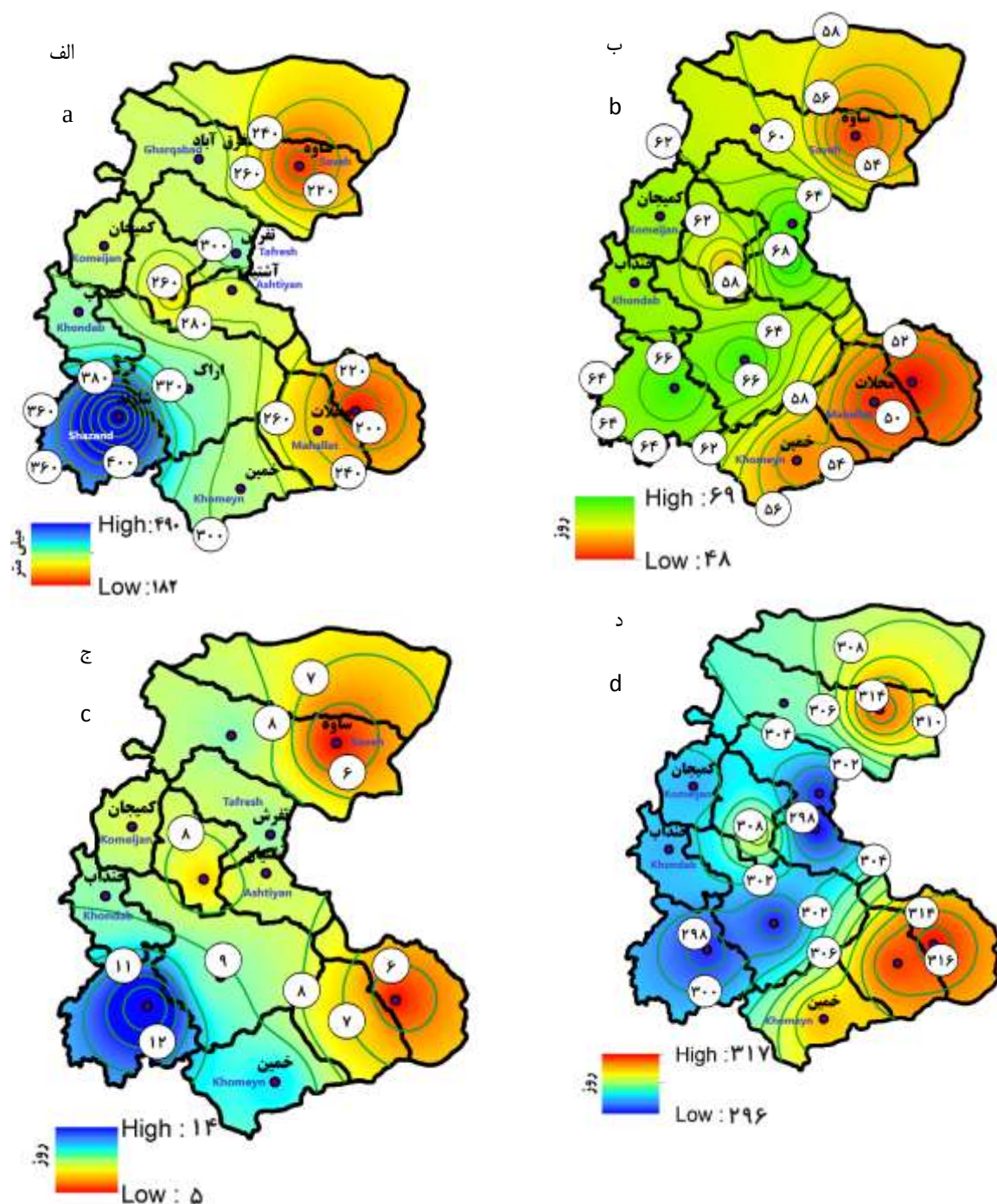
ایستگاه‌های استان در مقایسه با میانگین بارش قابل توجه است که ضریب تغییرات نیز در حدود ۰/۳ می‌باشد که حاکی از آن است که انحراف معیار بارش در ایستگاه‌ها در حدود یک سوم میانگین بارش می‌باشد. کمینه و بیشینه ضریب تغییرات بارش سال زراعی در استان مرکزی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های تفرش و محلات و به مقدار ۰/۲۵ و ۰/۳۵ است. مطابق با **جدول ۳**، میانگین تعداد روزهای همراه با بارش در استان مرکزی در دلیجان، محلات و ساوه کمتر از ۵۰ روز و به ترتیب برابر با ۴۸، ۴۹ و ۵۰ روز است که کمینه مقدار این کمیت در استان است. بیشینه میانگین تعداد روزهای همراه با بارش مربوط به آشتیان (۶۹ روز)، شازند، تفرش و اراک (۶۸ روز) است که در نقشه توزیع مکانی این کمیت (**شکل ۲-ب**) نیز به خوبی این مطلب مشاهده می‌شود.

در طول دوره آماری موجود بیشینه بارش سال آبی در ایستگاه‌های اراک، خنداب، خمین و کمیجان بیش از ۵۰۰ میلی‌متر ثبت شده است. بیشینه بارش سال آبی در بین ایستگاه‌های استان مرکزی مربوط به ایستگاه شازند با مقدار بارش ۹۶۱/۶ میلی‌متر و در سال زراعی ۱۳۹۸-۱۳۹۷ است. همچنین با توجه به نقشه توزیع مکانی بارش سالانه استان مرکزی (**شکل ۲-الف**) بارش بیشینه شازند در جنوب غرب استان به خوبی نمایان است. ایستگاه‌های خنداب و اراک نیز با بارش بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر و ایستگاه خمین با بارش ۲۹۶/۶ میلی‌متر در نزدیکی ایستگاه شازند نیز دیده می‌شود. با اینکه در حرکت به سمت شرق مقدار بارش به میزان قابل توجهی کم می‌شود، ایستگاه تفرش با توجه به ارتفاع بلندتر و شرایط کوهساری بارش بیش از ۳۰۰ میلی‌متر را دارا می‌باشد. بر اساس **جدول ۳** میانگین انحراف معیار بارش سالانه در

جدول ۳- ویژگی‌های بارش سالانه بلندمدت (از سال زراعی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹) در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی

Table 3- Characteristics of long-term annual rainfall (from crop year 1991-1992 to 2020-2021) in meteorological stations of Markazi Province

نام ایستگاه	شازند	تفرش	اراک	خنداب	خمین	غرق آباد	کمیجان	آشتیان	فرمهین	محلات	ساوه	دلیجان
Station name	Shazand	Tafresh	Arak	Khondab	Khomeyn	Gharqabad	Komeijan	Ashtiyan	Farmahin	Mahallat	Saveh	Delijan
میانگین سالانه Annual average	490.1	315.5	311.8	309.3	296.6	290.2	280.6	271.6	252.5	239.4	192.8	182.3
کمینه مطلق سالانه Annual absolute minimum	267.3	169	154.4	117.7	138	181.7	169.3	139.5	126.2	105.1	76.6	88.5
بیشینه مطلق سالانه Annual absolute maximum	961.6	464	547.4	572.5	514.2	481.5	532.5	443.8	419.1	416	297.9	305.2
انحراف معیار سالانه Annual standard deviation	149.5	79.8	91.8	96.8	99.9	78.1	89.7	69.5	71.5	83.4	60.8	54.7
ضریب تغییرات Coefficient of variation	0.3	0.25	0.29	0.31	0.34	0.27	0.32	0.26	0.28	0.35	0.32	0.3



شکل ۲- توزیع مکانی ویژگی‌های بارش در سال زراعی استان مرکزی الف) میانگین بارش سال زراعی بلندمدت، ب) میانگین تعداد روزهای همراه با بارش سال زراعی، ج) میانگین تعداد روزهای همراه با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر در سال زراعی، د) میانگین تعداد روزهای بدون بارش

Figure 2- Spatial distribution of precipitation characteristics in the cropping year of Markazi Province a) Average rainfall of long-term cropping year b) Average number of days with rainfall in cropping year c) Average number of days without rain of more than 10 mm in cropping year D) average number of days with rainfall

غرق آباد (۹ روز) می‌باشد که در نقشه توزیع مکانی (شکل ۲-ج) نیز این مطلب مشهود است. همچنین بیشترین تعداد روزهای بدون وقوع بارش

بیشینه میانگین تعداد روزهای همراه با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر به ترتیب در ایستگاه‌های شازند (۱۴ روز)، خمین، خنداب، تفرش و

بهار، پاییز و زمستان بیانگر وقوع بیشینه بارش فصلی در جنوب غرب استان مرکزی و بارش فصلی کمتر در شرق استان می‌باشد. به منظور بررسی با جزئیات بیشتر مقدار بارش در استان مرکزی، در بخش بعدی مقدار بارش به صورت ماهانه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

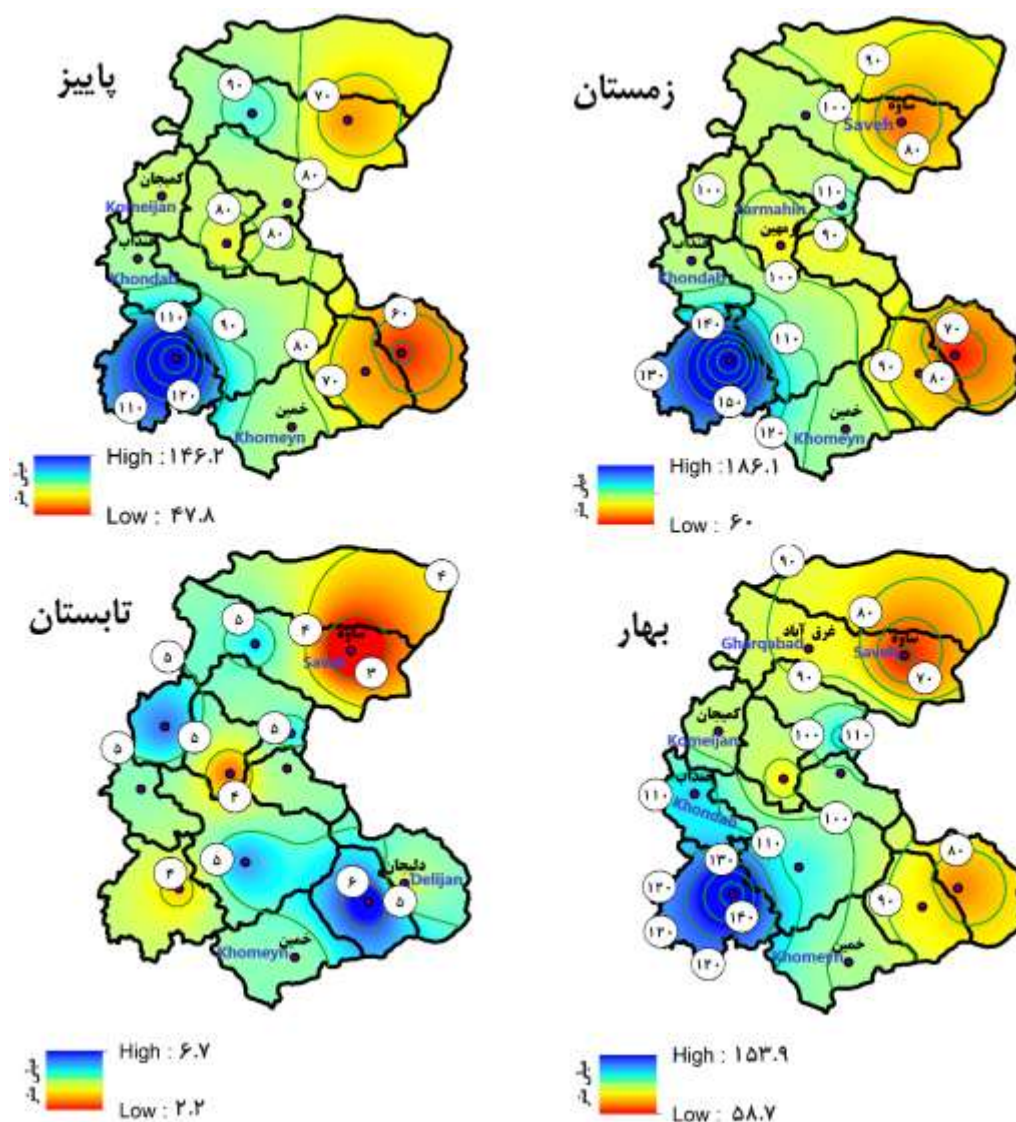
ویژگی بارش ماهانه در فصل پاییز

توزیع مکانی بارش رخ داده در مهرماه در دوره آماری مورد مطالعه در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در شکل ۴ نشان داده شده است.

در شرقی‌ترین مناطق استان در ایستگاه‌های دلپجان (۳۱۷ روز)، محلات (۳۱۶ روز) و ساوه (۳۱۵ روز) مشاهده می‌شود که این تمرکز روزهای بدون وقوع بارش در شکل ۲-د نیز نشان داده شده است.

بررسی ویژگی‌های بارش فصلی

بررسی ویژگی‌های بارش فصلی براساس شکل ۳ حاکی از آن است که به طور متوسط بیشترین بارش در فصل زمستان و سپس در بهار و پاییز رخ داده است. کمترین بارش نیز در فصل تابستان با میانگین بارش بسیار کم اتفاق افتاده است. توزیع مکانی بارش (شکل ۳) در فصول



شکل ۳- توزیع مکانی بارش فصلی در استان مرکزی

Figure 3- Spatial distribution of seasonal rainfall in Markazi province

بازه ۱۵/۶ تا ۴۴/۹ میلی‌متر و ضریب تغییرات در این ماه حدود ۰/۶ تا ۱ می‌باشد. در بهمن ماه میانگین بارش در ایستگاه‌های استان بین ۱۸/۹ (ایستگاه دلیجان) تا ۵۷/۲ (ایستگاه شازند) میلی‌متر است. بیشینه بارش رخ داده در این ماه در دوره مورد مطالعه در بازه ۱۶۲ تا ۵۶/۶ میلی‌متر قرار دارد. انحراف معیار بارش در ایستگاه‌های استان مرکزی در این ماه بین ۱۴/۸ تا ۳۴/۹ میلی‌متر است و ضریب تغییرات در بازه ۰/۵ تا ۰/۹ می‌باشد. در اسفندماه میانگین بارش در ایستگاه‌های استان بین ۲۳ تا ۶۹/۲ میلی‌متر می‌باشد. بیشینه مقدار بارش رخ داده در این ماه نیز در بازه ۷۷ تا ۱۹۸ میلی‌متر به ترتیب در ایستگاه‌های دلیجان و شازند است. همچنین انحراف معیار بارش ۱۷/۱ تا ۵۱/۲ میلی‌متر در این ماه می‌باشد و ضریب تغییرات در استان در بازه ۰/۷ تا ۱ است. توزیع مکانی میانگین بارش در سه ماه زمستان (شکل‌های ۴-د، ۴-ب و ۴-و) نشان می‌دهد که در اسفند ماه بارش جنوب استان نسبت به دو ماه دیگر بیشتر است و در بهمن ماه بارش شمال استان نسبت به دو ماه دی و اسفند بیشتر است.

ویژگی بارش ماهانه در فصل بهار

در فروردین ماه میانگین مقدار بارش در ایستگاه‌های استان بین ۳۲/۶ (ایستگاه ساوه) تا ۹۱/۶ (ایستگاه شازند) میلی‌متر می‌باشد. بیشینه بارش دریافتی در این ماه نیز بین ۱۲۴/۴ تا ۲۵۴/۶ میلی‌متر در ایستگاه‌های استان مرکزی است که با توجه به میانگین سال آبی استان مقدار بارش قابل توجهی می‌باشد. انحراف معیار بارش بین ۲۸/۷ تا ۶۱/۳ میلی‌متری در این ماه نشان داده شده است و ضریب تغییرات در ایستگاه‌های استان بین ۰/۶ تا ۰/۹ است. در اردیبهشت‌ماه میانگین بارش در ایستگاه‌های استان بین ۲۱/۹ تا ۵۵ میلی‌متر است. بیشینه بارش‌های دریافتی این ماه نیز حاکی از وقوع بارش در بازه ۷۸/۱ تا ۲۰۸ میلی‌متر در ایستگاه‌های استان می‌باشد که با توجه به میانگین سال آبی استان بارش قابل ملاحظه‌ای است. انحراف معیار بارش ۱۸/۵ تا ۴۹/۵ میلی‌متر در این ماه می‌باشد و ضریب تغییرات در ایستگاه‌های استان ۰/۷ تا ۱/۱ است که در مقایسه با فروردین ماه بزرگتر می‌باشد. در آخرین ماه از فصل بهار، میانگین بارش در ایستگاه‌های استان بین ۴/۱ تا ۱۰/۵ میلی‌متر است که نسبت ماه‌های مورد بررسی قرار گرفته (به جز مهر ماه) به شدت افت و کاهش دارد. در واقع آغاز مجدد بارش‌های با مقدار کم را نشان می‌دهد. بر اساس آمار موجود در کلیه ایستگاه‌های استان مرکزی عدم دریافت بارش قابل توجه در این ماه اتفاق افتاده است. بیشینه بارش‌های دریافتی این ماه نیز به‌ترتیب در ایستگاه محلات و اراک و برابر با ۹۰/۲ و ۸۷/۸ میلی‌متر رخ داده است. در خردادماه انحراف معیار بارش ۷/۱ تا ۱۶/۹ میلی‌متر و ضریب تغییرات در ایستگاه‌های استان در بازه ۱/۴ تا ۲/۳ می‌باشد که در مقایسه با سایر ماه‌ها از آغاز

براساس نتایج محاسبات آماری، میانگین مقدار بارش رخ داده در مهرماه کم می‌باشد و مقدار بارش ماهانه در مهرماه در دوره آماری مورد مطالعه در ایستگاه‌های استان بین ۳/۵ (ایستگاه ساوه) تا ۱۱ (ایستگاه شازند) میلی‌متر متغیر است. مهرماه به‌عنوان آغاز سال زراعی و آبی از اهمیت بسزایی برخوردار است. آمار بارش‌های موجود حاکی از عدم دریافت مقدار کافی بارش در این ماه می‌باشد. بیشینه مقدار بارش در این ماه نیز در بازه ۲۵/۵ (ایستگاه ساوه) تا ۶۳/۹ (ایستگاه خنداب) میلی‌متر در ایستگاه‌های مختلف استان مرکزی است که می‌توان گفت وقوع بارش مؤثر در این ماه بسیار کم است. انحراف معیار بارش در این ماه بزرگتر از میانگین بارش است که منجر به ضریب تغییرات بیش از ۱ می‌شود. بازه تغییرات انحراف معیار بین ۱/۴ (ایستگاه‌های تفرش و خمین) تا ۲ (ایستگاه دلیجان) است. میانگین بارش در آبان ماه نسبت به مهرماه قابل توجه می‌باشد. به‌طوری‌که مقدار میانگین بارش در ایستگاه‌های استان در آبان ماه در بازه ۲۱/۴ (ایستگاه دلیجان) تا ۶۲/۴ (ایستگاه شازند) میلی‌متر متغیر است. با توجه به عدم دریافت بارش مناسب در مهرماه، آبان ماه به‌عنوان ماه آغاز دریافت بارش مؤثر در سال زراعی و آبی از اهمیت بسزایی برخوردار است. بیشینه بارش دریافتی در این ماه در بازه ۷۵/۷ (ایستگاه ساوه) تا ۲۰۷ (ایستگاه شازند) میلی‌متر است. همچنین انحراف معیار مقدار بارش در بازه ۱۹/۸ تا ۵۲/۵ میلی‌متر و ضریب تغییرات در بازه ۰/۸ تا ۰/۹ است. میانگین مقدار بارش به وقوع پیوسته در آذر ماه در دوره آماری مورد مطالعه، در ایستگاه‌های استان مرکزی بین ۲۲/۱ تا ۷۲/۸ میلی‌متر متغیر می‌باشد. بیشینه بارش به وقوع پیوسته در این ماه نیز در بازه ۶۱/۱ تا ۱۶۵/۳ میلی‌متر به‌ترتیب در ایستگاه‌های دلیجان و شازند می‌باشد. همچنین انحراف معیار بارش بین ۱۶/۷ تا ۴۶/۵ میلی‌متر است. ضریب تغییرات در این ماه حدود ۰/۶ تا ۰/۸ می‌باشد که هرچند مقدار زیادی می‌باشد اما نسبت به بارش ماه‌های مهر و آبان کمتر بوده و پراکندگی بارش را کمتر نشان می‌دهد. شکل‌های ۴-الف، ۴-ب و ۴-ج توزیع مکانی بارش سه ماه پاییز را نشان می‌دهد که بطور متوسط مقدار بارش آذر ماه نسبت به ماه‌های مهر و آبان بیشتر است. همچنین در این سه ماه مقدار بارش در شرق استان نسبت به غرب استان کم‌تر می‌باشد.

ویژگی بارش ماهانه در فصل زمستان

بر اساس مشخصات بارش در دوره مورد مطالعه مربوط به دی ماه در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی، میانگین بارش در این ماه در ایستگاه‌های استان بین ۱۸/۱ (ایستگاه دلیجان) تا ۵۹/۶ (ایستگاه شازند) میلی‌متر گزارش شده است. بیشینه بارش دریافتی در این ماه نیز در بازه ۲۰۴/۳ تا ۵۷/۵ میلی‌متری به‌ترتیب در ایستگاه‌های شازند و دلیجان اتفاق افتاده است. همچنین انحراف معیار بارش در دی ماه در

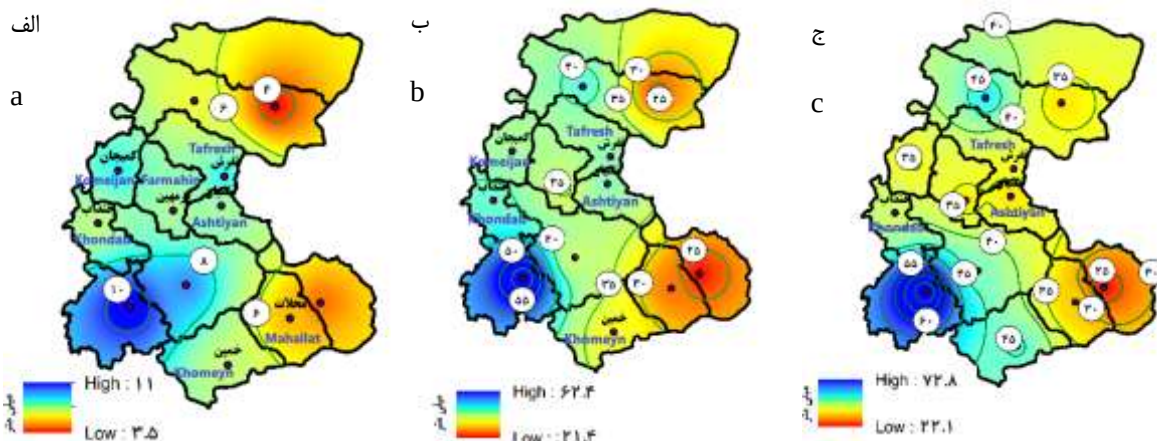
استان مرکزی بین ۰/۳ تا ۲/۲ میلی‌متر و بیشینه مقدار بارش رخ داده در بازه ۴/۳ تا ۲۹/۶ می‌باشد. مقدار انحراف معیار بارش در این ماه بین ۱ تا ۵/۷ میلی‌متر و همچنین ضریب تغییرات در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در بازه ۲/۱ تا ۴/۵ قرار دارد که در دسته ماه‌های با ضریب تغییرات بزرگ می‌باشد. توزیع مکانی بارش در تیرماه (شکل ۴-۴-۱) حاکی از وقوع مقدار بارش بسیار کم در سطح استان می‌باشد که بیشینه وقوع بارش در این ماه در دوره آماری مورد مطالعه در جنوب شرق و بخش‌هایی از غرب استان مرکزی است. همچنین شکل ۴-۴-۲ توزیع مکانی مقدار بارش در ایستگاه‌های استان مرکزی در مردادماه را نشان می‌دهد که بیانگر وقوع بارش‌های ناچیز در سطح استان مرکزی است. توزیع مکانی مقدار بارش در استان مرکزی در شهریورماه آخرین ماه سال زراعی (شکل ۴-۴-۳) بیانگر وقوع بارش‌های با مقدار ناچیز در سطح استان می‌باشد که در نیمه جنوبی استان مقدار این بارش‌ها بیشتر از نیمه شمالی استان است.

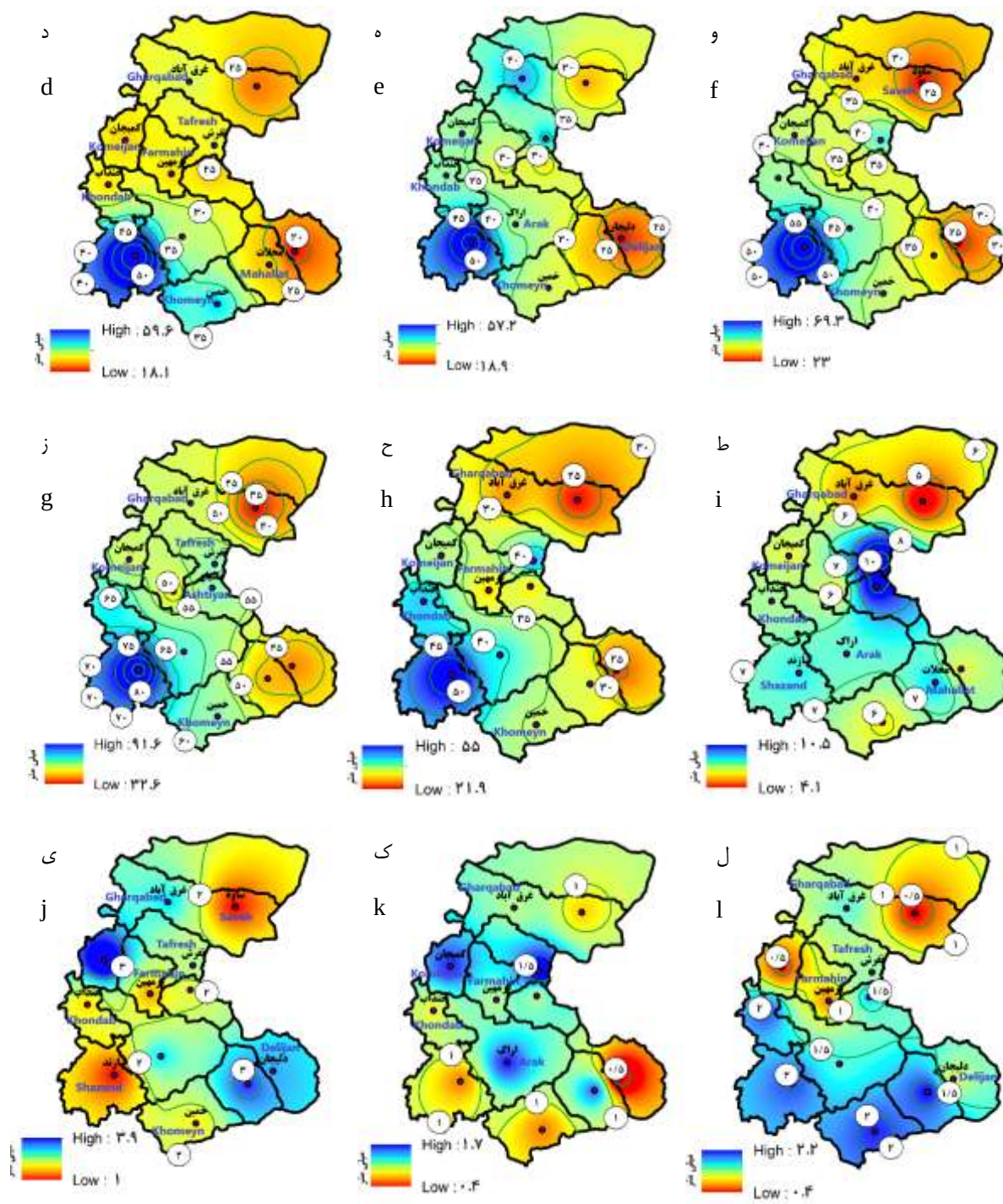
در نهایت نتایج بررسی آماری مقدار میانگین بارش ماهانه در دوره ۳۰ ساله (جدول ۴) نشان می‌دهد که پربارش‌ترین ماه‌ها در استان مرکزی ماه‌های فروردین، آذر، اسفند و آبان به‌ترتیب با میانگین بارش ماهانه ۵۵/۶، ۳۹/۳، ۳۸/۲ و ۳۶/۳ میلی‌متر و ضریب تغییرات ۰/۸، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ هستند. همچنین ماه‌های تابستان با کمترین میانگین بارش و بیشترین ضریب تغییرات کم‌بارش‌ترین ماه‌های سال در طول دوره آماری در استان مرکزی می‌باشند.

سال آبی تا خردادماه بزرگتر می‌باشد. توزیع مکانی بارش فروردین‌ماه (شکل ۴-۴-۲) نشان می‌دهد که میانگین بارش این ماه نسبت به سایر ماه‌های سال بیشتر است و همچنان مانند سایر ماه‌ها (به‌جز سه ماه کم بارش خرداد، تیر و مرداد)، میزان بارش در جنوب غرب استان بیشتر است و به سمت شمال و شرق مقدار وقوع بارش کاهش می‌یابد. همچنین مقدار بارش در خردادماه (شکل ۴-۴-۳) نسبت به دو ماه اول بهار (شکل‌های ۴-۴-۲ و ۴-۴-۳) کاهش قابل توجهی دارد.

ویژگی بارش ماهانه در فصل تابستان

در تیرماه میانگین مقدار بارش در ایستگاه‌های استان در بازه ۱ تا ۳/۹ میلی‌متر می‌باشد بیشینه بارش رخ داده این ماه نیز بین ۸/۸ (ایستگاه شازند) تا ۴۲/۹ (ایستگاه خمین) میلی‌متر است که پربارش‌ترین نقطه استان در سه فصل دیگر (ایستگاه شازند) کمترین میانگین بارش دریافتی را در این ماه دارد. انحراف معیار بارش در این ماه در استان مرکزی در بازه ۲/۱ تا ۸/۵ میلی‌متر و ضریب تغییرات بین ۱/۹ تا ۴/۳ می‌باشد که در گروه ماه‌های با ضریب تغییرات بزرگ قرار دارد. در مردادماه در دوره مورد مطالعه میانگین مقدار بارش در ایستگاه‌های استان در بازه ۰/۴ تا ۱/۷ میلی‌متر قرار دارد. بیشینه مقدار بارش‌های دریافتی این ماه نیز بین ۵/۷ (ایستگاه اراک) تا ۲۶/۴ (ایستگاه دلیجان) میلی‌متر می‌باشد. همچنین انحراف معیار مقدار بارش در این ماه بین ۱/۲ (ایستگاه دلیجان) تا ۵ (ایستگاه اراک) میلی‌متر و ضریب تغییرات بارش در بازه ۲/۱ تا ۴/۸ می‌باشد که در دسته ماه‌های با ضریب تغییرات بزرگ قرار دارد. در شهریورماه میانگین مقدار بارش در ایستگاه‌های





شکل ۴- توزیع مکانی بارش ماهانه در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی (الف) مهر (ب) آبان (ج) آذر (د) دی (ه) بهمن (و) اسفند (ز) فروردین (ح) اردیبهشت (ط) خرداد (ی) تیر (ک) مرداد (ل) شهریور

Figure 4- Spatial distribution of monthly precipitation in meteorological stations of Markazi province a) 23Sep-22Oct b) 23Oct-21Nov c) 22Nov-21Dec d) 22Dec-20Jan e) 21Jan-19Feb f) 20Feb-19Mar g) 20Mar-19Apr h) 20Apr-20May i) 21May-20June j) 21June-21July k) 22July-21Aug l) 22Aug-22Sep

جدول ۴- میانگین بارش ماهانه و ضریب تغییرات در ۱۲ ایستگاه هواشناسی استان مرکزی در دوره ۳۰ ساله

Table 4- Mean monthly precipitation and coefficient of variation in 12 meteorological stations of Markazi Province in a period of 30 years

نام ایستگاه Name	مهر 23Sep- 22Oct	آبان 23Oct- 21Nov	آذر 22Nov- 21Dec	دی 22Dec- 20Jan	بهمن 21Jan- 19Feb	اسفند 20Feb- 19Mar	فروردین 20Mar- 19Apr	اردیبهشت 20Apr- 20May	خرداد 21May- 20June	تیر 21June- 21July	مرداد 22July- 21Aug	شهریور 22Aug- 22Sep
میانگین بارش ماهانه Average monthly precipitation	6.8	36.3	39.3	29.7	33.8	38.2	55.6	34.9	6.8	2.2	1.1	1.4
ضریب تغییرات Coefficient of variation	1.7	0.9	0.7	0.7	0.6	0.8	0.8	0.9	1.8	2.2	2.8	2.9

روند تغییرات بارش ماهانه، فصلی و سالانه

نتیجه بررسی روند تغییرات بارش ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در سطح اطمینان ۹۵٪ بارش تیر ماه در ایستگاه خمین، بارش بهمن ماه در ایستگاه دلیجان، و بارش بهمن ماه، فصل زمستان و سالانه در ایستگاه محلات معنی‌دار است که در ایستگاه خمین بارش در تیرماه روند افزایشی معنی‌دار و در محلات و دلیجان روند کاهشی معنی‌دار وجود دارد. همچنین در سطح اطمینان ۹۰ درصد نیز بارش بهمن‌ماه در ایستگاه اراک، بارش اردیبهشت و بهمن‌ماه در ایستگاه‌های ساوه و خمین، بارش اردیبهشت‌ماه در ایستگاه محلات، بارش بهمن‌ماه در ایستگاه غرق‌آباد روند کاهشی معنی‌دار داشته‌اند و بارش آبان‌ماه در ایستگاه‌های خمین، تفرش و آشتیان، بارش مردادماه و پاییز در ایستگاه کمیجان و بارش سالانه در ایستگاه آشتیان روند افزایشی معنی‌دار داشته‌اند.

مشخصات بارش فرین در استان مرکزی

در این بخش شاخص‌های بارش فرین در بازه زمانی مورد مطالعه بررسی شده است. در جدول ۶ آستانه بارش فرین میانگین ۳۰ ساله (از سال زراعی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹) محاسبه شده در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی نشان داده شده است. بر این اساس بیشترین مقدار آستانه بارش فرین در دوره مورد مطالعه مربوط به ایستگاه شازند (۲۸ میلی‌متر) و کمترین آن متعلق به ایستگاه‌های ساوه و دلیجان (۱۵ میلی‌متر) است.

براساس بررسی سالانه چهار شاخص بارش فرین معرفی شده در

بخش روش کار، برای ۱۲ ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه استان مرکزی در دوره آماری ۳۰ ساله، به‌دلیل حجم زیاد اطلاعات، شاخص‌های بارش فرین در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی، در مواردی که بارش فرین رخ داده بالاترین درصد از بارش آن سال را در بین سال‌های مورد مطالعه شامل شود، در جدول ۸ نشان داده شده است. در جدول ۷، شاخص بارش فرین R95p مقدار بارش فرین در هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی را در تعداد روز وقوع بارش فرین R95d نشان می‌دهد. بر این اساس شاخص AEPI که نسبت دو شاخص ذکر شده است شدت بارش را نشان می‌دهد. شاخص R95pT مقدار درصد سهم بارش فرین رخ داده در هر یک از ایستگاه‌ها از بارش سال مربوطه را نشان می‌دهد که مقادیر بیشینه و کمینه این شاخص در هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۳۰ ساله در جدول ۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است مقادیر بیشینه شاخص R95pT نشان می‌دهد که در بعضی از سال‌ها مقدار بارش فرین که در تعداد روز کمی اتفاق افتاده است (جدول ۸) سهم زیادی از بارش سال مربوطه را شامل می‌شود. به طور متوسط بیشینه شاخص R95pT، ۵۳ درصد از بارش سال را شامل می‌شود که در صورت آگاهی از زمان وقوع این فرین‌ها مدیریت این سیلاب‌ها و استفاده بهینه از منابع آبی از نتایج آن است. همچنین بیشترین مقدار بارش فرین در هر یک از ۱۲ ایستگاه مورد بررسی در فروردین ماه رخ داده است که سهم بارش فرین از کل بارش فرین سالانه بین ۲۱/۸ درصد در ایستگاه شازند تا ۳۰ درصد در ایستگاه غرق‌آباد قرار دارد (جدول ۹). در جدول ۸، همچنین با توجه به بارش‌های فرین رخ داده در اسفندماه ۱۳۹۷ و فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در منطقه وسیعی از کشور، شاخص‌های بارش فرین در این سال نیز نشان داده شده است.

جدول ۵- آماره من-کندال در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی (نارنجی پررنگ: روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۵٪، نارنجی کم‌رنگ: روند افزایشی در سطح اطمینان ۹۰٪، آبی پررنگ: روند کاهشی در سطح اطمینان ۹۵٪، آبی کم‌رنگ: روند کاهشی در سطح اطمینان ۹۰٪)

Table 5- Mann-Kendall statistics in meteorological stations of Markazi Province (dark orange: increasing trend at 95% confidence level, light orange: increasing trend at 90% confidence level, dark blue: decreasing trend at 95% confidence level, light blue: decreasing trend at the 90% confidence level)

		Test Z											
		اراک	ساوه	تفرش	خمین	شازند	دلیجان	محلات	کمیجان	فرمیهین	خنداب	غرق‌آباد	آشتیان
		Arak	Saveh	Tafresh	Khomeyn	Shazand	Delijan	Mahallat	Komeijan	Farmahin	Khondab	Ghaqabad	Ashtiyan
ماهانه Monthly	فروردین 20Mar-19Apr	1.39	1	1.34	1.07	0.65	0.61	0.77	0.93	1.46	1.27	1.07	1.02
	اردیبهشت 20Apr-20May	- 1.16	- 1.66	-0.85	-1.66	-1.36	-1.60	-1.71	-1.43	-1.41	-0.66	0.42	0.88
	خرداد 21May-20June	- 0.98	- 1.08	0.02	-0.20	-1.40	-0.74	-0.74	0.61	0.22	1.13	0.15	-0.08
	تیر 21June-21July	- 0.82	- 0.74	0.91	2.42	0.18	-0.83	0.87	0.61	-1.00	1.52	0.87	0.94
	مرداد 22July-21Aug	0.58	0	-0.54	0.47	1.62	0.53	-0.53	1.77	0.62	0.12	-0.08	0.95
	شهریور 22Aug-22Sep	- 0.16	0.90	0.36	0.38	0	-0.42	-0.15	0.63	0.90	0.06	-0.34	0.40
	مهر 23Sep-22Oct	- 0.33	- 0.22	-0.10	0.18	-0.04	-0.42	0.54	0.36	0.06	-0.16	-0.33	0.04
	آبان 23Oct-21Nov	1.12	1.46	1.92	1.73	1.02	1.34	1.57	1.21	1.28	1.26	1.31	1.69
	آذر 22Nov-21Dec	0	- 0.41	-0.44	0.46	0.02	0.89	-0.61	1.11	0.14	0.63	0.07	0.92
	دی 22Dec-20Jan	- 0.03	- 0.54	-0.34	-0.12	-0.17	0.26	-1.18	-1.43	0.00	-0.51	-0.37	-0.25
	بهمن 21Jan-19Feb	- 1.65	- 1.77	-1.48	-1.75	-0.48	-2.08	-2.16	-1.21	-1.20	-1.19	-1.84	-0.23
	اسفند 20Feb-19Mar	- 0.75	- 0.41	-0.82	-0.09	-0.37	0.14	-1.03	-0.54	0.05	0.02	1.31	1.08
فصلی Seasonal	بهار Spring	0.31	- 0.39	0.24	-0.04	-0.07	0.10	-0.82	0.43	0.43	0.48	1.41	1.21
	تابستان			0.69	1.13	0.43	0.04	-0.69	1.13	0.23	0.23	-0.18	0.49
	Summer	- 0.73	0.73										
	پاییز Autumn	1.29	0.93	1.50	1.37	1.31	1.09	0.52	1.82	1.03	1.43	0.77	1.52
	زمستان Winter	- 1.36	- 1.53	-1.58	-1.21	-0.17	-0.49	-2.07	-1.50	-0.21	-0.44	-0.52	0.50
	سالانه Anual	- 0.73	- 1.18	-0.92	-0.75	-1.33	-0.08	-2.28	-0.02	-0.14	0.54	1.02	1.96

جدول ۶- آستانه بارش فرین میانگین ۳۰ ساله در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی

Table 6- Extreme precipitation threshold average of 30 years in meteorological stations of Markazi province

آستانه بارش فرین میانگین ۳۰ ساله ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی												
Extreme precipitation threshold average of 30 years of meteorological stations of Markazi province												
نام ایستگاه	اراک	ساوه	تفرش	خمین	شازند	دلیجان	محلات	کمیجان	فرمهین	خنداب	غرق‌آباد	آشتیان
Name	Arak	Saveh	Tafresh	Khomeyn	Shazand	Delijan	Mahallat	Komeijan	Farmahin	Khondab	Ghaqabad	Ashtiyan
Rwn95 (mm)	21	15	17	21	28	15	19	17	16	21	17	18

جدول ۷- بیشینه و کمینه R95pT در دوره ۳۰ ساله در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی

Table 7- The maximum and minimum of R95pT in the 30-year period in the meteorological stations of Markazi province

	اراک	ساوه	تفرش	خمین	شازند	دلیجان	محلات	کمیجان	فرمهین	خنداب	غرق‌آباد	آشتیان
	Arak	Saveh	Tafresh	Khomeyn	Shazand	Delijan	Mahallat	Komeijan	Farmahin	Khondab	Ghaqabad	Ashtiyan
Max R95pT	60	59	48	57	62	58	50	54	49	45	45	54
Min R95pT	10	7	11	15	11	9	8	8	8	7	8	10

جدول ۸- نمونه‌هایی از چهار شاخص بارش فرین محاسبه شده در دوره مورد مطالعه (۱۳۷۱-۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰)

Table 8- Examples of four extreme precipitation indices calculated in the studied period (1370-1371 to 1399-1400)

ایستگاه	سال	R95p (mm)	R95d (days)	AEPI (m/day)	R95pT (%)	ایستگاه	سال	R95p (mm)	R95d (days)	AEPI (m/day)	R95pT (%)
Station	Year	(mm)	(days)	(m/day)	(%)	Station	Year	(mm)	(days)	(m/day)	(%)
اراک Arak	1397	317.4	10	31.74	60	دلیجان	1380	160.7	5	32.14	58
	1377	87.2	4	21.8	59	دلیجان	1397	79.6	4	19.9	27
ساوه Saveh	1373	132.3	6	22.05	51	محلات	1378	90.2	2	45.1	50
	1397	128.2	5	25.64	44	محلات	1397	107.4	4	26.85	29
تفرش Tafresh	1370	220.5	8	27.56	48	کمیجان	1378	100	3	33.33	54
	1378	135.2	4	33.8	48	کمیجان	1397	240.5	7	34.36	46
	1397	167.6	5	33.52	37	فرمهین	1378	111.7	2	55.85	49
خمین Khomeyn	1378	82.1	2	41.05	57	فرمهین	1397	195.2	7	27.89	48
	1380	251.6	8	31.45	52	خنداب	1397	255.4	5	51.08	45
	1397	249.2	8	31.15	49	خنداب	1397	255.4	5	51.08	45
شازند Shazand	1378	217	5	43.4	62	غرق‌آباد	1397	213.20	7	30.46	45
	1379	189.2	5	37.84	50	غرق‌آباد	1397	213.20	7	30.46	45
	1397	481.8	12	40.15	50	آشتیان	1378	110	2	55	54
						آشتیان	1397	187.9	7	26.84	44

جدول ۹- سهم مقدار بارش فرین فروردین ماه از کل میانگین بارش فرین سالانه در دوره ۳۰ ساله بر حسب درصد در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی

Table 9- The share of the extreme precipitation in 20Mar-19Apr from the total average annual precipitation in the 30-year period in terms of percentage in the meteorological stations of Markazi province

آشتیان	غرق آباد	خنداب	فرمهین	کمیجان	محلات	دلیجان	شازند	خمین	تفرش	ساوه	اراک
Ashtiyan	Ghaqabad	Khondab	Farmahin	Komeijan	Mahallat	Delijan	Shazand	Khomeyn	Tafresh	Saveh	Arak
28	30	25.8	28.6	23.2	22.9	25	21.8	26.1	24.5	22.5	25

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر ویژگی‌های بارش در ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در دوره آماری سال زراعی ۱۳۷۱-۱۳۷۰ تا ۱۴۰۰-۱۳۹۹ با روش‌های آماری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. سپس با نرم‌افزار ArcGIS نقشه‌های توزیع مکانی آنها ترسیم و بررسی و تحلیل شد. همچنین روند تغییرات بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون من-کندال مورد مطالعه قرار گرفت. در نهایت با توجه به گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و افزایش وقوع بارش‌های فرین در مناطق مختلف دنیا، بارش فرین در مناطق مختلف این استان با استفاده از داده‌های بارش روزانه در بازه زمانی مورد مطالعه با استفاده از چهار شاخص بارش فرین مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که طبق بررسی توزیع مکانی بارش در استان مرکزی، بیشینه مقدار میانگین بارش سالانه در جنوب غرب استان مرکزی در ایستگاه شازند (۴۹۰/۱ میلی‌متر) و کمینه آن در مناطق شرقی استان به وقوع پیوسته است. توزیع مکانی بارش فصلی در استان مرکزی توزیعی مشابه توزیع سالانه بارش را نشان می‌دهد به جز در فصل تابستان که با مقادیر بارش میانگین فصلی تک رقمی، بیشینه بارش در محلات و کمیجان به ترتیب با میانگین بارش ۶/۷ و ۵/۸ میلی‌متر و کمینه آن در ساوه با مقدار ۲/۳ میلی‌متر رخ داده است. توزیع مکانی بارش سه ماه پاییز نشان می‌دهد که بطور متوسط مقدار بارش آذر ماه نسبت به ماه‌های مهر و آبان بیشتر است. همچنین در این سه ماه مقدار بارش در شرق استان نسبت به غرب استان کمتر می‌باشد. همچنین توزیع مکانی میانگین بارش در سه ماه زمستان نشان می‌دهد که در اسفند ماه مقدار بارش جنوب استان نسبت به دو ماه دیگر بیشتر است و در بهمن ماه مقدار بارش شمال استان نسبت به دو ماه دی و اسفند بیشتر است. در فصل بهار توزیع مکانی بارش همچنان مانند سایر ماه‌ها (به جز سه ماه کم بارش خرداد، تیر و مرداد)، میزان بارش در جنوب غرب استان بیشتر است و به سمت شمال و شرق مقدار وقوع بارش کاهش می‌یابد. قابل توجه است که در فروردین ماه میانگین بارش نسبت به کل ماه‌های سال بیشتر است. همچنین مقدار بارش در خردادماه نسبت به دو ماه اول بهار کاهش قابل توجهی دارد. در فصل تابستان توزیع مکانی بارش در تیرماه حاکی از وقوع مقدار بارش بسیار کم در سطح استان می‌باشد که بیشینه وقوع بارش در این ماه در دوره

آماري مورد مطالعه در جنوب شرق و بخش‌هایی از غرب استان مرکزی است. همچنین توزیع مکانی مقدار بارش در ایستگاه‌های استان مرکزی در مردادماه بیانگر وقوع بارش‌های ناچیز در سطح استان مرکزی است. توزیع مکانی مقدار بارش در استان مرکزی در شهریورماه آخرین ماه سال زراعی حاکی از وقوع بارش‌های با مقدار ناچیز در سطح استان می‌باشد که در نیمه جنوبی استان مقدار این بارش‌ها بیشتر از نیمه شمالی استان است.

نتیجه بررسی روند تغییرات بارش ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال روند یکپارچه‌ای را نشان نمی‌دهد که با نتایج عطایی و فنایی (Ataee & Fanaee, 2012) که در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۶۶ تغییرات متغیر بارش را در چهار ایستگاه اراک، تفرش، ساوه و شمس‌آباد بررسی نمودند و هیچگونه روند سالانه و فصلی (تنها روند کاهشی در فصل تابستان در ایستگاه تفرش) را مشاهده نکردند، مطابقت دارد. در حالت کلی می‌توان گفت تقریباً در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی استان مرکزی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند حداقل در سطح اطمینان ۹۰٪ در بارش بهمن ماه روند کاهشی معنی‌دار وجود دارد.

بررسی مقادیر بیشینه شاخص R95pT نشان می‌دهد که در بعضی از سال‌ها مقدار بارش فرین که در تعداد روز کمی اتفاق افتاده است سهم زیادی از بارش سال مربوطه را شامل می‌شود. به طور متوسط بیشینه شاخص R95pT، ۵۳ درصد از بارش سال را شامل می‌شود که در صورت آگاهی از زمان وقوع این فرین‌ها مدیریت این سیلاب‌ها و استفاده بهینه از منابع آبی از نتایج آن است. همچنین بیشترین مقدار بارش فرین در هر یک از ۱۲ ایستگاه مورد بررسی در فروردین ماه رخ داده است که سهم بارش فرین از کل بارش فرین سالانه بین ۲۱/۸ درصد در ایستگاه شازند تا ۳۰ درصد در ایستگاه غرق‌آباد قرار دارد. همچنین با توجه به بارش‌های فرین رخ داده در اسفندماه ۱۳۹۷ و فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در منطقه وسیعی از کشور، شاخص‌های بارش فرین در این سال نیز بررسی شده است. در این سامانه فعال در روزهای اوج فعالیت (دهم تا سیزدهم فروردین سال زراعی ۱۳۹۷ (فروردین ۱۳۹۸))، شدت بارش در استان‌های غربی کشور شامل استان‌های ایلام، لرستان، همدان، کرمانشاه، البرز، چهارمحال و بختیاری، مرکزی، کهگیلویه و بویراحمد، زنجان کردستان، آذربایجان غربی و فارس بوده است و منجر به وقوع سیل در مناطق زیادی از غرب کشور شده است. بیشینه بارش در روز ۱۲

فروردین و به میزان ۱۵۵ میلی‌متر در ایستگاه نهاوند استان همدان
گزارش شده است. در استان مرکزی بیشینه بارش در این روز در
خنداب به میزان ۹۳/۸ میلی‌متر و کمینه آن در شرق استان مرکزی و
در دلیجان به میزان ۱۸ میلی‌متر رخ داده است.

منابع

1. Alizadeh, A. (2015). *Principles of applied hydrology*, Imam Reza University Publications.
2. Ataee, H., & Fanaee, R. (2012). Studying the climate change of Markazi province by Mann-Kendall method. *Nivar*, 36(77-76), 37-48.
3. Behnia, M.R. (1997). *Cold season cereals wheat, barley, oat, rye*. Tehran University Publications.
4. Allan, R.P., & Soden, B.J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321(5895), 1481-1484. <https://doi.org/10.1126/science.1160787>
5. Choi, G., Collins, D., Ren, G., Trewin, B., Baldi, M., Fukuda, Y., Afzaal, M., Pianmana, T., Gomboluudev, P., Huong, P.T.T., Lias, N., Kwon, W.-T., Boo, K.-O., Cha, Y.-M., & Zhou, Y. (2009). Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955-2007. *International Journal of Climatology*, 29(13), 1906-1925. <https://doi.org/10.1002/joc.1979>
6. Cui, D., Wang, C., & Santisirisomboon, J. (2019). Characteristics of extreme precipitation over eastern Asia and its possible connections with Asian summer monsoon activity. *International Journal of Climatology*, 39(2), 711-723. <https://doi.org/10.1002/joc.5837>
7. Dollan, I.J., Maggioni, V., & Johnston, J. (2022). Investigating temporal and spatial precipitation patterns in the Southern Mid-Atlantic United States. *Frontiers in Climate*, 3. <https://doi.org/10.3389/fclim.2021.799055>
8. Ebodé, V.B. (2022). Analysis of the spatio-temporal rainfall variability in Cameroon over the period 1950 to 2019. *Atmosphere*, 13(11), 1769. <https://doi.org/10.3390/atmos13111769>
9. Fatichi, S., & Caporali, E. (2009). A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in Tuscany. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(13), 1883-1893. <https://doi.org/10.1002/joc.1921>
10. Halabian, A., & Ghasemi Siani, A. (2021). Analysis of the spatial and temporal trend in precipitation on Caspian basin using GPCC data. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 283-294. <http://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.125399.1610>
11. Han, H., Hou, J., Jiang, R., Gong, J., Bai, G., Kang, Y., Qi, W., Li, Y., & Li, B. (2021). Spatial and temporal variation of precipitation characteristics in the semiarid region of Xi'an, northwest China. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6), 2697-2715. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.048>
12. Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, Charles Griffin: London, UK.
13. Ling, M., Han, H., Wei, X., & Lv, C. (2021). Temporal and spatial distributions of precipitation on the Huang-Huai-Hai Plain during 1960-2019, China. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6), 2232-2244. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.313>
14. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13, 245-259.
15. Mir Mosavi, H., Doustkamian, M., & Setode, F. (2016). Analyzing spatial autocorrelation patterns of heavy and super heavy showers of Iran. *Geography and Environmental Planning*, 27(3), 67-86. <http://doi.org/10.22108/gep.2017.97958>
16. Papalexiou, S.M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resources Research*, 55, 4901-4914. <https://doi.org/10.1029/2018WR024067>
17. Panahi, A., Hosseini, S. M., Khoramabadi, F., & Ghavibonyad, F. (2021). The study of spatial-temporal changes in the trend of autumn precipitation in Northwest Iran. *Climate Change Research*, 2(8), 67-82. <http://doi.org/10.30488/ccr.2021.320407.1066>
18. Peng, Y., Zhao, X., Wu, D., Tang, B., Xu, P., Du, X., & Wang, H. (2018). Spatiotemporal variability in extreme precipitation in China from observations and projections. *Water*, 10(8), 1089. <https://doi.org/10.3390/w10081089>
19. Rasooli, A. A., Roshani, R., & Ghasemi, A. R. (2013). Analyzing the spatial-temporal changes of annual precipitation of Iran. *Geographical Researches*, 28(1), 205-224.
20. Shiu, C.-J., Liu, S. C., Fu, C., Dai, A., & Sun, A. (2012). How much do precipitation extremes change in a warming climate? *Geophysical Research Letters*, 39(17), L17707. <https://doi.org/10.1029/2012GL052762>
21. Tang, B., Hu, W., & Duan, A. (2021). Future projection of extreme precipitation indices over the Indochina Peninsula and South China in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(21), 8793-8811. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0946.1>
22. Wang, Y., Ding, Y.Y., & Miao, Q.L. (2012). Spatial and temporal variations of extreme precipitation events in Northeast China. *Advanced Materials Research*, 573-574, 395-399. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.573-574.395>
23. Wu, C., Huang, G., Yu, H., Chen, Z., & Ma, J. (2013). Spatial and temporal distributions of trends in climate extremes of the Feilaixia catchment in the upstream area of the Beijiang River Basin, South China. *International*

- Journal of Climatology*, 34, 3161–3178. <https://doi.org/10.1002/joc.3900>
24. Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., & Pan, X. (2005). Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *Journal of Climate*, 18(7), 1096-1108. <https://doi.org/10.1175/JCLI-3318.1>
25. Zhang, K., Pan, S., Cao, L., Wang, Y., Zhao, Y., & Zhang, W. (2014). Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012. *Quaternary International*, 349, 346–356. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.050>
26. Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B., & Zwiers, F.W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
27. Zhang, X., Zhang, J., Zhang, X., Yang, M., Pan, X., Liu, C., & Yang, S. (2021). *Study on Precipitation Evolution Characteristics in Tongzhou District of Beijing in Recent 65 Years*. <https://doi.org/10.3233/ATDE210206>

Contents

Determination of Applied Water and Water Productivity in Barley Production in Iran	659
S.A. Haghayeghi Moghaddam, F. Abbasi, A. Nasser, P. Varjavand, S.E. Dehghanian, MM. Ghasemi, S. Sepehri, H. Khosravi, M. Karimi, F. Parchami Araghi, M. Goodarzi, M. Miranzadeh, M. Farzamnia, A. Uossef Gomrokchi, M. Rezvani, R. Nikanfar, H. Mousavi fazl, A. Ghadam Firouzabadi	
Evaluation of Elasticity-Based Methods in Estimating Contribution of Climate Change and Human Activities on Rivers' Discharge (Case Study: Gharehsoo River)	673
H. Norouzzadeh- M. Hasanpour Kashani- A. Rasoulzadeh	
Consequence of Natural and Long Term Oil Pollution on Microbial Population and Urease Activity of Soil	685
Sh. Moradi, M.R. Sarikhani, A. Beheshti Ale-Agha, A. Reyhanitabar, S.S. Alavi-kia, A. Bandehagh, R. Sharifi	
The Effect of Plantation Stands with Different Ages and Rangeland Cover on the Properties of Organic and Surface Soil Layer	701
Y. Kooch, M. Tavakoli Feizabadi, K. Haghverdi	
Determination of the Optimal Ranges for Soil Pore Size Distribution Curve Parameters	721
M. Zangiabadi	
Investigating the Soil Evolution and Microbial Respiration along a Semi-Arid Alluvial Fan in Northeastern Iran	733
M. Hassanzadeh Bashtian, A. Karimi, A. Sepehr, A. Lakzian, O. Bayat	
The Effect of Nitrogen Form on Chemical Composition, Leaf Photosynthetic Pigments Concentration and Yield of Two Fodder Maize (<i>Zea mays</i> L.) Cultivars in Soilless Culture	751
M. Ghorbani, SH. Kiani, A. Moharrery, S. Fallah	
Projected Precipitation Extremes in Lake Urmia Basin under Climate Change	769
N. Ebrahimi- A. Zarrin- A. Mofidi- A.A. Dadashi-Roudbari	
Evaluation of Combined Agricultural Drought Index (CDI), Prediction Methods Based on Satellite Images via Deep Learning and Machine Learning Approaches	787
N. Shamloo, M.T. Sattari, Kh. Valizadeh Kamran, H. Apaydin	
Analysis of Crop Precipitation and Its Extreme Events in Markazi Province During the Statistical Period of 1991-1992 to 2020-2021	809
S. Khansalari, M. Omid, M. Fallahzadeh	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 5

2023

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., 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: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).