

عنوان مقالات

- ارزیابی حجم آب آبیاری و رد پای آب محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی ۵۰۵
مصطفی گودرزی - فربرز عباسی - ابوالفضل هدایتی پور
- برآورد نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژیک گیاه زیره سبز در مناطق مختلف استان اصفهان ۵۲۱
امیرموشنگ جلالی - حمیدرضا سالمی
- تحلیل مناقشات منابع آب مشترک ناشی از توسعه اراضی کشاورزی با استفاده از نظریه بازی‌ها و مدل GMCR+ (مطالعه موردی: حوضه نازلوجای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه) ۵۳۳
محمد کوهانی - جواد بهمنش - وحیدرضا وردی نژاد - مریم محمدپور
- بررسی قابلیت گیاه‌بالایی آتریپلکس (*Atriplex* sp.) و خرزهره (*Nerium oleander*) در جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در مرکز دفن آزادکوه ۵۴۹
مریم رفعتی - مریم ملک زاده - مجید فیروزی
- ارزیابی سطوح مختلف کود نیتروژن و کمپوست گاوی بر عملکرد و جذب نیترات موسیر (*Allium hirtifolium* Boiss.) در منطقه فریدونشهر ۵۶۳
زهره‌خان محمدی - ابوالفضل احمدی
- تأثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی ۵۷۷
زینب سخنور ماهانی - ناصر برومند - مهدی سرچشمه پور
- اثر زغال زیستی اصلاح شده اسیدی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی عناصر کم‌مصرف در گیاه کینوا (رقم میزوان) در یک خاک آهکی ۵۹۱
مهری بزی عبدلی - مجتبی بارانی مطلق - امیر بستانی - طالب نظری
- مقایسه کارایی سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی (ST) و جهانی (WRB) در گروه‌بندی خاک‌های گچی - آهکی غرب استان کهگیلویه و بویراحمد ۶۰۵
حمیدرضا اولیایی
- تحلیل زمانی - مکانی ابرناکی در ایران ۶۲۳
آوا غلامی - سید حسین میرموسوی - مسعود جلالی - کوهزاد رئیس پور
- بررسی فصلی تبخیر تعرق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران ۶۴۵
آمنه یحوی دیزج - طیه اکبری ازیرانی - شهریار خالدی - خدیجه جوان

Contents

- Evaluation of Irrigation Water Application and Water Footprint of Major Agricultural and Horticultural Crops in the Markazi Province 503
M. Goodarzi, F. Abbasi, A. Hedayatipour
- Estimation of Water Requirement of Different Phenological Stages of Green Cumin Plant in Different Regions of Isfahan Province 519
A.H. Jalali, H. Salemi
- Common Water Resources Conflict Analysis due to Agriculture Land Development Using Game Theory and GMCR+ (Case Study: Nazlouchay Basin in Urmia Lake Watershed) 531
M. Koohani, J. Behmanesh, V.R. Verdinejad, M. Mohammadpour
- Investigation on Phytoremediation Capability of Artiplex (*Atriplex* sp.) and Oleander (*Nerium oleander*) in Aradkoo Landfill for Cadmium and Lead 547
M. Rafati, M. Malekzade, M. Firozi
- Evaluation of Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Cow Compost on the Yield and Nitrate Uptake of *Allium hirtifolium* in FereydunShahr Region 561
Z. Khanmohammadi, A. Ahmadi
- The Effect of Rock Phosphate Acidification and Vermicompost on Phosphorus Release Kinetics in a Calcareous Soil 575
Z. Sokhanvar Mahani, N. Boroomand, M. Sarcheshmeh Pour
- Acid-modified Biochar Effect on Some Physiological Indicators and Micronutrient Availability of Quinoa (cv. Gizavan) in a Calcareous Soil 589
M. Bazi Abdoli, M. Barani Motlagh, A. Bostani, T. Nazar
- Comparing Soil Taxonomy and WRB Efficiency for the Classification of Gypsiferous-Calcareous Soils in the West of Kohgiluyeh-Boyerahmad Province 603
H.R. Owliaie
- Spatial-Temporal Analysis of Cloudiness Across the Iran 621
A. Gholami, H. Mir Mousavi, M. Jalali, K. Raispour
- Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN 643
A. Yahyavi Dizaj, T. Akbari Azirani, Sh. Khaledi, Kh. Javan

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 37 شماره 4 مهر - آبان سال 1402

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

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

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمالي، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدي، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

مقاله های 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 می شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 505 ارزیابی حجم آب آبیاری و رد پای آب محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی
مصطفی گودرزی - فریبرز عباسی - ابوالفضل هدایتی پور
- 521 برآورد نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژیک گیاه زیره سبز در مناطق مختلف استان اصفهان
امیر هوشنگ جلالی - حمیدرضا سالمی
- 533 تحلیل مناقشات منابع آب مشترک ناشی از توسعه اراضی کشاورزی با استفاده از نظریه بازی‌ها و مدل GMCR+ (مطالعه موردی: حوضه نازلوچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه)
محمد کوهانی - جواد بهمنش - وحیدرضا وردی نژاد - مریم محمدپور
- 549 بررسی قابلیت گیاه پالایی آتریپلکس (*Atriplex* sp.) و خرزهره (*Nerium oleander*) در جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در مرکز دفن آرادکوه
مریم رفعتی - مریم ملک زاده - مجید فیروزی
- 563 ارزیابی سطوح مختلف کود نیتروژن و کمپوست گاوی بر عملکرد و جذب نیترات موسیر (*Allium hirtifolium* Boiss.) در منطقه فریدونشهر
زهرا خان محمدی - ابوالفضل احمدی
- 577 تأثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی
زینب سخنور ماهانی - ناصر برومند - مهدی سرچشمه پور
- 591 اثر زغال زیستی اصلاح شده اسیدی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی عناصر کم‌مصرف در گیاه کینوا (رقم گیزوان) در یک خاک آهکی
مهری بزی عبدلی - مجتبی بارانی مطلق - امیر بستانی - طالب نظری
- 605 مقایسه کارایی سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی (ST) و جهانی (WRB) در گروه‌بندی خاک‌های گچی - آهکی غرب استان کهگیلویه و بویراحمد
حمیدرضا اولیایی
- 623 تحلیل زمانی - مکانی ابرناکی در ایران
آوا غلامی - سید حسین میرموسوی - مسعود جلالی - کوهزاد رئیس پور
- 645 بررسی فصلی تبخیر ترق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران
آمنه یحیوی دیزج - طیبه اکبری ازیرانی - شهریار خالدی - خدیجه جوان



Evaluation of Irrigation Water Application and Water Footprint of Major Agricultural and Horticultural Crops in the Markazi Province

M. Goodarzi^{1*}, F. Abbasi², A. Hedayatipour³

Received: 15-02-2023

Revised: 17-06-2023

Accepted: 26-06-2023

Available Online: 27-06-2023

How to cite this article:

Goodarzi, M., Abbasi, F., & Hedayatipour, A. (2023). Evaluation of irrigation water application and water footprint of major agricultural and horticultural crops in the Markazi Province. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 503-517. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81144.1253>

Introduction

The lack of water resources and increase in water demand are among the effective factors in the imbalance of the water resources in each region, and it is necessary to manage the proper use of available water resources in all activities. Water in the agricultural sector is one of the main factors of production, which should be conveyed by irrigation systems to the field level and made available for the plant roots. The necessity of macro-planning in water management and consumption imposes a comprehensive study of the amount of water consumed in the agricultural sector. Hence, this study was conducted with the objective of directly measuring and field-assessing the applied water, water productivity, and water footprint associated with the primary crops cultivated in Markazi Province, all managed by local farmers.

Methodology

For this purpose, 141 farms were selected in the major production areas of the main agricultural and horticultural crops of Markazi province with the coordination of the Agricultural Jihad centers. Then, the volume of water applied was measured without interfering in the irrigation scheduling of the users. To do so, first, the flow rate of the water source (canal, well, aqueduct or spring) was measured with a suitable device (flume and meter) in each of the selected farms. Then, by carefully monitoring the irrigation schedule of the farm, including the time of each irrigation, the number of irrigation throughout the year, as well as measuring the area under crop cultivation, the amount of water used by the crop was measured for each of the selected farms during the season. Also, based on the measured data, the amounts of blue, green and gray water footprints were determined for each of the examined crops. For this purpose, the blue, green and gray water footprints of different crops were calculated using the framework provided by Hoekstra and Chapagain (2008), and Hoekstra *et al.*, (2011).

Results and Discussion

The irrigation intervals in the studied fields varied between 3 and 15 days with an average of 8 days and the average irrigation depth varied between 26.2 and 99 mm with an average of 67.8 mm in different crops. The results showed that the average volume of applied water for the studied crops in Markazi province was 10782 cubic meters per hectare. Also, the minimum and maximum amount of applied water for the evaluated crops was as follows: barley 3783 and 7232, alfalfa 10382 and 19797, beans 8280 and 17840, watermelon 5333 and 7174, walnuts 4420 and 29600, almonds 3850 and 13932, peaches 6872 and 17727, cherries 7050 and 14645, pomegranates 7156 and 20790, and grapes 5937 and 18168 cubic meters per hectare. Furthermore, the average value of irrigation water efficiency index and water footprint was as follows: barley 0.46 and 1642, alfalfa 0.92 and 700, bean 2924 and

1 and 3- Assistant Professor and Scientific Member, Agricultural Engineering Research Department, Markazi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Arak, Iran, respectively.

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

2- Professor, Irrigation and Drainage Department, Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, AREEO, Karaj, Iran

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

0.24, watermelon 9.37 and 117, walnut 0.1 and 6706, almonds 0.16 and 6857, peach 2.48 and 242, cherries 0.73 and 875, pomegranates 1.33 and 636, and grapes 11.2 and 322. Based on the obtained results, the average total water footprint index was equal to 2102 cubic meters per ton. On average, the almond with a water footprint of 6857 cubic meters per ton had the highest share in allocating the water footprint in the crop production of the province. Whereas, the lowest water footprint related to the watermelon with a water footprint of 117 cubic meters per ton. The average values of the irrigation application efficiency index, irrigation water productivity, and water footprint for the examined farms were 72.5%, 1.79 kg/m³, and 2,102 m³/ton, respectively. In summary, the results indicate that the combined volume of irrigation water and beneficial rainfall in the irrigated fields within Markazi Province surpasses the actual water demand of the crops. This underscores the substantial impact of irrigation management on water utilization in the region.

Conclusion

On average, the total volume of irrigation water and effective rainfall in irrigated fields and gardens in Markazi Province is more than the actual water requirement of the plant. In general, the results showed that irrigation management has a great impact on the amount of water use in the region. Based on the obtained results, considering that most of the farms and gardens receive water in an intermittent manner, in principle, no special attention is paid to the need for water and even effective rainfall, and the amount of water availability has the greatest impact on water consumption. Therefore, in order to reduce water consumption and improve water efficiency, it is suggested to manage the delivery of water to farmers during the season and according to their crop water needs. Also, the results of the water footprint can be used to improve water resource policies at the province level, land use studies, cropping pattern modification, and environmental sector policies.

Keywords: Irrigation efficiency, Green water, Water requirement, Water use efficiency

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۱۷-۵۰۳

ارزیابی حجم آب آبیاری و ردپای آب محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی

مصطفی گودرزی^{۱*} - فریرز عباسی^۲ - ابوالفضل هدایتی پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۵

چکیده

لزوم برنامه‌ریزی کلان در مدیریت و مصرف آب، بررسی جامع در خصوص حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی را ضروری می‌نماید. لذا، این تحقیق با هدف اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای میزان آب کاربردی، بهره‌وری آب و ردپای آب برای محصولات غالب استان مرکزی تحت مدیریت بهره‌برداران اجرا گردید. بدین منظور، ۱۴۱ مزرعه و باغ در مناطق مهم تولید محصولات عمده زراعی و باغی استان مرکزی، با هماهنگی مدیریت‌های جهاد کشاورزی انتخاب و حجم آب داده شده بدون دخالت در برنامه آبیاری بهره‌برداران اندازه‌گیری شد. براین اساس ابتدا مقدار دبی منبع آب (کانال، چاه، قنات و یا چشمه) با استفاده از فلوم و کنتور، در هر کدام از مزارع منتخب اندازه‌گیری شد. سپس با پایش دقیق برنامه آبیاری مزرعه شامل زمان هر نوبت آبیاری، تعداد دفعات آبیاری در طول سال و همچنین اندازه‌گیری سطح زیر کشت محصول، حجم آب کاربردی محصول برای هر کدام از مزارع و باغات منتخب در طول فصل اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین حجم آب کاربردی برای کل محصولات مورد مطالعه در سطح استان ۱۰۷۸۲ متر مکعب در هکتار بود. همچنین، کمترین و بیشترین حجم آب کاربردی به‌ترتیب برای محصول جو ۳۷۸۳ و ۷۲۳۲، یونجه ۱۰۳۸۲ و ۱۹۷۹۷، لوبیا ۸۲۸۰ و ۱۷۸۴۰، هندوانه ۵۳۳۳ و ۷۱۷۴، گردو ۴۴۲۰ و ۲۹۶۰۰، بادام ۳۸۵۰ و ۱۳۹۳۲، هلو ۶۸۷۲ و ۱۷۷۲۷، گیلان ۷۰۵۰ و ۱۴۶۴۵، انار ۷۱۵۶ و ۲۰۷۹۰ و انگور ۵۹۳۷ و ۱۸۱۶۸ متر مکعب در هکتار بود. مقدار میانگین شاخص بهره‌وری آب آبیاری و ردپای آب به‌ترتیب برای محصول جو ۰/۴۶ و ۱۶۴۲، یونجه ۰/۹۲ و ۷۰۰، لوبیا ۰/۲۴ و ۲۹۲۴، هندوانه ۹/۳۷ و ۱۱۷، گردو ۰/۱ و ۶۷۰۶، بادام ۰/۱۶ و ۶۸۵۷، هلو ۲/۴۸ و ۲۴۲، گیلان ۰/۷۳ و ۸۷۵، انار ۱/۳۳ و ۶۳۶ و انگور ۲/۱۱ و ۳۲۲ بود. بر اساس نتایج به دست آمده، با توجه به اینکه اکثر مزارع و باغات به‌صورت حقایبه‌ای آب دریافت می‌کنند اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش مؤثر توجه ویژه‌ای نمی‌شود و میزان دسترسی به آب بیشترین تأثیر را در مصرف آب دارد. لذا، پیشنهاد می‌شود به‌منظور کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب، تحویل آب به کشاورزان در طول فصل مدیریت شود و حقایبه متناسب با نیاز آبی به آن‌ها تحویل داده شود. از نتایج ردپای آب بدست آمده می‌توان به منظور بهبود سیاست‌گذاری‌های کلان منابع آب در استان، مطالعات آمایش سرزمین، اصلاح الگوی کشت و سیاست‌گذاری‌های بخش محیط زیست استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آب سبز، بهره‌وری آب، راندمان آبیاری، نیاز آبی

۱ و ۳- به‌ترتیب استادیار و مربی بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان مرکزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اراک، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: m.godarzi@areeo.ac.ir

۲- استاد بخش آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

مقدمه

در استان مرکزی بین ۳۳ تا ۷۶/۶ درصد و متوسط آن ۶۱ درصد گزارش شده است.

عظیمی دزفولی (Azimi Dezfuli, 2020)، در تحقیقی مصرف آب در تولید محصولات زراعی در کشور را برآورد نمود. در این تحقیق، با استفاده از بانک اطلاعات نیاز خالص آبیاری محصولات، آمار زراعی سال ۱۳۹۵ و با فرض راندمان آبیاری ۴۴/۷ درصد، مصرف آب محصولات زراعی منتخب را برآورد گردیده است. نتایج نشان داد حداکثر حجم آب مصرفی این محصولات ۷۸/۶ میلیارد مترمکعب است و بیشترین آب مصرفی به تولید ملی گندم اختصاص دارد. کارن و ویرجین (Karen and Virginie, 2012)، برای برآورد فشار بر منابع آب ناشی از تولید محصولات کشاورزی در کشورهای مختلف، از مجموعه اطلاعات AQUASTAT و جداول نیاز آبیاری محصولات زراعی استفاده کردند. در نهایت تقویم آبیاری محصولات زراعی را در قالب یک مدل برای کشورهای مختلف و بر اساس اطلاعات FAO به منظور ارزیابی قابل اطمینان نیاز آب آبیاری در این کشورها ارائه نمودند. یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2018)، در تحقیقی به ارزیابی شاخص ردپای آب محصولات زراعی و باغی استان تهران پرداختند. در این تحقیق به منظور محاسبه ردپای آب محصولات کشاورزی، نیاز آبی گیاه از نرم افزار CropWat، عملکرد محصولات سایر پارامترهای مورد نیاز در محاسبات از طریق آمارنامه‌های کشاورزی محاسبه و گردآوری شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در بخش تولیدات زراعی، مقدار محتوی ردپای آب، به مراتب بیش‌تر از تولیدات باغی می‌باشد. بالاترین میانگین ردپای آب مربوط به محصول گندم (۲۵۳۹ متر مکعب برتن) و پایین‌ترین میانگین ردپای آب مربوط به محصول سیب (۴۷۷ مترمکعب بر تن) بوده است. همچنین با توجه به نتایج، مشخص شد که حجم زیادی از منابع آب استان صرف تولید محصولات زراعی و باغی می‌شود. در تمامی محصولات مورد مطالعه، ردپای آب سبز بیش از سایر اجزای ردپای آب بود که نشان دهنده اتکای تولید محصولات بر بارش باران و رطوبت خاک است و بخش اعظم آب آبیاری از دسترس گیاه در اثر تبخیر یا نفوذ خارج می‌شود.

علیقلی‌نیا و همکاران (Aligholnia et al., 2016)، در تحقیقی به تخمین و ارزیابی ردپای آب آبی و سبز محصولات عمده مورد کشت در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که متوسط سالانه آب مصرفی محصولات غالب تولید شده در حوضه حدود ۳۵۴۷/۸۳ متر مکعب بر تن می‌باشد که از این مقدار سهم دو جزء آب سبز و آبی به ترتیب ۲۵ و ۷۵ درصد است. همچنین نتایج نشان داد که در بین محصولات مورد مطالعه، گندم و یونجه بیشترین ردپای آب را دارا بودند. در حالی که چغندر قند و ذرت علوفه‌ای بالاترین نسبت آب آبی به آب سبز را داشته‌اند. اشک تراب و زیبایی (Ashktorab and

کاهش روزافزون منابع آب در طبیعت و نیاز بی‌پایان انسان به آب و مصرف عمده این ماده حیاتی در بخش کشاورزی، محققان را وادار به بررسی و مطالعات مستمر در مورد روش‌های مختلف آبیاری نموده است تا بتوانند با بکارگیری تکنیک صحیح در امر کنترل مصرف آب، از هدر رفتن این ماده حیاتی و نتایج ناگواری که از مصرف غیراصولی آن برای گیاه و خاک ببار می‌آید جلوگیری به عمل آورند (Akbari, 2019).

آب در بخش کشاورزی یکی از عوامل اصلی تولید است که می‌بایست توسط سامانه‌های آبیاری در سطح مزرعه هدایت و در اختیار ریشه گیاه قرار داده شود. کمبود منابع آبی و افزایش تقاضای آب از جمله عوامل مؤثر در عدم برقراری تعادل بیلان آبی در هر منطقه هستند و مدیریت استفاده مناسب از منابع آب موجود در کلیه فعالیت‌ها ضروری است. در چنین شرایطی یکی از راهکارهای مؤثر و عملی، استفاده بهینه و صرفه‌جویی در مصرف آب است. با توجه به اینکه بخش عمده‌ای از مصارف آب در کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، مدیریت مصرف آب در این بخش بسیار مؤثر و راهگشا خواهد بود (Abbasi et al., 2017). برای برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، نیاز به تخمین نسبتاً دقیق و یا تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف آب از جمله مقدار آب کاربردی، راندمان آبیاری و بهره‌وری آب در محصولات زراعی و باغی مختلف در کشور است (Akbari, 2019).

بررسی‌ها نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در خصوص حجم آب کاربردی در بخش کشاورزی عمدتاً به صورت برآوردی بوده و به روز شده نیست. بر مبنای نتایج مطالعات پیشین، حجم آب کاربردی در بخش کشاورزی از ۷۰ تا ۸۶ میلیارد متر مکعب متغیر بوده است. به طور مثال مقدار آب مصرفی کشاورزی را کمیته ملی آبیاری و زهکشی و سامانی (Samani, 2006)، ۸۶ میلیارد متر مکعب، کارشناسان وزارت نیرو، ۸۳ میلیارد متر مکعب (Anonymous, 1999) و مؤحدانش (Mohaddanesh, 1995) ۷۰ میلیارد متر مکعب گزارش نموده‌اند. اخیراً، در پژوهشی در مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مقدار آب کاربردی کشاورزی با روش بیلان آب، ۷۵ میلیارد متر مکعب در سال برآورد شده است (Naseri et al., 2017).

عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2017)، در تحقیقی به ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران پرداختند. در این تحقیق، به منظور تهیه بانک اطلاعات راندمان آبیاری در کشور، به جمع‌بندی نتایج مطالعات مرتبط با راندمان‌های آبیاری پرداخته شد. نتایج نشان داد که راندمان کاربرد آب آبیاری در کشور از ۲۲/۵ تا ۸۵/۵ درصد متغیر و میانگین آن ۵۶ درصد است. در این تحقیق، راندمان کاربرد آب آبیاری

بدون دخالت در برنامه آبیاری آن‌ها و تحت مدیریت کشاورزان اندازه گیری شد. بدین‌صورت که ابتدا در هر یک از شهرستان‌های مورد مطالعه، مزارع و باغات با هماهنگی مراکز خدمات و مدیریت‌های جهاد کشاورزی انتخاب و حجم آب داده‌شده بدون دخالت در برنامه آبیاری بهره‌برداران اندازه‌گیری گردید. بدین منظور ابتدا مقدار دبی منبع آب ورودی به مزرعه (کانال، چاه، قنات و یا چشمه) با استفاده از فلوم و کنتور حجمی، در هر کدام از مزارع و باغات منتخب اندازه‌گیری شد. پس از تعیین میزان دبی آب ورودی با پایش دقیق برنامه آبیاری شامل زمان هر نوبت آبیاری، تعداد دفعات آبیاری در طول سال، اندازه‌گیری سطح زیر کشت محصول با استفاده از دستگاه GPS (مدل Garmin eTrex Vista) در مزرعه و باغ و حجم آب کاربردی محصول برای هر کدام از مزارع و باغات منتخب در طول فصل اندازه‌گیری شد. همچنین در هر کدام از مزارع و باغات مواردی نظیر بافت خاک، هدایت الکتریکی خاک و آب آبیاری (با نمونه‌برداری و استفاده از شوری‌سنج مدل Mettler Toledo EE-30)، مساحت و موقعیت مکانی، اندازه‌گیری گردید.

در این تحقیق بارندگی مؤثر به روش SCS برآورد شد که مقدار آن با استفاده از رابطه ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد (USDA, 1967). نیاز آبی گیاه به روش پن‌من-مانتیت با استفاده از داده‌های سال زراعی جاری و ۱۰ سال اخیر برای منطقه مورد نظر از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی تهیه و برآورد گردید. در این تحقیق، نیاز آبی گیاه مرجع با اعمال ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو به نیاز آبی خالص گیاه تبدیل شدند (Allen et al., 1998). عملکرد محصول نیز در پایان فصل زراعی اندازه‌گیری و بهره‌وری آب در هر یک از مناطق مورد مطالعه محاسبه و مقایسه شد.

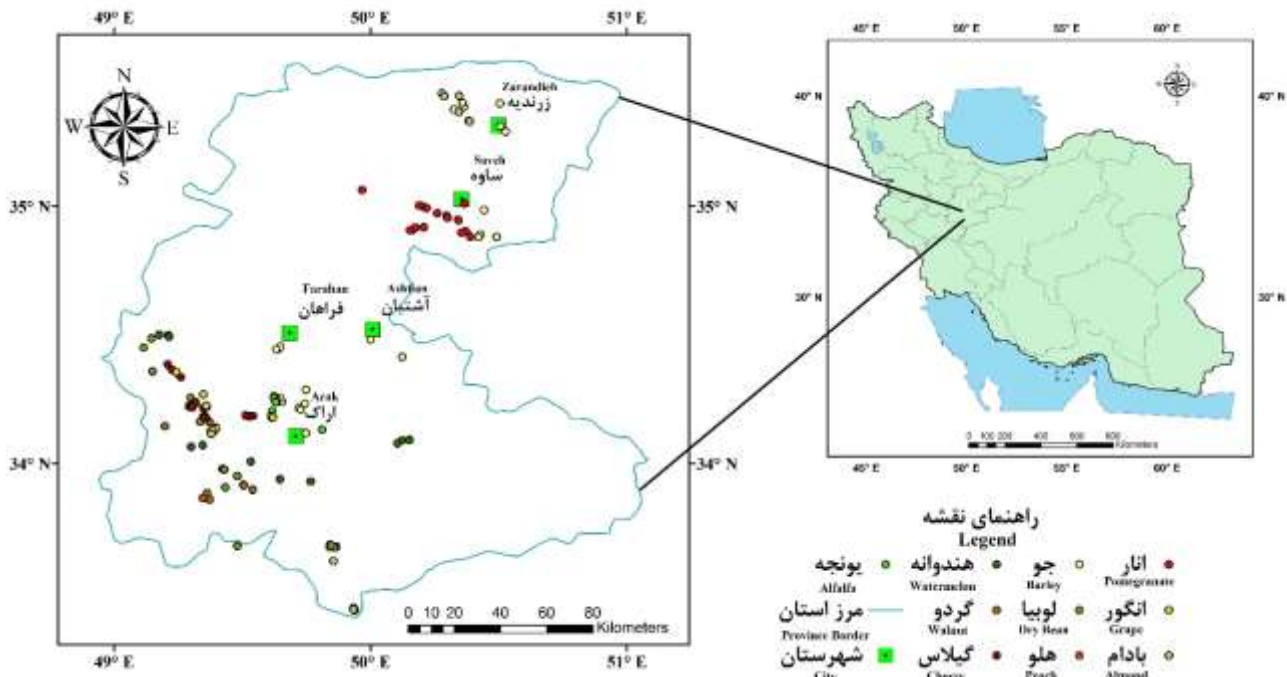
راندمان کاربرد آب در مزرعه با استفاده از نسبت نیاز خالص آبیاری (به روش پن‌من-مانتیت با استفاده از داده‌های سال زراعی جاری) به حجم آب داده شده توسط بهره‌برداران برای هریک از مزارع و باغات مورد مطالعه برآورد و تحلیل شد. این روش متوسطی از شاخص راندمان کاربرد آب را در فصل زراعی ارائه می‌دهد (Goodarzi et al., 2021)؛ (Abbasi et al., 2017). این روش متوسطی از شاخص راندمان کاربرد آب را در فصل زراعی ارائه می‌دهد (Goodarzi et al., 2021). شاخص بهره‌وری آب از نسبت مقدار عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار) به حجم آب کاربردی (متر مکعب در هکتار) به دست آمد؛ به عبارت دیگر شاخص بهره‌وری آب در تولید محصول از رابطه ۴ تعیین شد (Molden et al., 2001).

(Zibaei, 2021)، نیز در تحقیقی به حسابداری رد پای آب محصولات زراعی اصلی در استان فارس پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد، مجموع رد پای آب آبی و سبز برای محصولات گندم و جو، شلتوک، ذرت دانه‌ای، چغندر قند و گوجه‌فرنگی به ترتیب معادل ۱۷۷۸، ۳۲۰، ۴۴۰، ۱۵۱ و ۱۴۶ میلیون متر مکعب است و در مجموع معادل با ۳ میلیارد متر مکعب در سال می‌باشد.

بررسی تحقیقات پیشین مشخص نمود که حجم فراوانی از آب تجدیدپذیر کشور برای تولید محصولات مختلف در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. لذا، برای برنامه‌ریزی کلان در مدیریت و مصرف آب در کشور، تعیین دقیق حجم آب کاربردی در بخش کشاورزی ضروری است. برای برنامه‌ریزی‌های کلان مربوط به تأمین، تخصیص و مصرف اصولی از آب در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، نیاز به تخمین نسبتاً دقیق و یا تعیین شاخص‌های مدیریت مصرف آب از جمله مقدار آب کاربردی، راندمان آبیاری، بهره‌وری آب و رد پای آب در محصولات زراعی و باغی مختلف در کشور است. در حال حاضر بیش از ۹۰ درصد از تولیدات زراعی و باغی در کشور و نیز استان مرکزی، از اراضی فاریاب به دست می‌آید. بنابراین، لزوم برنامه‌ریزی کلان در مدیریت و مصرف آب در سطح استان، بررسی جامع حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی را ضروری می‌نماید. بر اساس بررسی‌های انجام شده مشخص شد که مطالعات انجام شده بر روی حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی به صورت برآورد و موردی بوده و یا به‌طور عمده در شرایط مزارع پژوهشی بوده و میزان آب کاربردی در مزارع و باغات تحت مدیریت بهره‌برداران به ندرت ارائه شده است. لذا، این تحقیق با هدف اندازه‌گیری مستقیم و مزرعه‌ای مقدار آب کاربردی، بهره‌وری آب و رد پای آب در شرایط موجود برای محصولات عمده استان مرکزی تحت مدیریت بهره‌برداران اجرا گردید.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در ۱۴۱ مزرعه و باغ منتخب در دشت‌های مهم تولید محصولات غالب زراعی و باغی استان مرکزی شامل جو، یونجه، لوبیا، هندوانه، انگور، هلو، گیلان، انار، بادام و گردو، در بازه سال‌های زراعی ۱۳۹۸-۱۴۰۱ اجرا گردید. مزارع و باغات منتخب برای اندازه‌گیری با هماهنگی مراکز خدمات و مدیریت‌های جهاد کشاورزی استان طوری انتخاب شدند که اغلب شرایط از جمله بافت خاک و مدیریت‌های مختلف، شوری‌های آب و خاک مختلف، روش‌های آبیاری متنوع و غیره را پوشش دادند (شکل ۱). شاخص‌های مورد نظر از جمله آب کاربردی،



شکل ۱- موقعیت مکانی مزارع و باغات مورد مطالعه در سطح استان مرکزی
Figure 1- Location of studied farms in Markazi province

و همکاران (Hoekstra *et al.*, 2011) به کمک روابط ۵ تا ۱۱ مورد محاسبه قرار گرفت.

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (5)$$

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{green} \quad (6)$$

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_e) \quad (7)$$

که در آن WF_{green} رد پای آب سبز (متر مکعب بر کیلوگرم)، CWU_{green} مقدار مصرف ردپای آب سبز گیاه (متر مکعب در هکتار)، ET_{green} تبخیر و تعرق آب سبز، ET_c تبخیر و تعرق گیاه، P_e بارش مؤثر، T طول مدت رشد گیاه در دوره رشد d (روز) و Y بازده عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) می‌باشد.

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (8)$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^T ET_{blue} \quad (9)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_e) \quad (10)$$

که در آن، WF_{blue} رد پای آب آبی (متر مکعب بر کیلوگرم)، CWU_{blue} مقدار مصرف ردپای آب آبی گیاه (متر مکعب در هکتار)، ET_{blue} تبخیر و تعرق آب آبی، ET_c تبخیر و تعرق گیاه، P_e بارش مؤثر،

$$P_e = P_{tot} \frac{125 - 0.2P_{tot}}{125} \text{ for } P_{tot} < 250 \text{ mm} \quad (1)$$

$$P_e = 125 + 0.1P_{tot} \text{ for } P_{tot} > 250 \text{ mm} \quad (2)$$

که در این رابطه P_e بارش مؤثر (mm) و P_{tot} بارش کل (mm) می‌باشد.

$$E_{ap} = \frac{V_{CW}}{V_{ap}} \quad (3)$$

که در این رابطه E_{ap} راندمان کاربرد، V_{CW} حجم نیاز خالص آبیاری (متر مکعب در هکتار) و V_{ap} حجم آب کاربردی توسط کشاورز (متر مکعب در هکتار) می‌باشد.

$$WP = \frac{CY}{CW} \quad (4)$$

که در آن:

WP = بهره‌وری آب در تولید محصول (کیلوگرم بر متر مکعب آب کاربردی)

CY = عملکرد محصول (کیلوگرم در هکتار در سال)

CW = حجم آب کاربردی در تولید محصول (متر مکعب در هکتار در سال)

همچنین در این تحقیق، ردپای آب آبی، سبز و خاکستری برای محصولات عمده زراعی و باغی استان مرکزی بر اساس اطلاعات اندازه‌گیری شده محاسبه شد. بدین منظور ردپای آب آبی، سبز و خاکستری محصولات مختلف با استفاده از چارچوب ارائه شده توسط هوکسترا و چاپاگین (Hoekstra and Chapagain, 2008) و هوکسترا

T طول مدت رشد گیاه در دوره رشد d (روز) و Y بازده عملکرد محصول (کیلوگرم بر هکتار) می باشد.

$$WF_{gray} = \frac{\alpha_{Irr} \times NAR_{Irr}}{C_{max} - C_{nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (11)$$

که در آن α_{Irr} درصد تلفات کودهای نیتروژن (%), NAR_{Irr} نرخ مصرف کود (کیلوگرم هکتار C_{max}), غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم بر متر مکعب), C_{nat} غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده و Y عملکرد محصول (تن بر هکتار) و WF_{gray} رد پای آب خاکستری می باشد. مقدار α_{Irr} در شرایط فاریاب برابر با ۵ درصد در نظر گرفته می شود. غلظت بحرانی نیتروژن در منابع دریافت کننده نیز بر اساس استاندارد US-EPA برابر با ۱۰ میلی گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. از آنجا که اطلاعات دقیقی از غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت کننده در دست نیست، این مقدار آن صفر در نظر گرفته شد (Chapagain et al., 2006). در روابط فوق به منظور محاسبه تبخیر و تعرق روزانه از رابطه پیشنهادی آلن و همکاران استفاده گردید (Allen et al., 1998):

$$ET_C = K_s \times K_C \times ET_0 \quad (12)$$

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \quad (13)$$

که در این رابطه ET_0 تبخیر و تعرق مرجع (mm), ET_C تبخیر و تعرق واقعی گیاه (mm), K_C ضریب گیاهی، K_s عامل بدون بعد کاهش تعرق ناشی از تنش، TAW کل آب قابل دسترس خاک، RAW آب سهل الوصول و D_r تخلیه رطوبتی خاک در ناحیه ریشه، می باشد. تمامی محاسبات مربوط به تعیین تبخیر و تعرق واقعی روزانه گیاه در محیط نرم افزار CROPWAT 8.0 انجام شد.

در جدول ۱ مشخصات عمومی و برخی از خصوصیات فیزیکی و مدیریتی در مزارع و باغات مورد مطالعه در سطح استان مرکزی ارائه شده است. میزان شوری خاک با میانگین ۲/۱ بین ۰/۴ تا ۸/۱ دسی زیمنس بر متر متغیر بود. بر اساس معیارهای توصیه شده (Richards, 1954) می توان بیان نمود که خاک سطحی مزارع و باغات مطالعاتی در کلاس بدون مشکل شوری تا اندکی شور قرار می گیرند، که عمدتاً اراضی با شوری بالاتر در منطقه ساوه و زرنديه واقع شده اند. شوری آب آبیاری در مزارع مورد مطالعه با میانگین ۱/۰۲ بین ۰/۲۶ تا ۴/۰۵ دسی زیمنس بر متر متغیر بود، که در مورد شوری آب نیز شوری بالاتر عمدتاً مربوط به مزارع واقع در دو منطقه زرنديه و ساوه بود. تعداد کل آبیاری های اعمال شده با متوسط ۱۹ نوبت آبیاری بین ۴ تا ۳۹ آبیاری متغیر بود. در جدول ۲ مقادیر میانگین بارش، بارش مؤثر و تبخیر و تعرق گیاهی اندازه گیری شده برای هر یک از محصولات مورد ارزیابی در استان ارائه شده است.

جدول ۱- آماره های توصیفی برخی از پارامترهای فیزیکی و مدیریتی در مزارع مورد مطالعه

Table 1- Descriptive statistics of some physical and management parameters in the studied farms

محصول Crops	تعداد مزارع منتخب Number of selected fields	طول دوره رشد Growth period (Day)	تعداد آبیاری Number of irrigations (dS/m)			شوری آب آبیاری Irrigation water salinity (dS/m)			میانگین شوری خاک Average soil salinity (dS/m)		
			میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.
جو Barley	26	240	8	13	4	2.1	4	0.8	4.2	8.1	1.8
یونجه Alfalfa	12	365	18	32	9	1.11	2.7	0.52	2.53	4.49	0.85
لوبیا Dry Bean	16	100	22	35	18	0.53	1.03	0.3	1.1	1.93	0.48
هندوانه Watermelon	10	90	23	33	17	0.7	1.37	0.27	1.64	3.72	0.94
گردو Walnut	12	365	18	34	13	0.49	0.92	0.34	1.19	2.16	0.59
بادام Almond	14	365	15	27	8	0.98	3.06	0.26	1.77	4.19	0.66
هلو Peach	9	365	21	38	16	0.5	0.6	0.4	1.3	2.2	0.4
گیلاس Cherry	14	365	22	32	11	0.54	0.92	0.28	1.17	1.92	0.74
انار Pomegranate	16	365	26	39	16	2.62	4.05	0.84	4.58	7.09	1.15
انگور Grape	12	365	12	20	6	0.57	0.98	0.42	1.56	3.27	0.45

جدول ۲- مقادیر میانگین بارش، بارش موثر و تبخیر و تعرق گیاهی اندازه‌گیری شده
Table 2- Average values of precipitation, effective precipitation and crop evapotranspiration

محصول Crops	تبخیر و تعرق گیاهی Evapotranspiration (mm)		سند ملی آب کشور (نرم‌افزار (NETWAT National Water Document (NETWAT)	بارش موثر سال زراعی جاری Current Year Effective Precipitation (mm)	بارش موثر بلند مدت Long Term Effective Precipitation (mm)
	پنمن مانیت (داده‌های هواشناسی بلند مدت) Penman-Monteith (Long Term Meteorological Data)	پنمن مانیت (داده‌های هواشناسی سال زراعی جاری) Penman-Monteith (Current Year Meteorological Data)			
جو Barley	404	424	370	54	99
یونجه Alfalfa	1054	1407	921	352	229
لوبیا Dry Bean	710	810	740	10	30
هندوانه Watermelon	507	692	548	15	38
گردو Walnut	926	1109	849	234	139
بادام Almond	820	865	923	105	88
هلو Peach	732	892	735	127	110
گیلاس Cherry	795	841	769	148	120
انار Pomegranate	1157	1187	1265	138	84
انگور Grape	610	782	600	215	127

نتایج و بحث

در جدول ۳ نتایج اندازه‌گیری آب کاربردی محصولات منتخب مورد مطالعه در سطح استان مرکزی ارائه شده است. دور آبیاری در مزارع مورد مطالعه با میانگین ۸ روز بین ۳ تا ۱۵ روز متغیر بود و متوسط عمق آبیاری نیز با میانگین ۶۷/۸ میلی‌متر بین ۲۶/۲ تا ۹۹ میلی‌متر در محصولات مختلف متغیر بود. بر این اساس، میانگین حجم آب کاربردی برای محصولات مورد مطالعه در سطح استان ۱۰۷۸۲ متر مکعب در هکتار بود. همچنین، بیشترین و کمترین حجم آب کاربردی برای محصولات مختلف مورد ارزیابی به ترتیب برابر با ۵۸۵۹ و ۱۵۹۱۶ متر مکعب در هکتار بود. بر این اساس، بیشترین حجم آب کاربردی برای تولید محصول یونجه و کمترین حجم آب کاربردی برای محصول جو بوده است. متفاوت بودن حجم آب آبیاری علاوه بر نوع محصول تحت تأثیر روش آبیاری مورد استفاده، نحوه مدیریت کشاورز از جمله زمان انجام اولین آبیاری، دور آبیاری، زمان پایان آبیاری در انتهای فصل و حقایق در دسترس کشاورز بستگی بود. به گونه‌ای که نحوه مدیریت صحیح آبیاری توسط کشاورز تأثیر قابل توجهی در حجم آب کاربردی توسط بهره‌برداران دارد.

بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که عمدتاً کشاورزان در منطقه تقریباً در تمام آبیاری‌ها ساعت آبیاری یکسانی را اعمال می‌نمایند و تنها چیزی که بر مقدار آبیاری آن‌ها تأثیر می‌گذارد، دبی دریافتی از منبع آب است. از طرفی در تمامی مزارع به صورت حقایق آب دریافت می‌شود و اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش موثر به طور علمی و اصولی توجهی نمی‌شود. همچنین مشاهدات و ارزیابی‌ها نشان داد که مدیریت آبیاری تأثیر زیادی بر مصرف آب در سطح منطقه دارد. به گونه‌ای که با توجه به زمان شروع آبیاری در ابتدای فصل، مدت زمان آبیاری، روش آبیاری، دور آبیاری و زمان قطع آبیاری در انتهای فصل، مقادیر آب کاربردی مختلفی برای سامانه‌های مختلف به دست آمد. این نتایج با دیگر پژوهش‌های انجام شده برای تعیین آب کاربردی محصولات مختلف توسط پرچمی عراقی و همکاران (Parchami-[Araghi et al., 2021](#)) برای محصول کلزا، سلامتی و عباسی (Salamati and Abbasi, 2021) برای محصول ذرت علوفه‌ای، شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia et al., 2022) برای محصول انار و شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia et al., 2022) برای محصول لیمو همخوانی دارد.

جدول ۳- نتایج اندازه‌گیری آب کاربردی در مزارع و باغات منتخب در سطح استان مرکزی
Table 3- The results of the measurement of applied water in selected farms in Markazi Province

محصول Crops	میانگین حجم آب آبیاری Average volume of irrigation (m ³ /ha)			متوسط عمق آب هر آبیاری Average irrigation depth (mm)			دور آبیاری Irrigation cycle (Day)			میانگین عملکرد محصول Average crop yield (ton/ha)		
	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.	میانگین Av.	حداکثر Max.	حداقل Min.
جو Barley	5859	7232	3783	85	134.7	29.1	15	30	6	3.7	4.7	3.1
یونجه Alfalfa	15916	19797	10382	99	188.6	58.8	8	15	5	16.76	19.67	14.25
لوبیا Dry Bean	11980	17840	8280	54.5	51	46	5	6	3	2.9	4.2	1.6
هندوانه Watermelon	6300	7174	5333	26.2	33.9	17.4	3	4	2	61.4	74.3	39.9
گردو Walnut	13290	29600	4420	78.6	124	13	8	12	4	1.52	2.14	1.16
بادام Almond	7267	13932	3850	60.8	119.3	15.4	12	30	6	1.46	2.48	1.2
هلو Peach	11575	17727	6872	59.5	93.3	18.1	7	8	4	35.2	42.7	19.8
گیلاس Cherry	11028	14645	7050	55.6	106.3	22.4	7	16	4	10	12	7
انار Pomegranate	13827	20790	7156	62	119	19	7	10	4	21	31	15
انگور Grape	10775	18168	5937	96.9	184.9	29.5	12	20	6	27.4	36.6	19.3

رشد و ضرایب متناظر برای منطقه اصلاح گردد. نتایج اندازه‌گیری آب مصرفی برای هر یک از محصولات با توجه به شرایط اقلیمی و مدیریتی در شهرستان‌های مختلف متفاوت بود که این تغییرات در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین حجم آب مصرفی برای هر یک از محصولات مورد ارزیابی ارائه شده است.

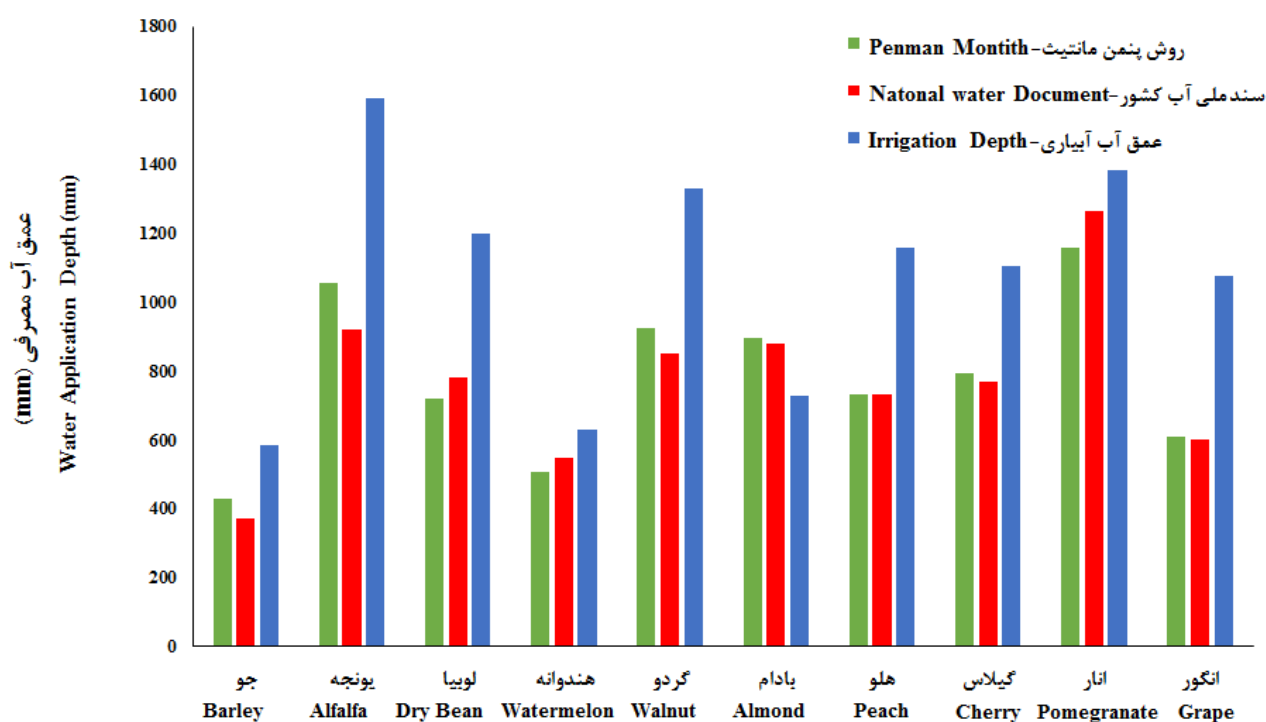
مقدار میانگین شاخص راندمان کاربرد آبیاری در طول فصل برای مزارع و باغات مورد مطالعه بین ۵۶ تا ۱۰۰ درصد متغیر و متوسط آن ۷۲/۵ درصد بود (شکل ۴). متوسط راندمان کاربرد برای محصولات زراعی در کشور توسط عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2017)، ۵۲/۶ درصد گزارش شده است، همچنین در تحقیق مذکور متوسط راندمان کاربرد در استان مرکزی ۶۱ درصد برآورد شده است، در حالی که نتایج تحقیق حاضر راندمان کاربرد بالاتری را برای محصول جو در سطح استان مرکزی نشان می‌دهد. دلیل زیاد بودن شاخص راندمان کاربرد در برخی از مزارع و باغات مورد مطالعه، اعمال کم آبیاری ناخواسته بوده است. برخی از بهره‌برداران آب کافی برای آبیاری مزارع خود در اختیار نداشتند و یا مقداری از آب را به کشت محصولات دیگر اختصاص می‌دادند، لذا میانگین راندمان کاربرد این مزارع بالا بوده و به طور ناخواسته در این مزارع کم آبیاری اعمال شده است. این نتایج با

در شکل ۲ نمودار نیاز آبی به روش‌های مختلف، عمق آب آبیاری اعمال شده و مجموع آب دریافتی شامل آبیاری و بارش مؤثر در مزارع و باغات مورد مطالعه در استان مرکزی برای مقایسه مقادیر نیاز واقعی گیاه با مقداری که توسط زارع استفاده شده، نشان داده شده است. بر اساس نتایج، محصول جو کمترین و محصول انار و یونجه بیشترین نیاز آبی در بین محصولات عمده کشت شده در سطح استان دارا می‌باشند. همانطور که ملاحظه می‌گردد مقادیر آب کاربردی در مزارع و باغات مختلف متفاوت است که علت آن نوع محصول، روش آبیاری مورد استفاده و مدیریت آبیاری توسط کشاورز بوده است. بر اساس نتایج تحقیق حاضر متوسط عمق آب آبیاری در اکثر مزارع از مقدار نیاز آبی خالص بیشتر است. نکته قابل توجه در اندازه‌گیری‌های انجام شده در سطح مزارع این بود که بهره‌برداران عمدتاً بر اساس حقایق دریافتی آبیاری انجام می‌دهند و توجهی به نیاز آبی گیاه، بارش مؤثر و شرایط اقلیمی ندارند و بر این اساس ممکن است در برخی مزارع و یا برخی از سال‌ها کم آبیاری رخ دهد و یا تلفات آبیاری افزایش یابد که این مسئله تأثیر زیادی بر راندمان آبیاری و بهره‌وری آب دارد. همچنین، بایستی به این نکته توجه نمود که در روش‌های پنمن مانیتیت و سند ملی طول دوره رشد و ضرایب گیاهی متناظر آن‌ها با واقعیت منطقه همخوانی ندارد. لذا، برای برآورد دقیق‌تر نیاز آبی با این روش‌ها بایستی طول دوره

بهره‌وری آب بالا، ردپای آب پایین و بعضاً بهره‌وری اقتصادی بالای آن نیز برای استفاده بهینه در تجارت آب مجازی توجه شود. با توجه به اینکه برنامه آبیاری زارعین بر اساس نیاز آبی واقعی گیاه و تنش رطوبتی انجام نمی‌شود گیاه در مقاطعی آب بیشتری دریافت و در مقاطعی آب کمتر از حد مورد نیاز دریافت می‌کند و این مسئله باعث کاهش بهره‌وری آب و متغیر بودن آن در سطح منطقه شده است. این نتایج بیانگر قابلیت اجرای کم‌آبیاری در سطح مزارع و باغات استان است، لذا ترویج و آموزش کم‌آبیاری به روش صحیح و کاربردی به کشاورزان، می‌تواند باعث افزایش قابل‌توجه راندمان کاربرد و بهره‌وری آب در تولید محصولات زراعی و باغی گردد.

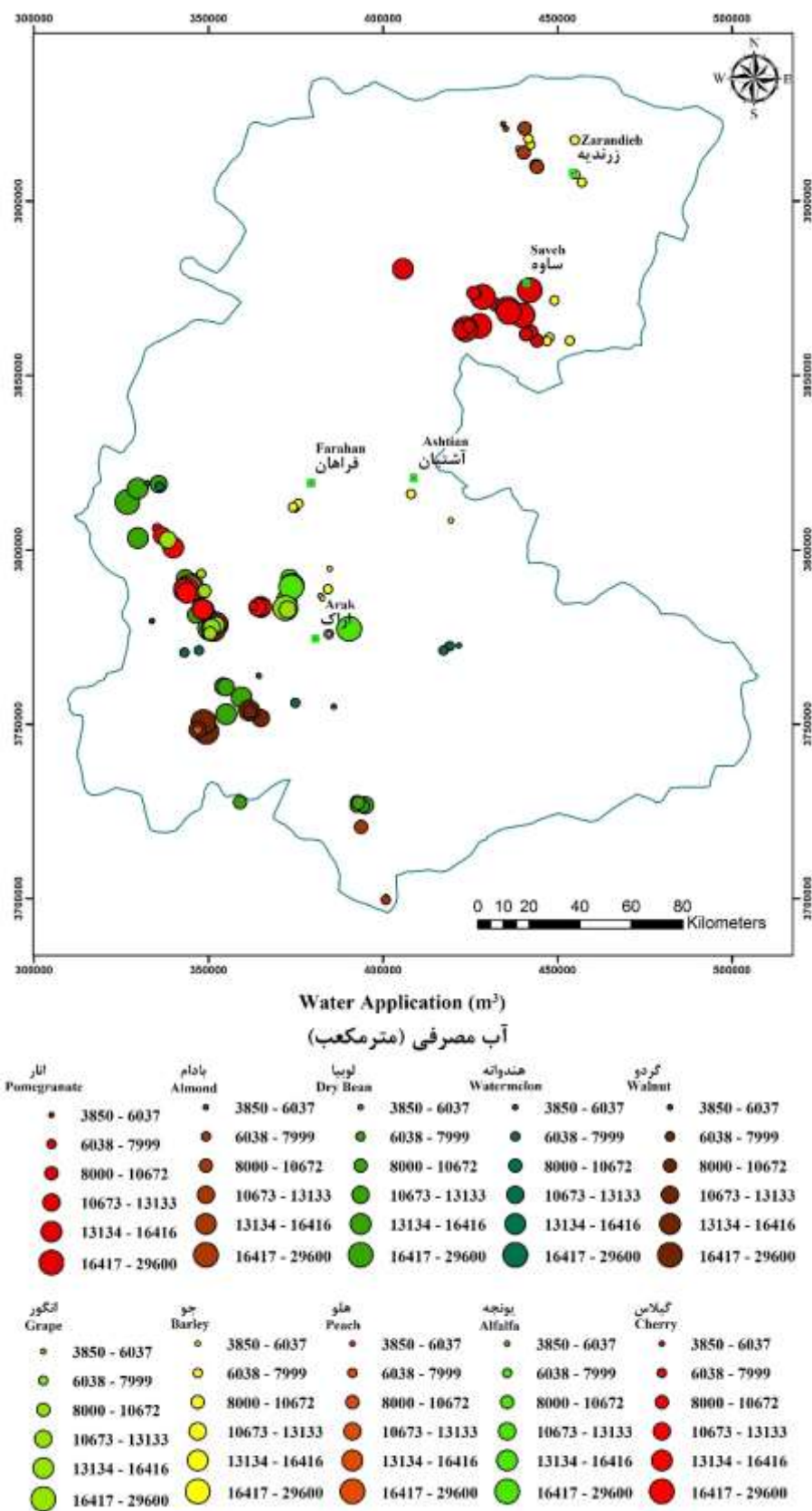
نتایج ارائه شده توسط اکبری (Akbari, 2019)، عباسی و همکاران (Abbasi et al., 2020)، پرچمی عراقی و همکاران (Parchami, 2021)، سلامتی و عباسی (Araghi et al., 2021)، و شاهرخ‌نیا و همکاران (Shahrokhnia et al., 2022)، همخوانی دارد.

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، میانگین شاخص بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری کل (آب آبیاری و باران مؤثر) در مزارع مورد مطالعه به ترتیب ۱/۷۹ و ۲ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بیشترین مقدار بهره‌وری آب آبیاری مربوط به هندوانه و کمترین مقدار مربوط به گردو بود. با توجه به بحث آب‌بر بودن محصول هندوانه و ایجاد محدودیت کشت برای این محصول در کشور، بایستی به بحث



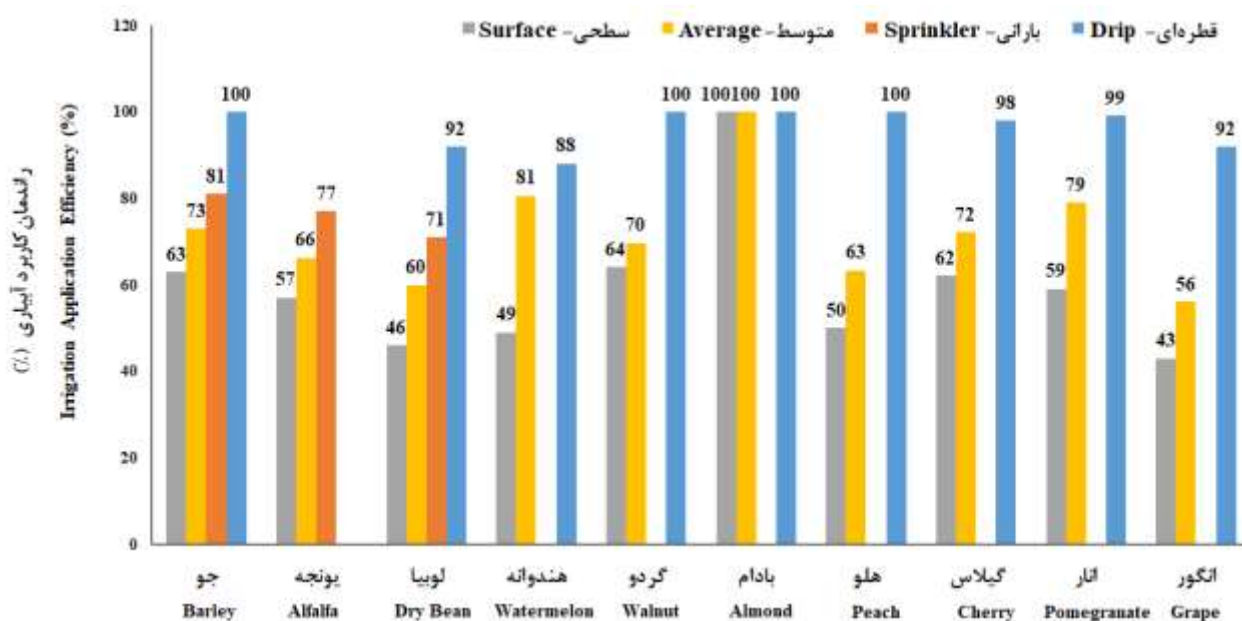
شکل ۲- مقایسه نیاز آبی، عمق خالص و عمق آب آبیاری در مزارع و باغات منتخب

Figure 2- Comparison of water requirement, net depth and depth of irrigation in the selected fields

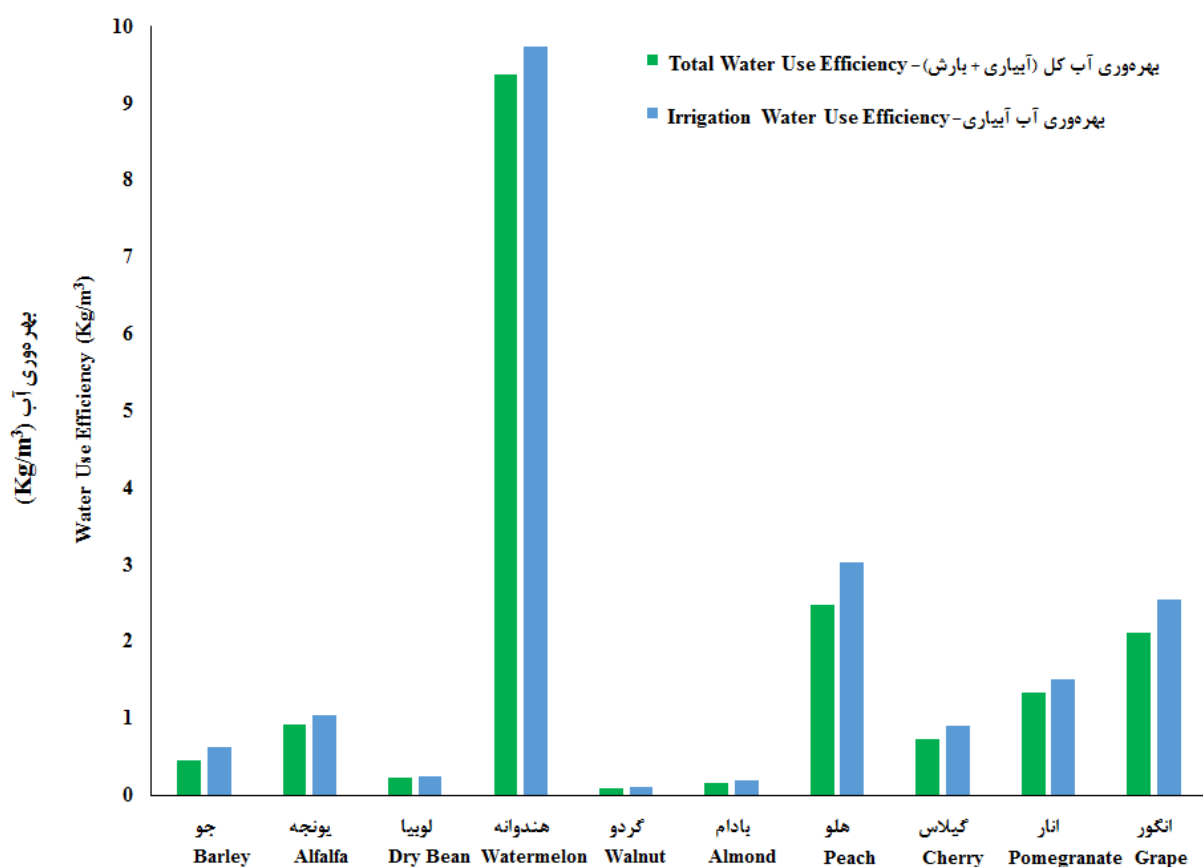


شکل ۳- تغییرات حجم آب آبیاری کاربردی محصولات مختلف در سطح استان

Figure 3- Changes in the volume of applied irrigation water for different crops in the province



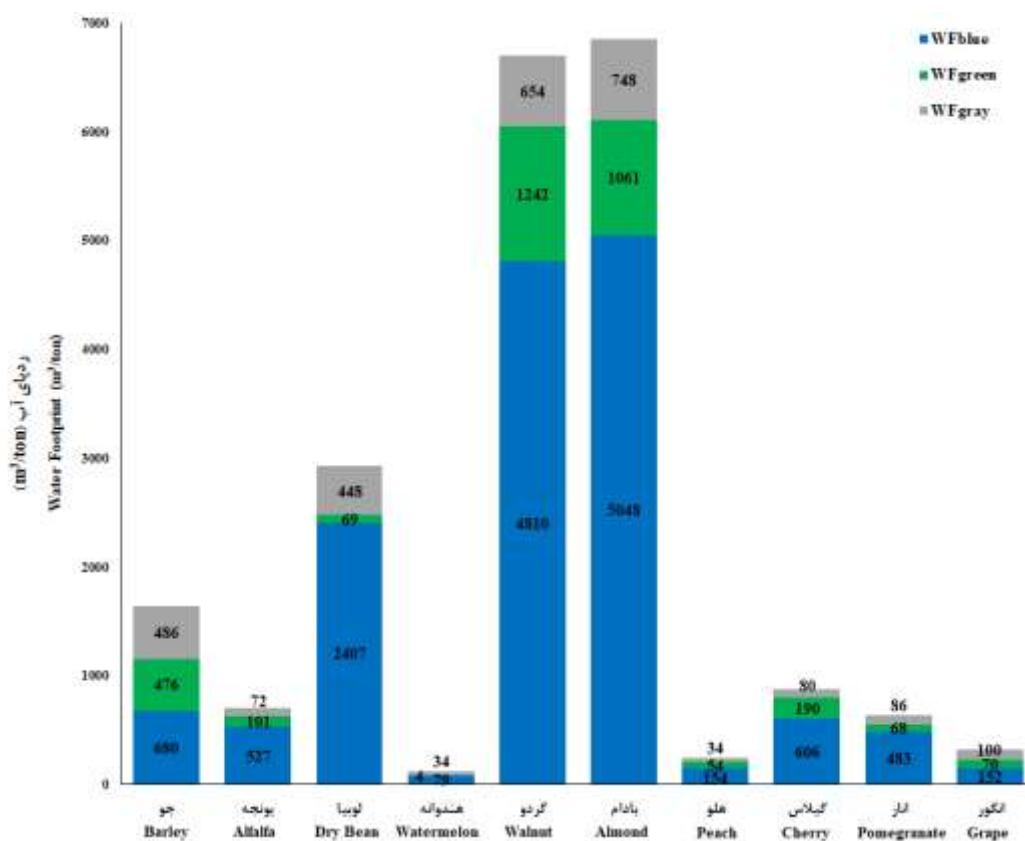
شکل ۴- مقایسه شاخص راندمان آبیاری در مزارع و باغات منتخب
Figure 4- Comparison of irrigation efficiency index in the selected fields



شکل ۵- مقایسه بهره‌وری آب در مزارع و باغات منتخب
Figure 5- Comparison of water productivity in the selected fields

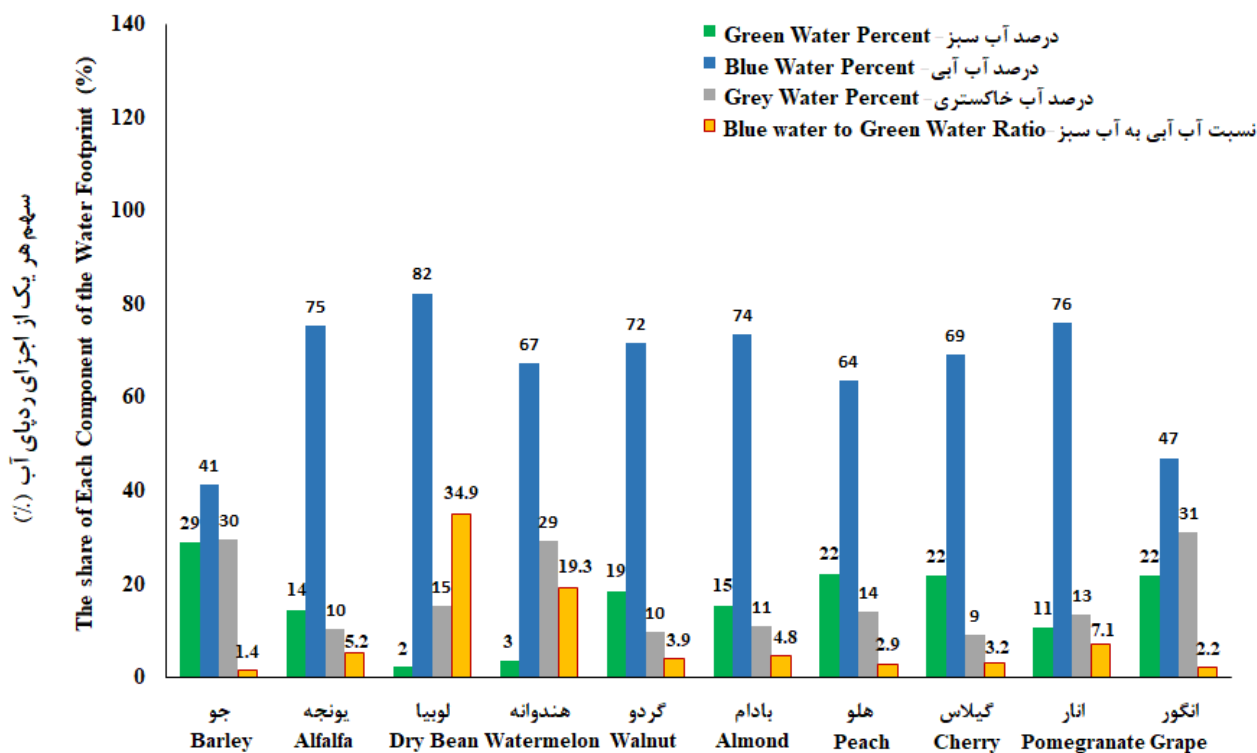
کمترین سهم ردپای آب سبز به میزان ۳/۵ درصد برای محصول هندوانه می‌باشد. بیشترین سهم ردپای آب آبی به میزان ۸۲/۳ درصد برای محصول لوبیا و کمترین سهم ردپای آب آبی به میزان ۴۱/۴ درصد برای محصول جو می‌باشد. بیشترین سهم ردپای آب خاکستری به میزان ۳۱/۱ درصد برای محصول انگور و کمترین سهم ردپای آب خاکستری به میزان ۹/۱ درصد برای محصول گیلاس می‌باشد. سه محصول لوبیا، هندوانه و انار بیشترین نسبت آب آبی به آب سبز را دارا می‌باشند و این بیانگر این است که نسبت استفاده از آبهای سطحی و زیرزمینی این سه محصول در برابر منابع آب مصرفی ناشی از بارش از سایر محصولات مورد بررسی به مراتب بیشتر می‌باشد. همچنین سه محصول جو، انگور و هلو کمترین نسبت آب آبی به آب سبز را دارا می‌باشند.

در شکل ۶ مقایسه ردپای آب سبز، آبی و خاکستری محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده میانگین شاخص ردپای آب کل برابر با ۲۱۰۲ مترمکعب بر تن بود. به طور متوسط محصول بادام با ردپای آب ۶۸۵۷ مترمکعب بر تن بالاترین سهم را در اختصاص ردپای آب در محصولات تولیدی استان داشته است. در صورتی که کمترین ردپای آب مربوط به محصول هندوانه با داشتن ردپای آب ۱۱۷ متر مکعب بر تن می‌باشد. بیشترین ردپای آب آبی مربوط به ۳ محصول بادام، گردو و لوبیا می‌باشد که نشان می‌دهد سهم قابل توجهی از منابع آب آبی و سبز برای تولید این محصولات نیاز می‌باشد. در شکل ۷ درصد سهم هریک از اجزای ردپای آب برای محصولات زراعی و باغی مورد ارزیابی نشان داده شده است. بیشترین سهم ردپای آب سبز به میزان ۲۹ درصد برای محصول جو و



شکل ۶- مقایسه ردپای آب سبز، آبی و خاکستری محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی

Figure 6- Comparison of green, blue and gray water footprints of agricultural crops in the Markazi Province



شکل ۷- درصد سهم هر یک از اجزای ردپای آب محصولات زراعی و باغی در استان مرکزی

Figure 7- The percentage share of each component of the water footprint in agricultural and horticultural crops in the Markazi Province

نتیجه گیری

مقاطعی آب بیشتری دریافت و در مقطعی آب کمتر از حد مورد نیاز دریافت می‌کند و این باعث کاهش بهره‌وری آب می‌گردد. پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش مصرف آب و بهبود بهره‌وری آب، تحویل آب به کشاورزان در طول فصل مدیریت شود و حقایق متناسب با نیاز آبی به آن‌ها تحویل داده شود. نتایج نشان داد در بین محصولات مورد بررسی بیشترین سهم ردپای آب آبیاری مربوط به محصول لوبیا و کمترین مقدار مربوط به محصول جو می‌باشد. ردپای آب را می‌توان از طریق افزایش عملکرد محصول، کاهش تبخیر و تعرق غیرمفید، کاهش مصرف کود و سموم شیمیایی، استفاده بهتر از بارش مؤثر و استفاده از ارقام مقاوم با عملکرد بالا، کاهش داد. در مجموع از نتایج ردپای آب بدست آمده می‌توان به منظور بهبود سیاست‌گذاری‌های کلان منابع آب در سطح استان، مطالعات آمایش سرزمین، اصلاح الگوی کشت و سیاست‌گذاری‌های بخش محیط زیست استفاده نمود.

نتایج نشان داد که حجم آب کاربردی در مزارع و باغات در استان مرکزی متفاوت و بسته به روش آبیاری، تعداد نوبت‌های آبیاری، زمان شروع آبیاری در ابتدای فصل، زمان قطع آبیاری در انتهای فصل، میزان حقایق و منابع آب در دسترس و نحوه مدیریت بهره‌بردار، بین ۵۸۵۹ تا ۱۵۹۱۶ متر مکعب در هکتار متغیر است. به طور میانگین مجموع حجم آب آبیاری و بارش مؤثر در مزارع و باغات تحت آبیاری در استان مرکزی از نیاز آبی واقعی گیاه بیشتر است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدیریت آبیاری تأثیر زیادی بر مقدار کاربرد آب در استان مرکزی دارد. با توجه به اینکه اکثر مزارع و باغات به صورت حقایق‌ای آب دریافت می‌کنند اصولاً به نیاز آبی و حتی بارش مؤثر توجه ویژه‌ای نمی‌شود و میزان دسترسی به آب بیشترین تأثیر را در مصرف آب دارد. لذا گیاه در

منابع

- Abbasi, F., Nasseri, A., Goodarzi, M., Karimi, M., Eslami, A., Taheri, M., Uossef Gomrokchi, A., Taifeh Rezaee, H., Khosravi, H., Mousavifazl, S.H., Firouzaabadi, A.G., Baghani, J., Abbasi, N., & Akbari, M. (2020). Evaluation of Vineyards applied water and water productivity in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 21(80), 133-148. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ider.2020.351803.1438>
- Abbasi, F., Sohrab, F., & Abbasi, N. (2017). Evaluation of irrigation efficiencies in Iran. *Irrigation and Drainage*

- Structures Engineering Research*, 17(67), 113-128. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.109617>
3. Akbari, M. (2019). Determination of alfalfa applied water in Iran. Agricultural Research, Education and Extension Organization, Agricultural Engineering Research Institute, Final Report of Research Project No. 58905. (In Persian)
4. Aligholinia, T., Rezaie, H., behmanesh, J., & Montaseri, M. (2016). Determination and evaluation of blue and green water footprint of dominant tillage crops in Urmia Lake watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(3), 337-344. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3203>
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration*. Guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrig. Drain. Paper No. 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
6. Anonymous. (1999). Report of the Ministry of Energy to the government delegation. Water sector, water and sewage, electricity, energy and water and electricity subsidies. (In Persian)
7. Ashktorab, N., & Zibaei, M. (2021). Water footprint accounting of the main crops in Fars province. *Agricultural Economics Research*, 13(1), 207-234. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086407.1400.13.1.10.9>
8. Azimi Dezfuli, A.A. (2020). An introduction to agricultural water accounting by estimating crop water consumption. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(3), 31-40. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v6i3.84407>
9. Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., & Savenije, H.H.G. (2006). Water saving through international trade of agricultural products. *Hydrology and Earth System Science*, 10, 455-468. www.hydrol-earth-syst-sci.net/10/455/2006/
10. Goodarzi, M., Abbasi, F., & Hydayatipour, A. (2021). Evaluation of irrigation water management indices in grape production (Case study in Markazi province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(6), 2003-2012. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.2021.14.6.11.2>
11. Hoekstra, A.Y., & Chapagain, A.K. (2008). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 220p.
12. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., & Mekonnen, M.M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard*. Earthscan, London, UK, 203p.
13. Karen, F., & Virginie G. (2012). Irrigation water requirement and water withdrawal by country. FAO AQUASTAT Reports.
14. Mohaddanesh, A. (1995). *Hydrology of Iran's surface waters*, organization for the study and editing of university humanities books. 379 pages. (In Persian)
15. Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R., & Makin, I. (2001). A water-productivity framework for understanding and action, Workshop on Water productivity, Wadduwa, Sri Lanka. November 12 and 13, 2001, pp. 1-18.
16. Naseri, A., Abbasi, F., & Akbari, M. (2017). Estimating Agricultural Water Consumption by Analyzing Water Balance. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 18(68), 17-32. (In Persian) <https://doi.org/10.22092/aridse.2017.105338.1057>
17. Parchami-Araghi, F., Moayeri, M., & Zeinalzadeh-Tabrizi, H. (2021). Assessment of Rapeseed Water Use and Water Productivity across Moghan Plain, Ardabil Province, Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(5), 1172-1186. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.1400.15.5.15.3>
18. Richards, L.A., (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (No. 60). Soil and Water Conservative Research Branch, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
19. Salamati, N., & Abbasi, F. (2021). Assessment of water productivity of sprinkler and surface irrigation systems in Silage maize fields (case study in Behbahan). *Water and Soil Science*, 31(4), 99-110. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/ws.2021.12259>
20. Samani, M.V. (2006). *Water resources management and sustainable development*. Office of Infrastructure Studies of the Islamic Council. Report number 7374, 35 pages. (In Persian)
21. Shahrokhnia, M.A., Abbasi, F., Naseri, A., Dehghanian, S.E., Eslami, A., Salamati, N., Moghbeli Damaneh, E., Zare Mehrani, E. (2022). Determination of applied water and water productivity of lemon orchards in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 23(87), 1-20. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/idser.2022.358902.1512>
22. Shahrokhnia, M.A., Abbasi, F., Naseri, A., Haghayeghi, A., Goodarzi, M., Farzamnia, M., Parvizi, H., Mousavi Fazl, S.H., & Ghasemi, M.M. (2022). Measuring the volume of irrigation water and water productivity of pomegranate orchards in Iran. *Water Management in Agriculture*, 9(1), 57-72. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.24764531.1401.9.1.5.6>
23. USDA. (1967). *Irrigation water requirements*. Tech. Release No. 21, United States Dept. of Agr., Soil Manage. 59: 67-75.
24. Yousefi, H., Mohammadi, A., Noorollahi, Y., & Sadatinejad, S.J. (2018). Water footprint evaluation of Tehran's crops and garden crops. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(6), 67-85. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2017.13718.2842>



Estimation of Water Requirement of Different Phenological Stages of Green Cumin Plant in Different Regions of Isfahan Province

A.H. Jalali^{1*}, H. Salemi²

Received: 09-04-2023

Revised: 15-08-2023

Accepted: 16-08-2023

Available Online: 19-08-2023

How to cite this article:

Jalali, A.H., & Salemi, H. (2023). Estimation of water requirement of different phenological stages of green cumin plant in different regions of Isfahan province. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 519-530. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81881.1269>

Introduction

Cumin (*Cuminum cyminum* L.) is an annual and herbaceous plant, with a vertical, round, narrow and branched stem, with a height of approximately 30-60 cm. This plant belongs to the Apiaceae family. This family is known for having plants with aromatic taste. Iran and some countries along the Mediterranean Sea are known as the primary origin for the cumin plant. In addition to Iran, cumin is cultivated in many countries such as Uzbekistan, Tajikistan, Turkey, Morocco, India, Syria, Mexico and Chile. About 300,000 tons of cumin seeds are produced in the world annually, of which China and Asian countries produce 70% and consume 90%. Short growing season (100 to 120 days), low water requirement and the possibility of rainfed cultivation, non-interference between cultivation and harvesting with other crops and no price fluctuation and proper economic justification are among the factors that interest farmers in cultivating this plant. In different regions, yields of 350 to more than 1000 kg of seeds are obtained from this plant, and 3350 cubic meters of pure water are needed for production.

Materials and Methods

This research was conducted in 2015 to 2017. The first year of the study included the collection and analysis of long-term climatic data of the region, and the second year included the implementation phase of the research. Analyzing meteorological data on the scale of decades and the cases of temperature, precipitation, wind speed, sunshine hours, relative humidity and evaporation from the pan were considered as criteria and by preparing the gradient equations, the rate of reference evaporation and transpiration was calculated. The required statistical information was obtained from 28 synoptic meteorological and climatology stations in Isfahan and some neighboring provinces. In the studies related to soil, apparent specific gravity and volumetric moisture content (field capacity and wilting point), soil salinity, soil texture and agricultural ability class of land in cultivation areas were considered. Soil-related information was used to calculate the soil evaporation coefficient (Ke), which describes the evaporation component in the trait (ETc). In fact, Ke is the basis for calculating the coefficient of reduction of evaporation from the surface layer (Kr) and the fraction of soil wet and exposed to air (few), and for its calculation, the presence of information related to soil characteristics is necessary. To calculate the soil characteristics, in addition to sampling from the fields in the research, the database of 1600 soil profiles in the soil and water research department of Isfahan province was also used.

Results and Discussion

1- Assistant Professor, Horticulture Crops Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

(*- Corresponding Author Email: Jalali51@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Isfahan, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.81881.1269](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81881.1269)

The results showed that 18 cities in Isfahan province had cumin cultivation potential, which had a significant difference in terms of pure water requirement per hectare (5% level) and water consumption at different phenological stages (1% statistical level). In terms of water requirement per hectare, the cities of Isfahan province can be divided into three groups. Average water requirement per hectare in the first group (the cities of Golpayegan, Lenjan, Tiran and Karvan, Shahin and Shahr and Mime), the second group (the cities of Isfahan, Khomeini Shahr, Falavarjan, Shahreza, Kashan, Najaf Abad, Natanz), Mobarake, Dehaghan and Borkhar), and the third group (Aran and Bidgol, Ardestan, Koor and Biabanak and Nain) were equal to 3000, 3240 and 3770 m³ ha⁻¹, respectively. The water requirement of the growth development stage in the cities of the third group was equal to 2029 m³ ha⁻¹, which was significantly different from the cities of the first and second groups ($p < 1\%$ level). According to the results, cumin might be a suitable plant for crop rotations in Isfahan province due to its low water requirement and tolerance to moisture stress.

Conclusion

The water requirement for cultivating cumin in various regions of the province is notably lower compared to many common crops, such as wheat, barley, and safflower. In 10 out of the 18 cities included in the study, significant water savings of up to 3,240 cubic meters per hectare can be achieved by optimizing water transfer efficiency. For cumin cultivation, this water conservation can even reach 3,000 cubic meters in cities with cooler climates. Surprisingly, in the hot areas of Isfahan province, including Ardestan, Nain, Koor, Biabanak, Aran, and Bidgol, it is feasible to grow cumin with a water consumption of just 3,770 cubic meters per hectare.

Keywords: Climate, Development stage of growth, Evapotranspiration, Green cumin

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۳۰-۵۱۹

برآورد نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژیک گیاه زیره سبز در مناطق مختلف استان اصفهان

امیر هوشنگ جلالی^{۱*} - حمیدرضا سالمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

چکیده

پژوهش حاضر به منظور برآورد نیاز آبی زیره سبز در مراحل مختلف رشد در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان طی دو سال انجام شد. در سال اول جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های اقلیمی درازمدت انجام و در سال دوم با انتخاب مزارع موردنظر در هر شهرستان و با استفاده از طرح کاملاً تصادفی نیاز آبی زیره محاسبه گردید. نتایج نشان داد ۱۸ شهرستان در استان اصفهان دارای پتانسیل کشت زیره هستند که از نظر نیاز آبی در هر هکتار (در سطح ۵ درصد) و آب مصرفی در مراحل مختلف فنولوژیک (در سطح آماری ۱ درصد) دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشند. از نظر نیاز آبی در هر هکتار شهرستان‌های استان اصفهان را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود. نیاز آبی متوسط در هر هکتار به ترتیب در گروه اول (شهرستان‌های گلپایگان، لنجان، تیران و کرون و شاهین و شهر و میمه)، گروه دوم (شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر، فلاورجان، شهرضا، کاشان، نجف‌آباد، نطنز، مبارکه، دهاقان و برخوار) و گروه سوم (آران و بیدگل، اردستان، خور و بیابانک و نائین) برابر ۳۰۰۰، ۳۲۴۰ و ۳۷۷۰ متر مکعب در هکتار است. نیاز آبی مرحله توسعه رشد در شهرستان‌های گروه سوم برابر ۲۰۲۹ متر مکعب در هکتار بود که نسبت به شهرستان‌های گروه اول و دوم تفاوت معنی‌دار داشت (در سطح ۱ درصد). بیشترین نیاز آبی محصول زیره مربوط به مرحله توسعه رشد (۱۰ درصد پوشش تا پوشش کامل زمین) بود. در این مرحله حداقل نیاز آبی محصول زیره در شهرستان‌های گلپایگان (۱۵۷۷/۸ متر مکعب در هکتار)، لنجان (۱۶۰۲/۹ متر مکعب در هکتار) تیران و کرون (۱۵۹۰/۸ متر مکعب در هکتار) و شاهین و شهر و میمه (۱۶۳۴/۹ متر مکعب در هکتار) مشاهده شد. با توجه به نتایج زیره به جهت نیاز آبی کم و تحمل به تنش رطوبتی می‌تواند گیاهی مناسب جهت تناوب‌های زراعی استان اصفهان باشد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، تبخیر و تعرق، زیره سبز، مرحله توسعه رشد

مقدمه

زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) گیاهی یک‌ساله و علفی، دارای ساقه‌ای عمودی، گرد، باریک و منشعب، با ارتفاع تقریباً ۶۰-۳۰

سانتی‌متر و متعلق به خانواده چتریان (Apiaceae) است. خانواده چتریان به داشتن گیاهانی با طعم معطر معروف هستند (Singh et al., 2017). این گیاه دگرگشن در چین، کشورهای عربی، ایتالیایی و انگلیسی به ترتیب با نام‌های کیمیون، الکامون، کمون و کومین شناخته می‌شود. ایران و برخی از کشورهای حاشیه دریای مدیترانه به‌عنوان منشأ اولیه برای گیاه زیره شناخته شده‌اند. به هر صورت در حال حاضر علاوه بر ایران کشت زیره در بسیاری از کشورها مثل ازبکستان، تاجیکستان، ترکیه، مراکش، هند، سوریه، مکزیک و شیلی انجام می‌شود. سالیانه حدود ۳۰۰ هزار تن دانه زیره در جهان تولید می‌شود که چین و کشورهای آسیایی ۷۰ درصد از آن را تولید و ۹۰ درصد آن را مصرف می‌کنند (Rajput et al., 2021). خواص آنتی اکسیدانی، ضد میکروبی، ضد التهاب، ضد دیابت، ضد آسم، ضد سرفه

۱- استادیار پژوهش در بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Jalali51@yahoo.com)

۲- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2023.81881.1269

نیاز آبی آن در مراحل مختلف رشد وجود دارد. در پژوهش حاضر سعی شده بر اساس تقسیم‌بندی اقلیمی (ACZ Aggro-Climatically) (Zoning) و مراحل فنولوژیک استاندارد ارائه‌شده توسط سازمان غذا و کشاورزی ملل متحد (FAO) نیاز آبی گیاه زیره برای مناطق مختلف استان اصفهان ارائه شود.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه و داده‌های هواشناسی

این پژوهش در سال ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۷ انجام شد. سال اول پژوهش شامل جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌های اقلیمی درازمدت منطقه و سال دوم مرحله اجرایی پژوهش را شامل گردید. تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی در مقیاس دهه‌ای انجام و موارد دما، بارش، سرعت باد، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و تبخیر از تشتک از سال ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۳ به‌عنوان معیار منظور گردید و با تهیه معادلات گرادیان، میزان تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شد. اطلاعات آماری مورد نیاز از ۲۸ ایستگاه هواشناسی سینئوپتیک و کلیماتولوژی موجود در استان اصفهان و برخی از استان‌های هم‌جوار کسب شد. با توجه به اینکه تاریخ کشت زیره در استان اصفهان اواخر آذرماه است و در طول زمستان تا بهار به تدریج استقرار می‌یابد، عملاً در اکثر نقاط استان (بجز نواحی غربی و کشت انتظاری حبوبات) محصول رقیبی در تناوب های زراعی ندارد.

در مطالعات مرتبط با خاک وزن مخصوص ظاهری و رطوبت‌های حجمی (ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی)، شوری خاک، بافت خاک و کلاس قابلیت کشاورزی اراضی در مناطق کشت مدنظر قرار داده شدند. از اطلاعات مرتبط با خاک در محاسبه ضریب تبخیر از خاک (Ke) استفاده شد که توصیف‌کننده جزء تبخیر در صفت (ETc) است.

و ویژگی‌های تنظیم سامانه ایمنی بدن به ترکیبات مختلف موجود در زیره سبز نسبت داده‌شده است (Johri, 2011).

زیره سبز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گیاهان دارویی اهلی‌شده در ایران مطرح بوده و غالباً در استان‌های خراسان، آذربایجان شرقی، مرکزی و ترکمن‌صحرا کشت می‌شود. در برخی از سال‌ها سطح زیر کشت زیره در خراسان به بیش از ۴۰ هزار هکتار بالغ می‌شود. فصل رشد کوتاه (۱۰۰ تا ۱۲۰ روز)، نیاز آبی کم، امکان کشت دیم، عدم تداخل کشت و برداشت با سایر محصولات زراعی و نداشتن نوسان قیمت از عوامل علاقه‌مندی کشاورزان به کشت این گیاه محسوب می‌شود. در مناطق مختلف عملکردهای ۳۵۰ تا بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم دانه از این گیاه به دست می‌آید و برای تولید به ۳۳۵۰ مترمکعب آب خالص نیاز دارد (Dehaghi and Mollafilabi, 2009). مطالعات قبلی نشان می‌دهد با پذیرش کاهش ۴۰ درصدی عملکرد دانه، می‌توان توده‌های زیره اصفهان، خور و نیشابور را با ۷۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر آب کشت نمود (Alinian and Razmjoo, 2014). در منطقه خرم‌آباد استان لرستان نیاز تبخیر و تعرق گیاه زیره برای تولید ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار ۴/۴۱۴ میلی‌متر در هکتار محاسبه شده است (Saedinia et al., 2018).

ایران سومین تولیدکننده زیره در جهان است و تا شعاع ۴ هزار کیلومتری قابلیت پوشش و صادرات زیره در ۴۰ الی ۵۰ کشور را دارد (Trend Economy, 2021). امکان صادرات، تطابق اقلیمی و تحمل تنش‌های محیطی مختلف و به‌ویژه کم‌آبی، گیاه زیره را به محصولی منحصربه‌فرد برای استفاده در اصلاح الگوی کشت تبدیل کرده است. برای انجام این مهم برآورد صحیح از نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژی این گیاه امری ضروری است. استان اصفهان یکی از مناطق مستعد برای کشت زیره محسوب می‌شود و کشاورزان علاقه‌مندی زیادی را جهت توسعه کشت این گیاه نشان می‌دهند. علیرغم اهمیت اقتصادی این گیاه متأسفانه اطلاعات اندکی در مورد

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک در سه شهرستان واقع در محدوده مطالعاتی

Table 1- Some soil characteristics in three cities located in the study area

نام شهرستان City name	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	رطوبت در نقطه پژمردگی دائم pm (PWP) (%)	رطوبت در حد ظرفیت مزرعه pm (FC) (%)	آب در دسترس AW (%)
فالاورجان Falavarjan	47.6	32.4	20.0	11.45	24.70	10.48
نطنز Natanz	18.0	42.0	40.0	11.54	19.75	8.21
گلپایگان Golpayegan	27.6	40.4	32.0	12.66	20.32	7.67

متر.

تعیین مراحل فنولوژی رشد گیاه زیره

مراحل رشد گیاه در نظر گرفته شده در این پژوهش عبارت بودند از مرحله ابتدایی که از تاریخ کشت شروع و تا نزدیک به زمان برقراری پوشش گیاهی ۱۰ درصد ادامه می‌یابد، مرحله توسعه از زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصد شروع و تا پوشش مؤثر کامل به طول می‌انجامد، مرحله میانی از زمان برقراری پوشش کامل مؤثر شروع و تا رسیدن محصول ادامه خواهد یافت و مرحله پایانی از زمان رسیدن محصول تا پلاسیدگی کامل گیاه طول می‌کشد (شکل ۱). این مراحل بر اساس نشریه ۵۶ آبیاری و زهکشی فائو در نظر گرفته شدند (Allen et al., 1998).

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه داده‌ها از طرح کاملاً تصادفی استفاده و میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن (در سطح ۵ درصد) مقایسه شدند. برای اندازه‌گیری‌های لازم جهت تعیین آب مصرفی کل و آب مورد نیاز در هر مرحله رشد در هر شهرستان ۳ مزرعه به‌عنوان شاخص انتخاب شد. با توجه به این که مرحله پایانی رشد نیاز آبی بسیار اندکی دارد و کشاورزان در این مرحله آبیاری انجام نمی‌دهند، نیاز آبی برای سه مرحله ابتدایی، توسعه و میانی اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌های مربوط به ۱۸ شهرستانی که در اقلیم A-C-W پتانسیل کشت زیره سبز را دارند بیانگر تفاوت معنی‌دار مقادیر نیاز آبی در هر هکتار (در سطح ۵ درصد) و آب مصرفی در مراحل مختلف فنولوژیک (در سطح آماری ۱ درصد) بود (جدول ۳). بر این اساس مقایسه میانگین‌ها برای صفات نیاز آبی و آب مصرفی در مراحل مختلف فنولوژیک در هر اقلیم انجام شد.

نیاز آبی زیره در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان

همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بین شهرستان‌های مختلف استان اصفهان از نظر نیاز آبی زیره تفاوت معنی‌دار وجود دارد (دانکن ۱ درصد). شهرستان‌های گلپایگان، لنجان، تیران و کرون و شاهین و شهر و میمه به ترتیب با نیاز آبی ۲۹۳۵، ۳۰۱۵، ۳۰۱۱ و ۳۰۶۹ متر مکعب کم‌ترین و شهرستان‌های آران و بیدگل و خور و بیابانک به ترتیب با نیاز آبی ۴۰۰۱ و ۳۷۶۷ متر مکعب بیش‌ترین نیاز آبی را به خود اختصاص دادند. بعد از آران و بیدگل و خور و بیابانک، شهرستان‌های نائین و اردستان با نیاز آبی ۳۶۴۲ و ۳۶۷۴ متر مکعب

در حقیقت Ke مبنای محاسبه ضریب کاهش تبخیر از لایه سطحی (Kr) و کسر خاک خیس شده و در معرض هوا قرار گرفته (few) بوده و برای محاسبه آن وجود اطلاعات مرتبط با ویژگی‌های خاک ضروری است. برای محاسبه ویژگی‌های خاک علاوه بر نمونه‌گیری از مزارع موجود در پژوهش، از بانک اطلاعاتی ۱۶۰۰ پروفیل خاک موجود در بخش تحقیقات خاک و آب استان اصفهان نیز استفاده شد. نمونه‌ای از ویژگی‌های خاک در برخی از شهرستان‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

اندازه‌گیری تبخیر و تعرق و نیاز آبی

با استفاده از پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی ایران با استفاده از روش یونسکو بر مبنای سه معیار اصلی طبقه‌بندی یعنی رژیم رطوبتی، تبپ زمستان و تابستان، ۲۸ پهنه اقلیمی در ایران قابل تشخیص می‌باشد که از این تعداد شش ناحیه بیش از ۹۰ درصد کشور را شامل می‌شود (Ghaffari et al., 2015). بر این اساس در استان اصفهان ۱۸ شهرستان واقع در ناحیه اقلیمی A-C-W پتانسیل کشت زیره را دارند (جدول ۲). تبخیر تعرق گیاه تحت تأثیر شرایط آب و هوایی و مراحل رشد گیاه بوده و نشان‌دهنده میزان آب مورد نیاز یک گیاه سالم در یک مزرعه‌ی بدون محدودیت آب است که از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_{crop} = \sum K_{ci} \times E_{toi} \quad (1)$$

در فرمول فوق K_{ci} ضریب گیاهی و E_{toi} میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع است. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن - مانتیث - فائو محاسبه شد (Allen et al., 2005). در حقیقت در این پژوهش آب مورد نیاز گیاه با مبنای تئوریک و بر اساس روش فائو محاسبه شده و برای این محاسبه نیاز به اندازه‌گیری تبخیر و تعرق محصول و ضرایب گیاهی بوده است. با توجه به اینکه در نشریه فائو ۵۶ ضرایب گیاهی برای اقلیم نیمه مرطوب با باد ملایم ارائه شده است در این مطالعه با استفاده از دو پارامتر حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد (در ارتفاع ۲ متری) ضرایب گیاهی پایه بزرگ تر و مساوی ۰/۴۵ بر اساس فرمول زیر اصلاح شد:

$$K_{cb} = K_{cb} (FAO) + \{0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)\} (h/3)^{0.3} \quad (2)$$

در این فرمول:

$K_{cb} (FAO)$: ضرایب گیاهی پایه (مرحله میانی و پایانی) استخراج شده از نشریه فائو ۵۶
 u_2 : میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع ۲ متری بالای چمن (بر حسب متر بر ثانیه)
 RH_{min} : میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی (مرحله میانی و پایانی) (بر حسب درصد).
 h : میانگین ارتفاع گیاه در مرحله میانی و پایانی بر حسب سانتی

به هر حال پژوهش‌های دیگر نیاز آبی زیره (بدون افت عملکرد) را ۳۳۵ میلی‌متر عنوان نموده‌اند (Dehaghi and Mollafilabi, 2009). به هر صورت با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر و کمبود منابع آب، مقدار ۳۰۰ تا ۴۰۰ متر مکعب نیاز آبی می‌تواند شرایط مناسبی برای ورود محصول زیره در تناوب‌های زراعی مناطق معتدل استان اصفهان باشد. در اکثر این مناطق می‌توان این محصول را در اواخر آذر به صورت انتظاری کشت نمود.

جزو شهرستان‌های با نیاز آبی بالا گروه‌بندی شدند. مابقی شهرستان‌های مورد مطالعه به طور متوسط نیاز آبی معادل ۳۲۰ متر مکعب داشتند (شکل ۱). مطالعات قبلی نشان می‌دهد با پذیرش کاهش ۴۰ درصدی عملکرد دانه، می‌توان توده‌های زیره اصفهان، خور و نیشابور را با ۷۰ تا ۲۰۰ میلی‌متر آب کشت نمود (Alinian and Razmjoo, 2014). در منطقه خرم‌آباد استان لرستان نیاز تبخیر و تعرق گیاه زیره برای تولید ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار ۴۱۴/۴ میلی‌متر در هکتار محاسبه شد (Saeedinia et al., 2018).

جدول ۲- ویژگی‌های اقلیمی در شهرستان‌های واقع در اقلیم A-C-W مناسب کشت زیره در استان اصفهان

Table 2- Climatic characteristics in cities located in A-C-W climate suitable for cumin cultivation in Isfahan province

اقلیم Climate	شهرها Cities	ویژگی‌های اقلیم Climatic characteristics
خشک - زمستان سرد و تابستان گرم Dry - cold winter and hot summer A-C-W	اردستان، اصفهان، خمینی‌شهر، فلاورجان، شهرضا، کاشان، گلپایگان، لنجان، نائین، نجف‌آباد، نطنز، شاهین‌شهر و میمه، مبارکه، آران و بیدگل، تیران و کرون، دهاقان، برخوار و خور و بیابانک Ardestan, Isfahan, Khomeini Shahr, Falavarjan, Shahreza, Kashan, Golpayegan, Lenjan, Naein, Najaf Abad, Natanz, Shahin Shahr and Meyme, Mobarake, Aran and Bidgol, Tiran and Karvan, Dehaghan, Borkhar, and Khoor and Biabanak	از نظر رطوبتی خشک، زمستان سرد، تابستان گرم، دمای زمستان ۱۰- و دمای تابستان ۲۰-۱۰ درجه سانتی‌گراد Dry humidity, cool winter, warm summer, winter temperature is 0-10 °C, summer temperature is 20-30 °C



مرحله ابتدایی (Initial stage)



مرحله توسعه (Development stage)



مرحله میانی (Mid stage)



مرحله پایانی (End stage)

شکل ۱- مراحل فنولوژیک رشد گیاه زیره

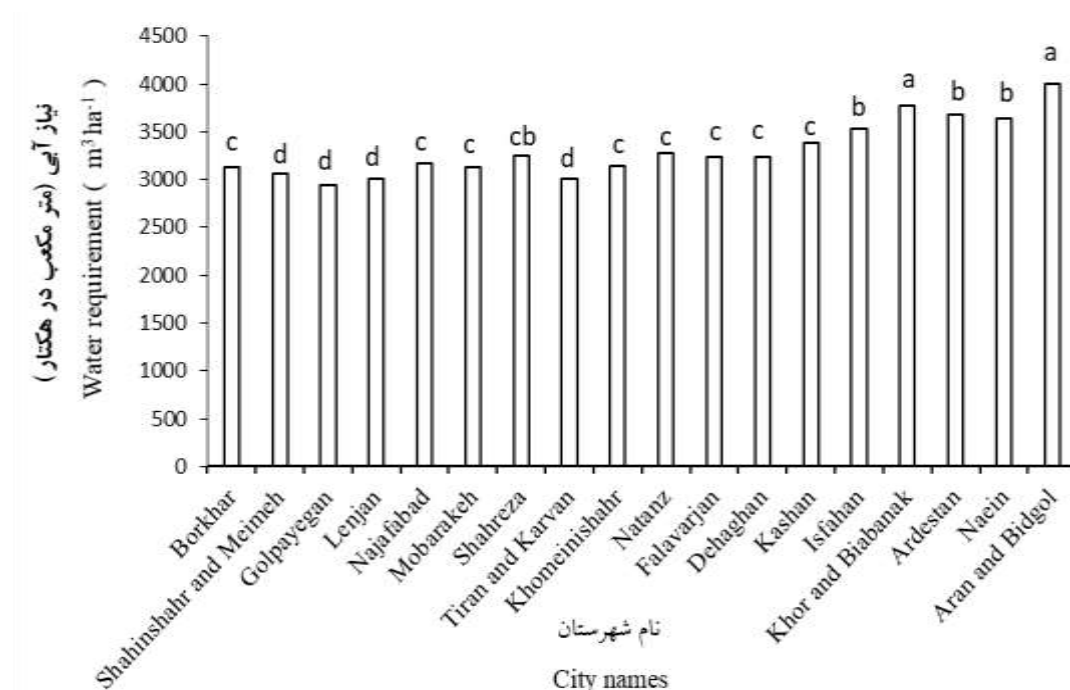
Figure 1- Phenological stages of cumin plant growth

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات نیاز آبی و آب مورد نیاز در مراحل مختلف فنولوژیک

Table 3- Analysis of variance of water consumption and water requirement in different phenological stages

منابع تغییرات Sources of Variation	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square	
		نیاز آبی Water consumption	آب مورد نیاز در مراحل فنولوژیک Water required at the phenological stages
شهرستان در ناحیه اقلیمی City in the climatic zone	17	878.02*	321.19**
خطا Error	36	589.24	42.11
ضریب تغییرات (C.V.)		12.89	14.48

** و *: تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک و پنج درصد
**& *: Significant at 1 and 5 % probability level



شکل ۲- مقایسه نیاز آبی گیاه زیره در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان

حروف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی دار ندارند (دانکن ۵ درصد).

Figure 2- Comparison of the water consumption of cumin plant in different cities of Isfahan province

Similar letters are not statistically different (Duncan 5%)

نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژیک زیره در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان

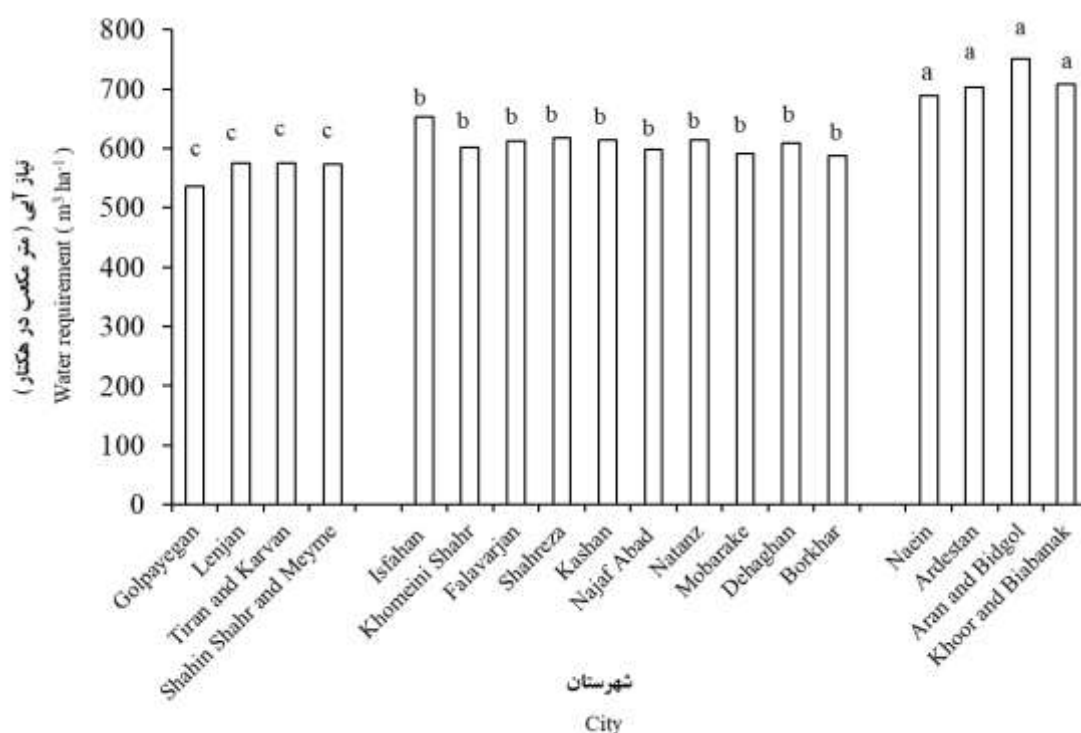
مرحله ابتدایی رشد گیاه، نخستین مرحله از چرخه فنولوژیک رشد محسوب می‌شود. در میان ۱۸ شهرستان مورد مطالعه از ۵۳۶/۲ متر مکعب در شهرستان گلپایگان تا ۷۵۰/۸ متر مکعب در شهرستان آران و بیدگل متفاوت بود (شکل ۳). از این نظر شهرستان‌های لنجان، تیران و کرون و شاهین شهر و میمه وضعیت مشابهی با شهرستان گلپایگان دارند و شهرستان‌های نائین، اردستان و خور و بیابانک نیز

در این حالت، به دلیل سردی هوا زیره سبز نمی‌شود و عملاً در اواخر بهمن و اوایل اسفند هم‌زمان با بارش‌های طبیعی چرخه زندگی خود را آغاز می‌کند. تقریباً در تمام شهرستان‌های مورد مطالعه (به‌عنوان مثال شهرستان اصفهان) بارش مناسبی در اواخر زمستان وجود دارد که این امر موجب استفاده از منابع آب خدادادی موجود می‌گردد. علاوه بر این تراکم کاری کشاورزان در این زمان در حداقل مقدار خود قرار دارد.

لنجان (۱۶۰۲/۹ متر مکعب)، تیران و کرون (۱۵۹۰/۸ متر مکعب) و شاهین و شهر و میمه (۱۶۳۴/۹ متر مکعب) مشاهده شد و این شهرستان‌ها تفاوت معنی‌داری از این نظر نداشتند (شکل ۴). حداکثر نیاز آبی محصول زیره در مرحله توسعه رشد در شهرستان آران و بیدگل (۲۱۵۱/۳ متر مکعب) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با شهرستان‌های نائین، اردستان و خور و بیابانک نداشت (شکل ۴). در سایر شهرستان‌های مورد مطالعه نیاز آبی مرحله توسعه زیره در دامنه‌ای از ۱۶۵۱ تا ۱۸۸۳/۹ متر مکعب در تغییر بود. مرحله توسعه گیاه اگرچه از نظر زمانی خیلی طولانی نیست (حدود ۳۰ روز) ولی به دلیل افزایش دما (نیمه دوم فروردین به بعد) سرعت توسعه اندام‌های رویشی زیاد بوده و بنابراین نیاز آبی این مرحله زیاده‌تر از سایر مراحل است (Malekian et al., 2009). در برخی از قسمت‌های کشور مصر نیاز مرحله توسعه رشد زیره ۲۱۶/۶ میلی‌متر گزارش شده است (Bondok and EL-sharkawy, 2014). تعیین نیاز آبی مراحل مختلف فنولوژیک زیره به‌ویژه در کشت‌های بهاره به دلیل حساسیت این مراحل به تنش خشکی و افت محصول از اهمیت به سزایی برخوردار است (Meshkani et al., 2020).

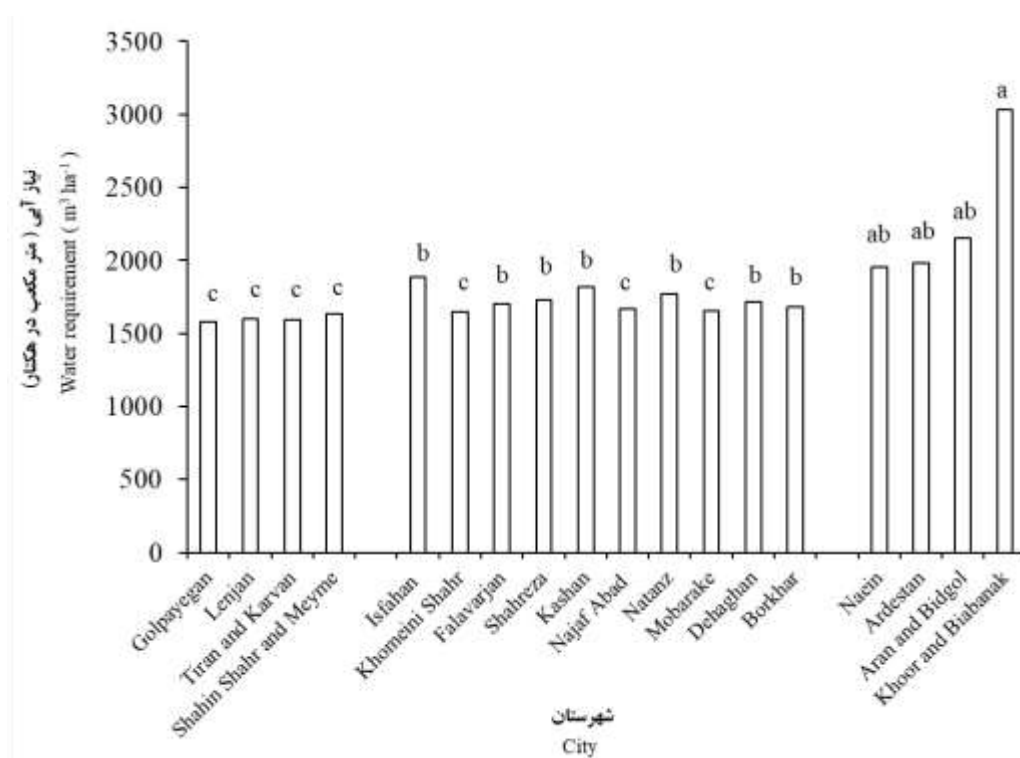
تفاوت معنی‌داری با شهرستان آران و بیدگل نداشتند. مابقی شهرستان‌ها (به جز شهرستان اصفهان) وضعیت بینابینی داشته و دامنه تغییرات نیاز آبی در آن‌ها محدود و از ۵۸۷/۲ (برخوار) تا ۶۱۷/۸ (شهرضا) متر مکعب متغیر بود، اما تفاوت معنی‌داری از این نظر نداشتند. برخی از مطالعات نیاز مرحله ابتدایی رشد زیره را ۶۱ میلی‌متر گزارش کرده‌اند که با نتایج مطالعه حاضر همخوانی دارد (Bondok and EL-sharkawy, 2014). به هر صورت این مرحله از رشد در اکثر مناطق کشت استان اصفهان به‌ویژه در کشت‌های زودهنگام مصادف با زمانی است که نیاز تبخیر و تعرق پایین است (از بهمن تا اسفندماه) (Alinian and Razmjoo, 2014). طبیعتاً ارقام دیررس زیره در مراحل مختلف رشد نیاز آبی بیشتری دارند. باوجود تفاوت بین اکوتیپ‌های زیره، اولین مرحله از رشد که در کشت پاییزه زیره ممکن است با تنش کمبود آب مواجه شود مرحله ابتدایی رشد (جوانه‌زنی و استقرار اولیه) است و تعیین نیاز آبی این مرحله به‌ویژه برای دیم‌کاری این گیاه ضروری است (Kafi et al., 2006).

بیشترین نیاز آبی محصول زیره مربوط به مرحله توسعه رشد (۱۰ درصد پوشش تا پوشش کامل زمین) است. در این مرحله حداقل نیاز آبی محصول زیره در شهرستان‌های گلپایگان (۱۵۷۷/۸ متر مکعب)،



شکل ۳- مقایسه نیاز آبی مرحله ابتدایی رشد فنولوژیک گیاه زیره در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان (حروف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ندارند (دانکن ۵ درصد).

Figure 3- Comparison of the water requirement of the initial stage of phenological growth of cumin plant in different cities of Isfahan province
Similar letters are not statistically different (Duncan 5%)



شکل ۴- مقایسه نیاز آبی مرحله توسعه رشد فنولوژیک گیاه زیره در شهرستان‌های مختلف استان اصفهان

حروف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ندارند (دانکن ۵ درصد).

Figure 4- Comparison of the water requirement of the development stage of phenological growth of cumin plant in different cities of Isfahan province

Similar letters are not statistically different (Duncan 5%)

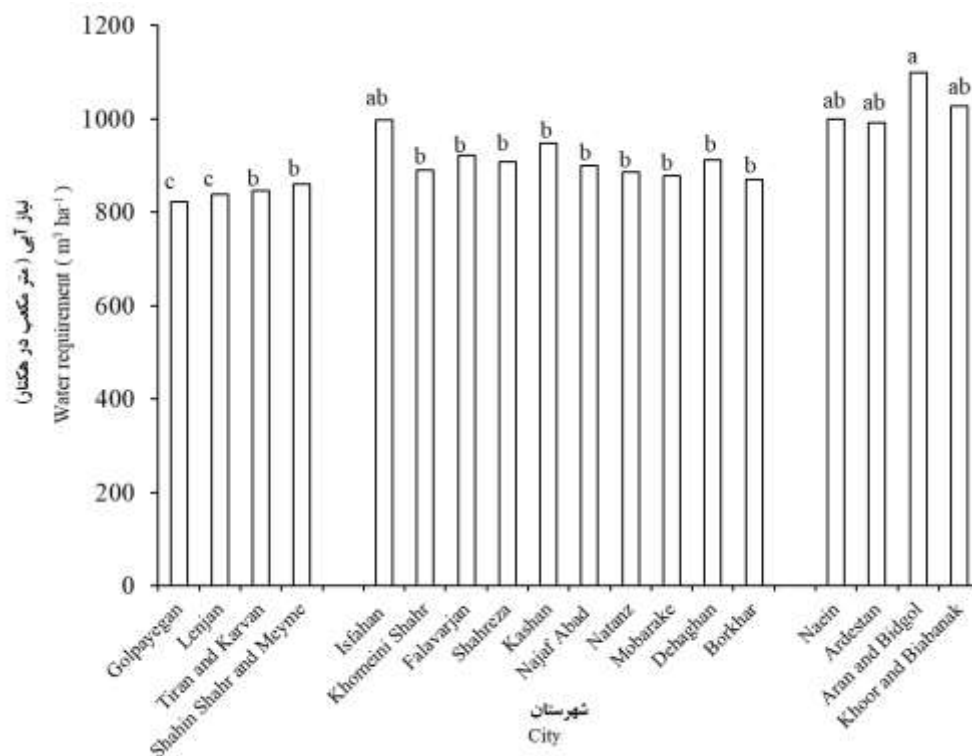
توده‌های محلی زیره (مثل توده جنوب خراسان، توده پارس و توده یزد) شرایط تنش رطوبتی را بهتر از دیگر توده‌ها تحمل می‌کنند (Motamedi-Mirhosseini et al., 2011).

در صورتی که موارد ذکر شده فوق را در جهت ارائه دستورالعمل کاربردی تجمیع نمائیم، شکل ۶ حاصل می‌شود. در این حالت شهرستان‌های استان اصفهان از نظر نیاز آبی مراحل مختلف رشد زیره به سه گروه تقسیم می‌شوند. گروه A شامل شهرستان‌های گلپایگان، لنجان، تیران و کرون و شاهین شهر و میمه می‌شود. در این گروه برای تولید زیره به‌طور متوسط ۳۰۰۰ متر مکعب آب در هر هکتار نیاز است. نیازهای مختلف مراحل رشد (ابتدایی، توسعه و میانی) در گروه A اگرچه کمتر از شهرستان‌های گروه B (شامل شهرستان‌های اصفهان، خمینی‌شهر، فلاورجان، شهرضا، کاشان، نجف‌آباد، نطنز، مبارکه، دهاقان و برخوار) است ولی تفاوت معنی‌داری در این رابطه وجود نداشت (شکل ۶). نیاز آبی محصول زیره به‌طور متوسط در شهرستان‌های گروه B برابر ۳۲۴۰ متر مکعب است. نیاز آبی شهرستان‌های گروه C شامل آران و بیدگل، اردستان، خور و بیابانک

نیاز آبی در مرحله میانی (پوشش کامل زمین تا رسیدگی محصول) حد واسط بین مراحل ابتدایی و توسعه است (شکل ۵). در این مرحله با پوشش کامل زمین توسط اندام‌های هوایی، تبخیر از سطح کاهش می‌یابد. در این مرحله از رشد نیز شهرستان‌های گلپایگان، لنجان، تیران و کرون و شاهین‌شهر و میمه در گروه آماری کمترین نیاز آبی قرار می‌گیرند (نیاز آبی ۸۶۰-۸۲۰ متر مکعب) و شهرستان‌های آران و بیدگل، نائین، اردستان و خور و بیابانک نیز در گروه آماری شهرستان‌های با بالاترین نیاز آبی در مرحله میانی قرار دارند (۹۹۰-۱۰۹۰ متر مکعب). نیاز آبی مرحله میانی سایر شهرستان‌های استان اصفهان نیز در حد واسط این دو گروه قرار دارد (۸۷۰-۹۹۰ متر مکعب). گلدهی و گرده‌افشانی زیره در این مرحله قرار می‌گیرد و تأمین آب در این مرحله از رشد بسیار حائز اهمیت است. عدم تأمین آب کافی در این مرحله از رشد می‌تواند افت چشم‌گیر عملکرد را به همراه داشته باشد (Timachi et al., 2020). تنش در این مرحله از رشد گیاه می‌تواند عملکرد دانه را به کمتر از یک‌سوم کاهش دهد (Forouzandeh et al., 2015). باین وجود برخی

برآورد نیاز آبی در مراحل چهارگانه رشد گیاهانی مثل کلزا (Jalali and Salemi, 2020) و سیب زمینی (Jalali and Salemi, 2017) در استان اصفهان انجام شده است.

و نائین به طور متوسط ۳۷۷۰ متر مکعب در هر هکتار و مراحل توسعه و میانی رشد زیره در این شهرستان ها به طور معنی دار بیش از دو گروه دیگر است (شکل ۵). برآورد نیاز آبی محصولات می تواند به بهبود مدیریت منابع آب در شرایط کمبود یا نوسان منابع آبی کمک نماید.



شکل ۵- مقایسه نیاز آبی مرحله میانی رشد فنولوژیک گیاه زیره در شهرستان های مختلف استان اصفهان
حروف مشترک از نظر آماری تفاوت معنی دار ندارند (دانکن ۵ درصد).

Figure 5- Comparison of the water requirement of the mid stage of phenological growth of cumin plant in different cities of Isfahan province

Similar letters are not statistically different (Duncan 5%)

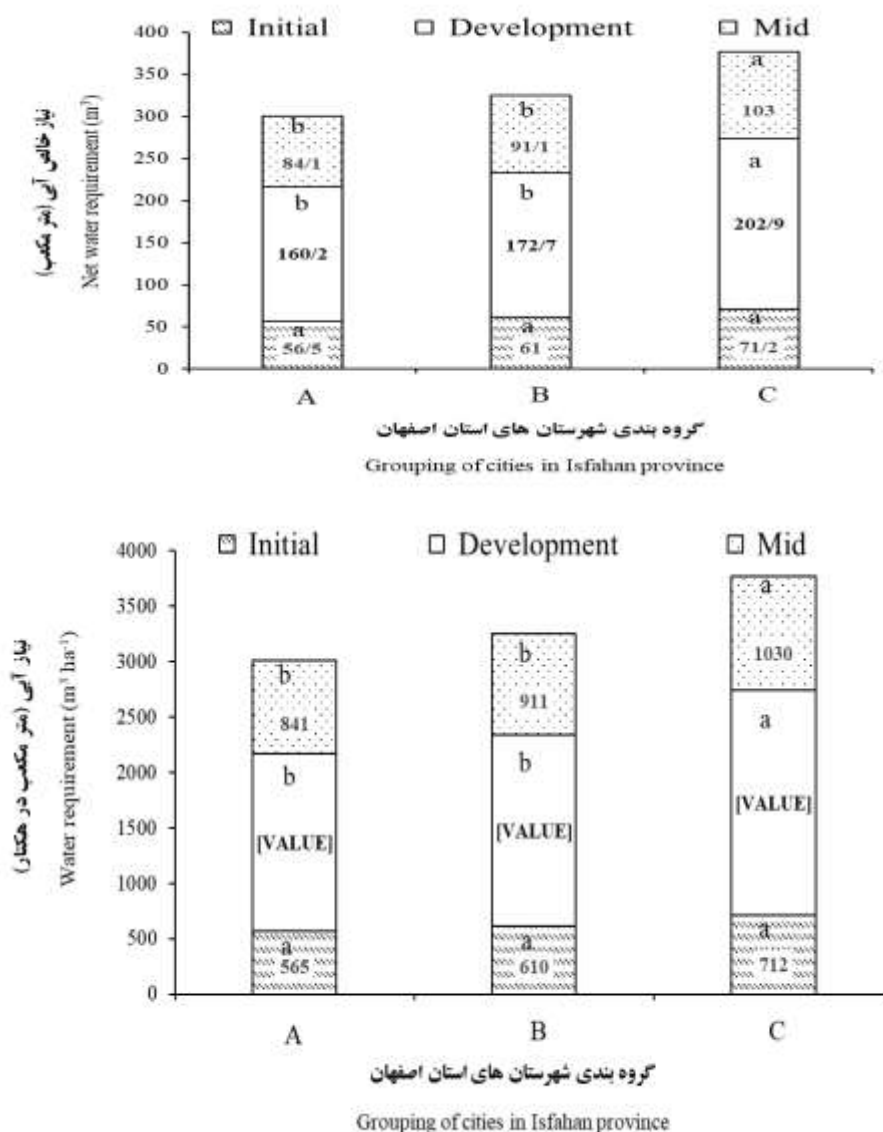
نتیجه گیری

هکتار وجود دارد. نکته قابل توجه دیگر این است که مقادیر آب ذکر شده برای دستیابی به حداکثر عملکرد بوده و گیاه زیره در صورتی که با تنش های رطوبتی احتمالی نیز مواجه شود محصول اقتصادی قابل قبولی خواهد داشت. سهولت انبارداری بذر تولیدی، قابلیت صادرات و مصارف دارویی از محاسن دیگر کشت این محصول است. البته توسعه کشت این گیاه منوط به توجه به ارائه ماشین های کاشت و برداشت مناسب و همچنین در نظر گرفتن مقاصد صادراتی برای این محصول است.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند از مدیریت آب و خاک سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان و مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان برای همکاری و تأمین اعتبار لازم جهت این پژوهش سپاسگزاری نمایند.

با توجه به محدودیت منابع آبی در استان اصفهان توجه به تولید محصولاتی با نیاز آبی کم امری ضروری است. زیره یکی از محصولاتی است که دارای پتانسیل قابل توجه در این زمینه بوده و می تواند جایگاه مناسبی در تناوب های زراعی داشته باشد. پژوهش حاضر نشان می دهد نیاز آبی محصول زیره در مناطق مختلف استان از اکثر محصولات زراعی شناخته شده (مثل گندم، جو و گلرنگ) پایین تر بوده و در ۱۰ شهرستان از ۱۸ شهرستان مورد مطالعه صرفه نظر از راندمان انتقال آب، با ۳۳۴۰ مترمکعب در هکتار می توان نسبت به کشت زیره اقدام نمود این مقدار در شهرستان هایی که آب و هوای خشک تری دارند حتی به ۳۰۰۰ متر مکعب می رسد. حتی در مناطق گرم استان اصفهان (اردستان، نائین، خور و بیابانک و آران و بیدگل) نیز امکان کشت این محصول با مصرف ۳۷۷۰ متر مکعب آب در هر



شکل ۶- مقایسه نیاز آبی مراحل مختلف رشد گیاه زیره در سه گروه از شهرستان‌های استان اصفهان
حروف مشترک در بخش‌های هم‌رنگ در ستون‌های مختلف از نظر آماری تفاوت معنی‌دار ندارند (دانکن ۱ درصد).

Figure 6- Comparison of water requirement of different growth stages of cumin plant in three groups of cities in Isfahan province

Similar letters in the same colored sections in different columns are not statistically significant (Duncan 1%)

منابع

- Alinian, S., & Razmjoo, J. (2014). Phenological, yield, essential oil yield and oil content of cumin accessions as affected by irrigation regimes. *Industrial Crops and Products*, 54, 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.028>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper. NO. 56, Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J.L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131,

- 2-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2))
- Bondok, M.Y., & EL-sharkawy, A.F. (2014). Management of sprinkler irrigation system for cumin in old valley. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 92(3), 1047-1062. <https://doi.org/10.21608/ejar.2014.156442>
5. Dehaghi, M.A., & Mollafilabi, A. (2009). Production technology for cumin (*Cuminum cyminum* L.) on the basis of research findings. In International Symposium on Medicinal and Aromatic Plants-SIPAM2009 853 (pp. 83-92). <https://doi.org/10.17660/actahortic.2010.853.9>
6. Forouzandeh, M., Karimian, M.A., & Mohkami, Z. (2015). Effect of drought stress and different types of organic fertilizers on yield of cumin components in Sistan region. *European Journal of Medicinal Plants*, 5(1), 95. <https://doi.org/10.9734/ejomp/2015/12564>
7. Ghaffari, A., Ghasemi, V.R., & Pauw, E.D. (2015). Agro-Climatically Zoning of Iran by UNESCO approach. *Dryland Agriculture* 1:64-95. (In Persian). <https://doi.org/10.4060/cb8302en>
8. Jalali, A.H., Salemi, H.R., Nikouei, A., Gavangy, S., Rezaei, M., Khodaghali, M., & Toomanian, N. (2017). Determination of water requirement for potato in different climates of Isfahan province *Applied Research in Field Crops*, 30(4), 53-73. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/AJ.2018.116108.1210>
9. Jalali, A.H., & Salemi, H.R. (2020). Estimation of net water requirement of different phenological stages of canola in Isfahan province. *Journal of Water and Soil*, 34(4), 781-795. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V34I4.81248>
10. Johri, R.K. (2011). *Cuminum cyminum* and *Carum carvi*: An update. *Pharmacogn Review*, 5(9), 63-72. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.79101>
11. Kafi, M., Rashed Mohassel, M.H., Koocheki, A., & Nassiri, M. (2006). *Cumin (Cuminum cyminum): Production and Processing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482280531>
12. Malekian, A.R.M.E.N., Ghasemi, H., & Ahmadian, A. (2009). Evaluation of the efficiency of CROPWAT model for determining plant water requirement in arid regions. *Desert*, 14(2), 209-215. https://jdesert.ut.ac.ir/article_36341_b5506d9c85fe0387ce84d4132b117cfa.pdf
13. Meshkani, J., Kafi, M., Koramdel, S., & Moallem Benhangi, F. (2020). Effect of intercropping ratios of cumin (*Cuminum cyminum* L.) with Persian Shallot (*Allium altissimum* Regel.) on their agronomic criteria and land equivalent ratio. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 18, 181-196. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/gsc.v18i2.73256>
14. Motamedi-Mirhosseini, L., Mohammadi-Nejad, G., Bahraminejad, A., Golkar, P., & Mohammadinejad, Z. (2011). Evaluation of cumin (*Cuminum cyminum* L.) landraces under drought stress based on some agronomic traits. *African Journal of Plant Science*, 5(12), 749-752. <https://doi.org/10.5897/ajps11.227>
15. Rajput, R.P.S., Paramakrishnan, N., & Gangadharappa, H.V. (2021). Cumin (*Cuminum cyminum* L.) seed. in oilseeds: Health attributes and food applications (pp. 507-516). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_20
16. Saeedinia, M., Tarnian, F., Hosseini, H., & Nasrollahi, A. (2018). Estimation of the evapotranspiration and crop coefficient of Chamomile (*Matricaria chamomilla* L.) and Cumin (*Cuminum cyminum* L.) in Khorram Abad region. *Water and Irrigation Management*, 8(1), 165-175. (In Persian). <https://10.22059/JWIM.2018.257143.610>
17. Singh, R.P., Gangadharappa, H.V., & Mruthunjaya, K. (2017). *Cuminum cyminum*—A popular spice: An updated review. *Pharmacognosy Journal*, 9(3), 292-301. <https://doi.org/10.5530/pj.2017.3.51>
18. Timachi, F., Armin, M., Jamimoeini, M., & Abhari, A. (2020). Physiological response of cumin to times and type of stress modulator in rain-fed and irrigated conditions. *Russian Journal of Plant Physiology*, 67, 1163-1172. <https://doi.org/10.1134/S1021443720060175>
19. Trend Economy. (2021). Merchandise Exports by Country. Seeds of anise, badian, fennel, coriander, cumin or caraway, juniper. Iran. <https://trendeconomy.com/data/h2/Iran/0909>



Common Water Resources Conflict Analysis due to Agriculture Land Development Using Game Theory and GMCR+ (Case Study: Nazlouchay Basin in Urmia Lake Watershed)

M. Koohani¹, J. Behmanesh^{2*}, V.R. Verdinejad³, M. Mohammadpour⁴

Received: 10-06-2023

Revised: 28-08-2023

Accepted: 17-09-2023

Available Online: 18-09-2023

How to cite this article:

Koohani, M., Behmanesh, J., Verdinejad, V.R., & Mohammadpour, M. (2023). Common water resources conflict analysis due to agriculture land development using game theory and GMCR+ (case study: Nazlouchay basin in Urmia lake watershed). *Journal of Water and Soil*, 37(4), 531-545. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82867.1295>

Introduction

Land-use changes and development of irrigated agricultural lands are very important factors that affect natural resources such as the quantity and quality of water resources and the environment. Land use change is attributed to two major processes. The first process is the change in land cover, which is related to the expansion or limitation of the area of land used (such as pasture, agricultural or urban land). The second process is a change in land cover management type (for example, changes in irrigation, fertilizer use, crop type, harvesting methods or surface impermeability). Recently the Urmia lake has been accompanied by a reduction in water resources and the continuation of this process can completely cause to dry Urmia Lake. One of the approvals of the Iranian government after the formation of the National Working Group for the Lake Urmia restoration program was to prevent the development of agricultural lands in this watershed since 2014. Unfortunately, no serious and effective action has been taken in this case yet, and this process has progressed to cause conflicts in this region. Game theory is one of the most important methods used in modeling and analyzing water and environmental resources conflicts.

Materials and Methods

In the present study, using GMCR + software, the water resources conflicts arising from agricultural land development has been analyzed. In this conflict, by accurately identifying the set of decision-makers and their strategies in the conflict process (Regional Water Company, Agriculture Organization, Justice, and Profiteering Farmers), the model was executed with 4 players, 6 options, and 64 states. Players' performance was assessed once as ideal behavior (importance to the environment, sustainable development, and preference of long-term over short-term interests) and then as the use of completing a questionnaire. Then 4 states in the ideal behavior as equilibrium states and 7 states in the condition of using the questionnaire results were extracted as equilibrium states. The conflict was also examined in the coalition state of 3 government organizations (Regional Water Company, Agriculture Organization, and Justice Organization). Finally, the most probable states of equilibrium in the game results were identified.

Results and Discussion

In the discussion concerning equilibrium points, it is crucial to consider that for resolving the dispute and the proposed solution, we need to examine not only the stability of these points but also the state's priority from the perspective of stakeholders. Based on the discussions and the output results of the conflict model using the GMCR+ model, the optimal response and conflict resolution can be found in scenario 12. This scenario holds a

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Student, Professors and Ph.D. Graduated, Department of Water Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.82867.1295](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82867.1295)

high priority for three key players: the Agricultural Organization, the Regional Water Company, and the Justice Department. However, it doesn't share the same level of priority with the Profiteering Farmers. The reason for this divergence lies in the preference for personal gain and profit pursuit over the broader interests of the entire catchment area.

Conclusion

In recent years, despite the imposed restrictions, the Urmia Lake Basin has witnessed a notable increase in the cultivation of water-intensive crops. This shift has transformed arid lands into irrigated ones and altered agricultural areas into residential zones. According to the principles of the tax evasion game, when land development carries no moral or financial consequences for profit-driven farmers, and they are aware that regulatory institutions will not commit excessive resources to prevent and effectively combat the expansion of illegal farmlands, Profiteering Farmers will consistently engage in unauthorized development under any conflict scenario. In light of the revenue potential of this situation and the opportunity to enhance one's social standing, Profiteering Farmers will persist in unauthorized development regardless of the prevailing conflict circumstances. The findings underscore the critical role of the Regional Water Company and the Agricultural Organization. These entities must proactively employ their legal capacities to impede and deter the expansion of agricultural lands. Additionally, the Justice Organization assumes primary responsibility as a crime prevention factor, while its secondary role as a judicial enforcer within this conflict situation appears fitting. Therefore, all situations are stable for Profiteering Farmers. It seems that creating a platform and conditions in which Profiteering Farmers do not develop agricultural land themselves or do not develop land due to the protection of government institutions, can be very thoughtful and effective.

Keywords: Agriculture land development, Common water resources, Game theory, Conflict analysis, Non-cooperative

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۴۵-۵۳۱

تحلیل مناقشات منابع آب مشترک ناشی از توسعه اراضی کشاورزی با استفاده از نظریه بازی‌ها و مدل GMCR+ (مطالعه موردی: حوضه نازلوچای در حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

محمد کوهانی^۱ - جواد بهمنش^{۲*} - وحیدرضا وردی نژاد^۳ - مریم محمدپور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۶

چکیده

تغییرات کاربری اراضی و توسعه کشاورزی از عوامل بسیار مهمی هستند که بر کمیت، کیفیت منابع آب و محیط‌زیست تأثیر گذاشته است. در سال‌های اخیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه این تغییرات سبب افت شدید سطح آب شده است. در همین راستا یکی از مصوبات هیئت وزیران پس از تشکیل کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه، ممنوعیت توسعه اراضی کشاورزی از سال ۱۳۹۳ در این حوضه آبریز بود. با توجه به وجود تعارض بین ذی‌نفعان مسئله توسعه اراضی کشاورزی، می‌توان از ابزارهای مدل‌سازی مناقشات جهت تحلیل و ارائه راهکار استفاده نمود. از مشهورترین ابزارهای پژوهشی کاربردی و مفید در مدل‌سازی و تحلیل مناقشات منابع آبی و زیست محیطی، نظریه بازی‌ها می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از نرم‌افزار GMCR+ به تحلیل مناقشه منابع آبی مشترک ناشی از توسعه اراضی کشاورزی پرداخته شد. در تحلیل این مناقشه با شناسایی دقیق مجموعه ذی‌نفعان و استراتژی‌های آن‌ها در روند مناقشه (شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، دادگستری و کشاورزان)، مدل با ۴ بازیکن، ۶ گزینه و ۶۴ وضعیت شبیه‌سازی شد. عملکرد بازیکن‌ها در گام اول به صورت رفتار ایده‌آل و در گام دوم با استفاده از تحلیل خروجی‌های بدست آمده از پرسش‌نامه بررسی گردید. در ادامه ۴ وضعیت در حالت ایده‌آل به عنوان وضعیت‌های تعادل و ۷ وضعیت در حالت استفاده از نتایج پرسشنامه، به عنوان وضعیت‌های تعادل استخراج گردید. همچنین مناقشه در حالت ائتلاف ۳ ارگان دولتی (شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، دادگستری) نیز مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت محتمل‌ترین وضعیت تعادل در نتایج بازی شناسایی گردید. نتایج نشان داد اهمیت مشارکت جدی شرکت سهامی آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی با استفاده از ظرفیت‌های قانونی خود در جهت ممانعت از توسعه بی‌رویه اراضی کشاورزی می‌تواند بسیار راه‌گشا باشد. همچنین دخالت مرجع قانونی دادگستری به عنوان یک عامل پیش‌گیری از وقوع جرم و در ادامه نقش آفرینی آن دستگاه به عنوان صادرکننده حکم قضایی در این مناقشه موثر است. لازم به ذکر است انطباق نتایج مدل‌سازی با رفتار ایده‌آل با نتایج مدل‌سازی از خروجی پرسشنامه نخبگانی نشان از نزدیک بودن نقطه تعادل به واقعیت بوده و احتمال عملی شدن آن بالاست. این تحقیق نشان داد در صورت ائتلاف بین بازیکنان دولتی، می‌توان به راه حل واحدی برای حل مناقشه رسید.

واژه‌های کلیدی: تحلیل مناقشات، تئوری بازی‌ها، توسعه اراضی کشاورزی، غیر همکارانه، منابع آب مشترک

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادان و دانش‌آموخته دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: j.behmanesh@urmia.ac.ir)

مقدمه

تغییر کاربری اراضی به دو فرآیند عمده نسبت پیدا می‌کند. اولین فرآیند، تغییر در پوشش زمین است که با گسترش یا تحدید مساحت اراضی مورد استفاده (مانند مرتع، اراضی کشاورزی یا شهری و ...)، مرتبط است؛ فرآیند دوم تغییر در نوع مدیریت روی پوشش زمین است (به عنوان مثال، تغییرات در آبیاری، استفاده از کود، نوع محصول، روش های برداشت و یا نفوذناپذیری سطوح) (FAO, 2018). از عوامل بسیار مهم که بر منابع طبیعی و محیط‌زیست تأثیر می‌گذارد، توسعه کشاورزی آبی و تغییرات کاربری اراضی می‌باشد (Kangabam et al., 2019). در دو دهه اخیر دریاچه ارومیه بعنوان بزرگترین دریاچه داخلی در ایران با افت شدید سطح آب مواجه شده‌است که توسعه بی‌رویه کشاورزی یکی از عوامل مهم آن در حوضه آبریز آن دریاچه می‌باشد؛ ادامه این روند می‌تواند سبب خشک شدن کامل آن شود و پیامدهای نگران کننده ای برای منطقه و کشور در آینده ایجاد نماید. از سوی دیگر عدم تعادل میان منابع و مصارف آبی در سطح حوضه‌های آبریز، همواره اختلافات زیادی بر سر تخصیص آب به همراه دارد. در دهه‌های گذشته روش‌های متعددی برای حل این اختلافات توسعه داده شده‌است که یکی از آن‌ها رویکرد تئوری بازی‌ها بعنوان یک ابزاری نوین برای رفع اختلاف در زمینه منابع آب می‌باشد (Daneshyazdi et al., 2014). نتایج تحقیق واصف و همکاران (Vasef et al., 2020) در مورد توسعه اراضی کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد ساماندهی و رفع ابهام قوانین موجود و فرهنگ‌سازی که دارای قابلیت بروز نتایج بلند مدت است در اولویت برنامه‌های اجرایی و مدیریتی تصمیم‌گیرندگان این حوزه در کشور باید قرار بگیرد.

نظریه بازی‌ها، یک مجموعه ابزار تحلیلی بر پایه ریاضی است، که تلاش می‌کند تا رفتار حاکم بر یک موقعیت راهبردی را در وضعیت های مختلف بازیکنان، مدل‌سازی کند (Madani and Hipel, 2007). کاربرد نظریه‌ی بازی‌ها در شاخه‌های مختلف علوم مرتبط با اجتماع، از جمله سیاست، جامعه‌شناسی، و حتی روان‌شناسی در حال گسترش است (Ostrom et al., 1994). اهمیت مطالعه و بررسی طیف متنوعی از مناقشات به نوبه‌ی خود منجر به رشد و تکامل روش‌ها و شاخه‌های گوناگونی در نظریه‌ی بازی‌ها گردید (Madani and Hipel, 2011). اگر بازیکنان براساس اصول توافق شده عمل کنند، بازی را همکاری و در غیر این صورت به آن بازی غیرهمکارانه اطلاق می‌شود (Nikoo, 2008). در رویکرد غیرهمکارانه هر بازیکن برای کسب مطلوبیت خود به صورت انفرادی رفتار می‌کند، و یا به عبارتی، نظریه‌ی بازی‌های غیرهمکارانه در موقعیت‌هایی که بازیکنان به صورت مستقل تصمیم‌گیری می‌کنند، ایجاد خواهد شد (Madani, 2010). به طور خلاصه نظریه بازی مطالعه تصمیم‌گیری استراتژیک است. به بیان دیگر

نظریه بازی مطالعه مدل‌سازی ریاضی تعامل یا رقابت بین تصمیم‌گیران عقلانی و منطقی است. نظریه بازی در حالت کلی به دو شاخه اصلی تقسیم می‌شود: الف) بازی‌های غیرمشارکتی ب) بازی‌های مشارکتی و همکاریانه (Han et al., 2012).

نورالهی و همکاران (Nourollahi, et al., 2021) با ارائه یک راهبرد مطلوب در بحث تخصیص آب به کاربرد تئوری بازی‌های غیرهمکارانه پرداختند. نتایج نشان داد روش پایداری Non-myopic برای تحلیل بازی قابل اطمینان‌تر بوده و احتمال رخداد بیشتری در رفتار بازیکنان دارد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که در مطالعات مرتبط مناقشات آبی به ماهیت و بسیاری از مفاهیم و ویژگی‌های اصلی مناقشه توجه نمی‌شود (Farajzadeh et al., 2020). ذوقی و همکاران (Zoghi et al., 2014) در تحقیقی بر اساس تحلیل استراتژیک تعاملات ذی‌نفعان، تغییر کاربری اراضی دارآباد با استفاده از مدل گراف پرداختند. بر اساس نتایج، عامل اصلی تغییر کاربری اراضی منطقه، عدم شفافیت‌های قانونی درباره تغییر کاربری اراضی، مشخص نبودن مسئولیت‌های نظارتی و تصمیم‌گیری شورایی پیرامون تغییر کاربری اراضی است. صفایی و ملک محمدی (Safaei and Malek Mohammadi, 2014) به تحلیل مناقشه‌ی دریاچه‌ی ارومیه با استفاده از نظریه بازی‌ها به کمک مدل گراف برای حل مناقشه پرداختند، بر اساس نتایج این تحقیق، از دیدگاه استراتژیک، عامل اصلی بروز بحران دریاچه‌ی ارومیه، رفتار مبتنی بر عقلانیت فردی ذی‌نفعان است. این امر، موجب تمرکز آنان بر افزایش منافع اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی و غفلت از پیامدهای محیط زیستی و اقتصادی اجتماعی ناشی از نابودی دریاچه شده‌است. مقدم و همکاران (Moghaddam et al., 2022) تحقیقی در زمینه حل اختلاف بهره‌برداران با مدلی چند شاخصه و غیرهمکارانه برای احیای آبخوان انجام داده‌اند. نتایج این تحقیق گواه این است که افزایش قدرت مدیران منابع آب منجر به تعادل در حل تعارضات می‌شود و استراتژی‌های کاهش برداشت آب زیرزمینی به راه‌حل ترجیحی تبدیل می‌شوند. این بینش را می‌توان برای دستیابی به پایداری کمی و کیفی در مدیریت آبخوان، تقویت حل تعارض مورد استفاده قرار داد. رگو و همکاران (Rêgo et al., 2021) نیز پژوهشی با استفاده از مدل گراف در رابطه با تحلیل مناقشه زمین‌های فاریاب در منطقه Chapada do Apodi برزیل که پتانسیل توسعه اقتصادی بالایی داشته انجام داده است. نتایج نشان داد که نقطه پایداری شامل سناریویی می‌شود که در آن کشاورزان کوچک و بزرگ مصرف آب خود را کاهش داده و آموزش قوانین و سیاست‌های مربوطه و مشارکت اجتماعی کشاورزان کوچک توصیه شده‌است. بحرینی و همکاران (Bahrini et al., 2021) از مدل گراف برای روش حل تعارض استفاده کرده و یک رویکرد تحلیلی جدید برای نتایج پیشنهاد کرده‌اند تا قوانین انتخاب اجتماعی مانند را برای رسیدگی بهتر، تجزیه و تحلیل و

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در غرب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع واقع شده است. از نظر جغرافیایی این حوضه بین استان‌های آذربایجان غربی (۴۶٪)، آذربایجان شرقی (۴۳٪) و استان کردستان (۱۱٪) و در محدوده‌ی ۴۵° ۳۶' تا ۳۸° ۳۸' عرض شمالی و ۴۴° ۵۰' تا ۴۶° ۱۰' طول شرقی قرار دارد. حوضه‌ی آبریز نازلوچای ارومیه بین ۲۴' ۴۴° تا ۵۳' ۴۵° طول شرقی و ۳۰' ۳۷° تا ۵۸' ۳۷° عرض شمالی واقع شده است. وسعت حوضه‌ی آبریز نازلوچای ۱۵۱۸۸۳/۶ هکتار می‌باشد. محیط حوضه‌ی آبریز نازلوچای ۲۶۰/۶۵ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوضه ۱۲۹۱ متر و حداکثر ارتفاع آن ۳۶۰۰ متر می‌باشد. میانگین بلند مدت بارش سالانه آن، ۳۴۴/۹ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر بارش سالانه در بهار و ماه‌های فروردین و اردیبهشت نازل می‌شود که ۴۷/۲ درصد کل بارش‌های سالانه را شامل می‌شود. در شکل ۱ محل ورود رودخانه نازلوچای به دریاچه ارومیه نشان داده شده است. همچنین بررسی تصاویر ماهواره‌ای مربوط به حوضه آبریز نازلوچای ارزیابی شده و تغییرات کاربری اراضی از سال‌های ۹۲ الی ۹۷ (بعد از ابلاغ مصوبه ممنوعیت توسعه اراضی کشاورزی) مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده، در سال ۱۳۹۷ در حوضه نازلوچای اراضی مرتع با ۴۴،۱۵٪ و اراضی دیمی با ۲۲،۸۳٪ بیشترین کاربری را به خود اختصاص داده است. ملاحظه می‌شود در مدت ۵ سال اراضی باغی ۷۱۴۳،۱۲ هکتار و اراضی دیمی ۵۴۴۴،۶۴ هکتار رشد داشته است (Zeinalzadeh and Esmaeilnezhad, 2017).

مدل گراف (GMCR)

مدل گراف جهت حل مناقشه که در زمره‌ی مدل‌های بازی غیرهمکارانه با اطلاعات کامل قرار می‌گیرد، توسط Fang et al., 1993 با ترکیب مدل گراف و روش‌های تحلیل مناقشه، به وجود آمد. این مدل دارای سه جزء اساسی است: تصمیم‌گیرندگان (بازیکنان)، مجموعه‌ی انتخاب‌های هر بازیکن، اولویت‌های بازیکنان نسبت به هر یک از وضعیت‌ها و نتایج ممکن بازی، که آن بازیکن قادر است با تغییر استراتژی‌ها و انتخاب‌هایشان در خلال فرآیند تکامل بازی در آن‌ها سهیم گردد (Madani and Hipel, 2011). در GMCR، یک مناقشه به صورت حرکت از یک وضعیت به وضعیت دیگر (رأس‌های گراف) به وسیله‌ی انتقالاتی (آرک‌های گراف) که توسط بازیکنان کنترل می‌گردد، نمایش داده می‌شود (Safaei and Malek Mohammadi, 2014). در شکل ۲ فرآیند حل مناقشه در GMCR بصورت شماتیک نمایش داده شده است.

پیش‌بینی نتایج احتمالی تعارض اعمال کنند. نتایج تایید می‌کنند که افزودن مراحل تحلیلی در مدل گراف برای حل تعارض و در نظر گرفتن مفهوم بازی‌های مرتبط به تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاران کمک می‌کند تا بینش روشن‌تری نسبت به تعارض به دست آورند.

در راستای حفاظت و احیاء دریاچه ارومیه طبق مصوبه هیئت وزیران در سال ۱۳۹۳، هرگونه توسعه اراضی کشاورزی اعم از تبدیل اراضی ملی منابع طبیعی به کشاورزی، دیم به آبی، زراعی به باغی، در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه و هرگونه عملیات منجر به افزایش برداشت از منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه ممنوع بوده و وزارتخانه‌های نیرو و جهاد کشاورزی موظف هستند از زمان ممنوعیت صدور مجوز در این خصوص، با متخلفین برخورد نموده و گزارش عملکرد ماهانه خود را به دبیرخانه کارگروه ملی نجات دریاچه ارومیه ارائه نمایند. عدم توجه به مسئله توسعه بی‌رویه اراضی کشاورزی در این حوضه آبریز می‌تواند تمامی زحمات و تلاش‌های انجام گرفته در راستای احیای دریاچه ارومیه را هدر دهد. از طرفی توجه به حل مناقشات منابع آبی در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. بی‌توجهی به این امر، موجب می‌شود که مطالعات صورت گرفته و پیشنهادهای سیاستگذاری ارائه شده، فاقد دیدگاه کل نگر و راهبردی به مناقشه آبی باشد. بنابراین، با توجه به رفتار ذی‌نفعان در بهره‌برداری از منابع مشترک، ضرورت چنین مطالعه‌ای پیش از ارائه و اجرای هرگونه اقدام سیاست‌گذارانه، کاملاً آشکار است. بنابراین، عدم تحلیل رفتار ذی‌نفعان، موفقیت سایر رهنمودها و اقدامات سیاستگذاری برای حل بحران را با ابهام و چالش رو به رو می‌کند. یکی از ابزارهای مورد استفاده بدین منظور استفاده از نظریه بازی‌های غیرهمکارانه می‌باشد. لذا تحقیق حاضر به بررسی تحلیل مناقشات منابع آب حوضه آبریز دریاچه ارومیه ناشی از توسعه اراضی کشاورزی با استفاده از نظریه بازی‌ها و مدل GMCR+ در زیر حوضه آبریز دریاچه ارومیه زیر حوضه نازلوچای بین چهار بازیکن شامل شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، دادگستری و کشاورز سودجو خواهد پرداخت.

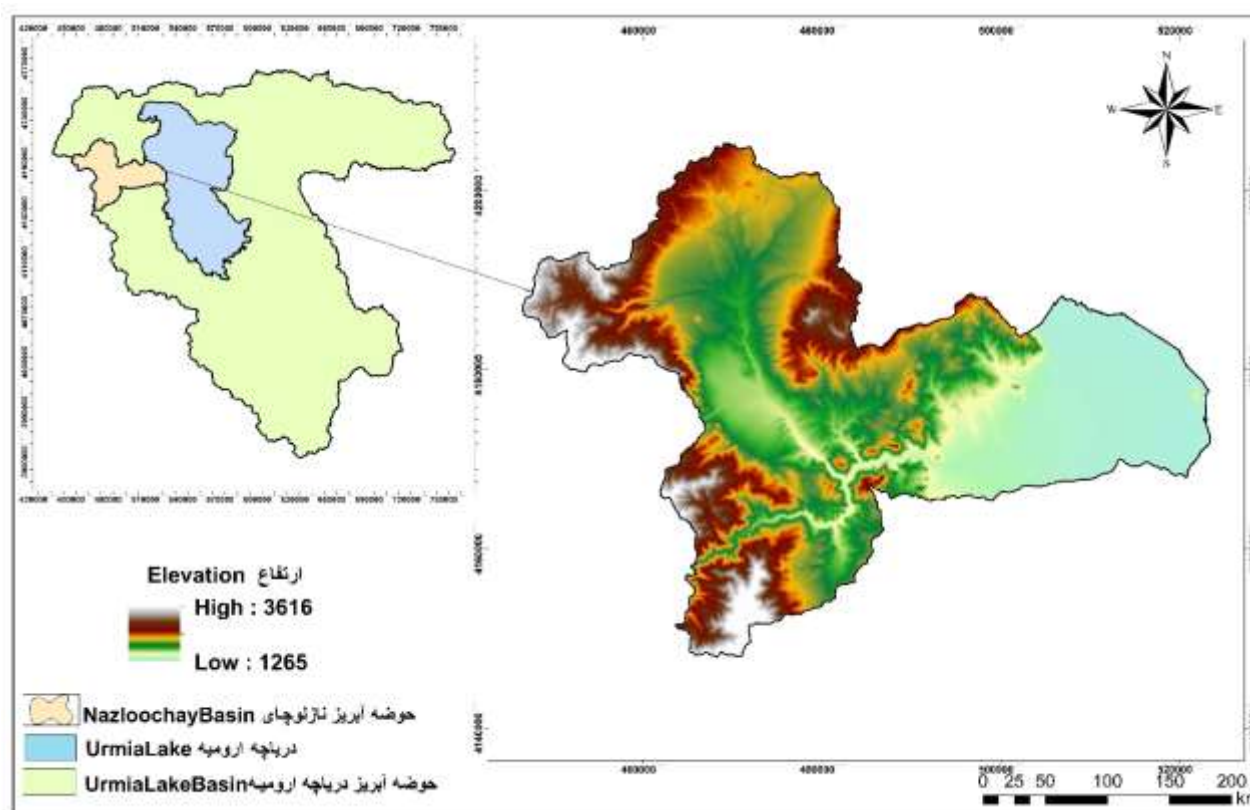
هدف از انجام این تحقیق، تحلیل مناقشه منابع آب ناشی از توسعه غیرمجاز اراضی کشاورزی به روش نظریه بازی‌ها و مدل گراف با استفاده از نرم‌افزار GMCR+ می‌باشد. این موضوع نیازمند بررسی عوامل توسعه اراضی کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و تعیین ذی‌مدخلان و اولویت دهی به تصمیمات آنها در رسیدن به وضعیت پایدار جهت مدیریت این مناقشه در راستای احیای دریاچه ارومیه می‌باشد. مطالعات پیشین در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پیرامون عوامل و سیاست‌های کلان کشور بوده و مناقشات در سطح ملی بررسی شده است، لذا تحقیق حاضر بومی‌سازی و مدل‌سازی محلی مناقشات حوضه آبریز دریاچه ارومیه در زیر حوضه نازلوچای با محوریت توسعه اراضی کشاورزی، بر اساس بازیگران منطقه‌ای که مجری نهایی سیاست‌های کلان هستند، صورت پذیرفته است.

فرمانداری، جهاد کشاورزی، فرماندهی انتظامی استان، اداره کل صمت استان، دهیاری‌ها، اتحادیه مشاورین املاک، شهرداری، شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، اداره کل منابع طبیعی و... تهیه شد ولی در شرایط واقعی تنها برخی از ذی‌نفعان بصورت مستقیم و برخی دیگر بصورت غیر مستقیم بر مناقشه تأثیر می‌گذارند. بنابراین جهت تدقیق و تمرکز روی بازیکنان موثر این مناقشه، بعد از بازنگری اولیه و اساسی ۴ بازیکن شامل (شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی، دادگستری و کشاورزان) بعنوان بازیکنان اصلی تعیین شدند؛ در جدول ۱ گزینه‌های هر بازیکن و همچنین وضعیت پایه این مناقشه نمایش داده شده است. وضعیت پایه مناقشه نیز بدین معناست که هم اکنون و در شرایط واقعی و فعلی مناقشه، بازیکنان نسبت به گزینه‌های خود چه تصمیمی اخذ کرده‌اند. بازیکن نسبت به گزینه‌های در اختیار خود با دو رویکرد می‌تواند مواجه شود، یا آن را قبول کرده و انجام دهد که به اختصار با نماد Y (YES) نشان داده می‌شود یا آن را رد کرده و انجام نمی‌دهد که با نماد N (NO) نمایش داده می‌شود. این مناقشه ۴ بازیکن، ۶ گزینه (استراتژی) با تعداد ۲^۶ یعنی ۶۴ وضعیت مدل‌سازی شد.

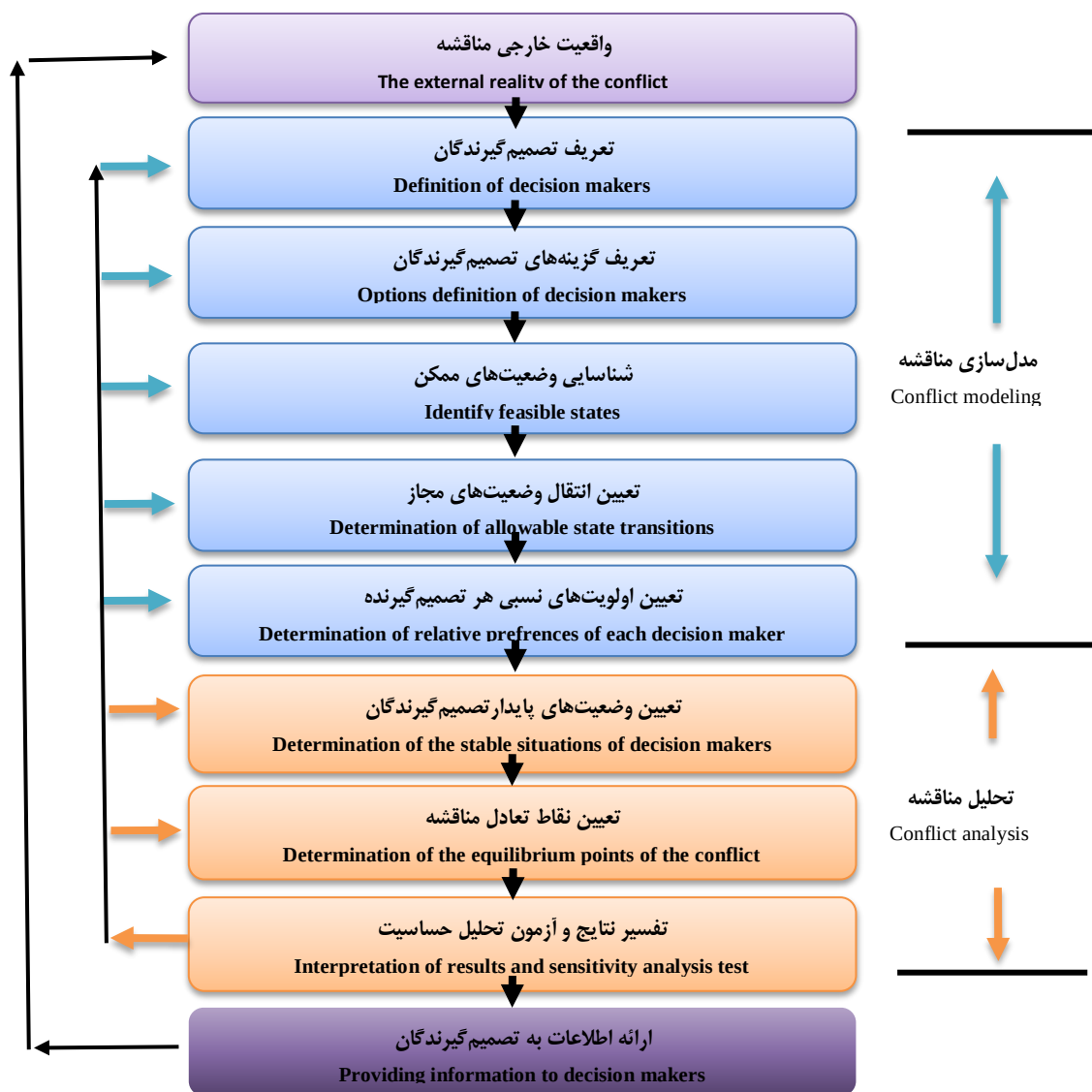
از رایج‌ترین مدل‌ها که به‌طور فراوان در بررسی مسائل حل اختلاف با دیدگاه غیرهمکارانه بررسی شده‌است، راه‌حل ارائه شده توسط Nash Jr, 1950 است. از این تعریف تعادل نمی‌توان به‌صورت جامع در تمام زمینه‌ها استفاده کرد (Madani and Hipel, 2011). تعاریف نوینی که بتوان دیدگاه بازتری به مسائل اختلاف داشت و به عبارتی تعمیم‌یافته‌ی تعادل نش باشد، ارائه شده‌است، که از جمله آن‌ها می‌توان به تعادل‌های Non-Limited-move stability, SEQ, SMR, GMR, Myopic Stability اشاره کرد. همچنین جریان مراحل پژوهش در شکل ۳ نمایش داده شده است.

روش انجام پژوهش

آگاهی از تاریخچه مناقشه، برای مدل‌سازی آن، به‌جهت تعیین مهم‌ترین بازیکنان بازی، گزینه‌ها، راهبردها و اولویت هر کدام از بازیکنان اهمیت ویژه‌ای دارد. باتوجه به گستردگی موضوع مناقشه منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی در تحقیق حاضر، لیستی مشتمل بر ۱۹ بازیکن مرتبط با حوزه توسعه اراضی کشاورزی (دادستان، استانداری،



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز نازلوچای
Figure 1- The location of the Nazloo-chay basins



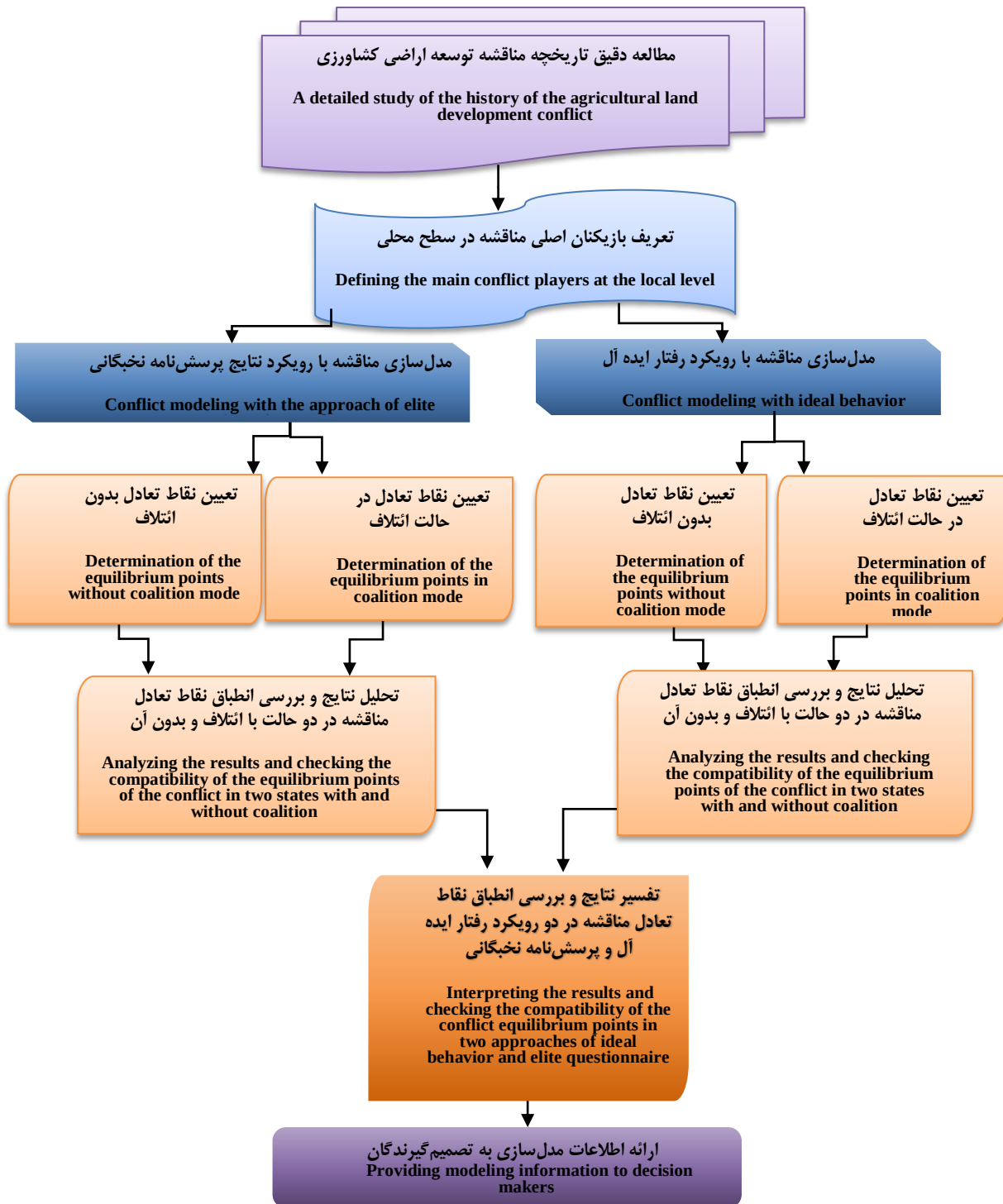
شکل ۲- فرآیند حل مناقشه در GMCR (Fang et al., 1993)

Figure 2- Conflict resolution process in GMCR (Fang et al., 1993)

مدیر و مدیر عامل و کارشناسان دفتر حفاظت و بهره‌برداری شرکت آب منطقه‌ای و اساتید دانشگاه و تکمیل پرسش‌نامه نخبگانی صورت پذیرفت. لکن ابتدا اولویت بازیکنان بصورت رفتار ایده‌آل (اهمیت به محیط‌زیست، توسعه پایدار و ترجیح منافع بلند مدت بر کوتاه مدت) در نظر گرفته شده در گام بعدی اولویت‌بندی طبق خروجی پرسش‌نامه نخبگانی و مصاحبه‌های صورت گرفته بر اساس واقعیت‌های میدانی انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

اولویت‌بندی گزینه‌های بازیکنان به‌عنوان داده‌های ورودی GMCR انجام می‌شود. در این قسمت با توجه به سیاست‌های هر بازیکن اولویت‌های نسبی آن، طبق وضعیت‌های موجود تعیین می‌گردد.

نحوه اولویت‌بندی وضعیت‌ها برای هر بازیکن با استناد به مطالعه سیاست‌های کلی آن سازمان در قوانین و اسناد بالادستی موجود، مطالعه گزارشات و شرح جلسات مربوط به کارگروه ممنوعیت توسعه اراضی کشاورزی ستاد احیای دریاچه ارومیه، همچنین مصاحبه با مسئولین ذی‌ربط سازمان‌ها از جمله معاونین قضایی و پیشگیری از وقوع جرم دادگستری، رئیس اداره امور اراضی جهادکشاورزی، مدیر دفتر هیئت



شکل ۳- نمودار جریان مراحل انجام پژوهش
Figure 3- Flow chart of research steps

جدول ۱- بازیکنان، گزینه‌ها و وضعیت پایه در منطقه مورد مطالعه
Table 1- Players, options and basic situation in the studied area

وضعیت پایه Status quo	گزینه‌ها Options	ذی‌نفعان Stakeholders
Y	جلوگیری از بارگذاری جدید بر منابع آبی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) Prevent new loading on water resources (Surface and ground waters)	۱ شرکت آب منطقه‌ای Regional Water Authority
N	اجرای توسعه طرح‌های آبی (ساخت سد، شبکه پایاب، احداث چاه‌های عمیق و بهسازی ایستگاه‌های پمپاژ و...) Implementation of the water projects development (construction of dams, drainage network, construction of deep wells and improvement of pumping stations, etc.)	۲ سازمان جهاد کشاورزی Jihad Agriculture Ministry
N	جلوگیری از توسعه اراضی کشاورزی و حفظ شرایط فعلی (صیانت از توسعه اراضی کشاورزی) Preventing the agricultural lands development and maintaining the current conditions (Protection of agricultural lands)	۳ دادگستری Justice
N	توسعه سطح زیر کشت اراضی کشاورزی Development of the cultivated area of agricultural lands	۴ کشاورز سودجو Profiteering Farmer
N	اعطای حکم قضایی Issue judicial order	۵ کشاورز سودجو Profiteering Farmer
Y	توسعه اراضی برای کشاورزی Development of agriculture land	۶ کشاورز سودجو Profiteering Farmer

استراتژی‌های بازیکنان مناقشه

بازیکن شرکت آب منطقه‌ای: اساسنامه شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان غربی بیان می‌کند که موضوع فعالیت شرکت عبارت است از شناخت، مطالعه، توسعه، حفاظت، بهره‌برداری بهینه از منابع آب، ایجاد، توسعه، بهره‌برداری و نگهداری از تأسیسات و سازه‌های آبی در چارچوب تکالیف مندرج در قوانین و مقررات مربوط و سیاست‌های وزارت نیرو می‌باشد (مصوبه هیئت وزیران، ۱۳۸۲). با فرض رفتار ایده‌آل، مطابق جدول ۳ وضعیت‌های ۱۲، ۵ و ۱۰ ارجح‌ترین اولویت آب منطقه‌ای و ۳، ۷ و ۹ کم‌ترین ارجحیت را داشته است.

بازیکن جهاد کشاورزی: طبق شرح وظایف سازمان جهاد کشاورزی استان‌ها (مصوبه هیئت وزیران، ۱۳۸۱) وظایف این سازمان بطور کلی می‌توان به محورهای زیر خلاصه نمود:

۱- بررسی و شناخت امکانات و استعدادها بالقوه و بالفعل منابع و عوامل تولید بخش کشاورزی (زراعت، باغبانی، آب و خاک، دام، طیور و آبزیان و توسعه روستایی و عشایری و منابع طبیعی) در سطح استان و مسائل و مشکلات فنی، اقتصادی و اجتماعی مربوط به آن‌ها.

۲- تهیه، تدوین و اجرای طرح‌های جامع مربوط به افزایش تولید محصولات کشاورزی و دامی و کاهش ضایعات در سطح استان بر اساس قوانین و مقررات مربوط. با فرض رفتار ایده‌آل، مطابق جدول ۳ وضعیت‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۱ ارجح‌ترین اولویت جهاد کشاورزی و ۷، ۸ و ۹ کم‌ترین ارجحیت را داشته است.

بازیکن دادگستری: براساس اصل ۱۵۶ قانون اساسی، قوه قضاییه قوه‌ای است مستقل که پشتیبان حقوق فردی و اجتماعی و مسئول تحقق بخشیدن به عدالت است. اولویت سازمانی دادگستری، با

توجه به سیاست‌های اخیر اتخاذ شده توسط آن دستگاه، عدم تشکیل پرونده و پیش‌گیری از وقوع جرم و تخلف می‌باشد. لذا این نهاد قضایی تأکید دارد که نهادهای اجرایی حتماً مقذور از ظرفیت‌های قانونی خود برای جلوگیری از وقوع جرم و تخلف استفاده نمایند. همچنین در مواردی که قانون اختیار داده است، بعنوان ضابطین قضایی بطور مستقیم ورود کرده و مسائل مربوطه را حل نمایند. با فرض رفتار ایده‌آل، مطابق جدول ۳ وضعیت‌های ۵، ۱۲ و ۲ ارجح‌ترین اولویت دادگستری و ۱، ۳ و ۷ بصورت مشترک و ۹ کم‌ترین ارجحیت را داشته است.

بازیکن کشاورز سودجو: معرف کشاورزان محلی و افراد بعضاً غیر محلی سودجو می‌باشند. که بصورت کلی در صدد افزایش مساحت زمین خود و ورود به حریم بستر رودخانه و یا تصرف اراضی ملی جهت توسعه کشاورزی و یا به دنبال آبیاری زمین دیم خود می‌باشند و همچنین افراد سودجویی که در سطح وسیع‌تر و مهندسی‌شده‌تر بصورت کاملاً تجاری، اقدام به توسعه اراضی جهت کشاورزی می‌نمایند. که در این مناقشه این بازیکن را کشاورز سودجو می‌نامیم.

نتایج و بحث

از بین گزینه‌های موجود بین بازیکنان، ۴ حالت به علت تضاد بعنوان وضعیت غیر ممکن تشخیص داده شد:

۱- شرکت آب منطقه‌ای بصورت هم‌زمان به فکر توسعه مصرف و جلوگیری از بارگذاری جدید بر منابع آب باشد.

۲- سازمان جهاد کشاورزی بصورت هم‌زمان به فکر جلوگیری از توسعه کشاورزی و اجرای طرح‌های توسعه کشاورزی باشد.

۳- کشاورز سودجو توسعه دهنده مستقل از هر تصمیمی که ادارات

دی‌مدخل می‌گیرند، توسعه اراضی جهت کشاورزی انجام ندهد.

۴- دادگستری بدون اینکه سازمان‌های آب منطقه‌ای و جهاد کشاورزی اقدام به جلوگیری از برداشت غیرمجاز آب و صیانت از اراضی نماید، حکم قضایی صادر نماید.

با حذف وضعیت‌های ناممکن از مناقشه، ۵۰ وضعیت حذف و ۱۴ وضعیت ممکن باقی‌ماند که در **جدول ۲** قابل مشاهده می‌باشد. همچنین تمامی حرکات بازیکنان بصورت برگشت‌پذیر فرض شده است که به معنی قابلیت برگشت هر بازیکن از حالت Y به حالت N می‌باشد. بعد از تعیین وضعیت‌های پایدار برای هر بازیکن با توجه به اولویت آن بازیکن، در **جدول ۳** تقدم رتبه‌ای وضعیت‌های موجود برای هر بازیکن متناسب با اولویت‌های آن مشخص گردید. ۱۴ حالت ممکن برای هر بازیکن به ترتیب از کمترین اولویت به بیشترین اولویت در حالت رفتار ایده‌آل از سمت چپ به راست در **جدول ۳** نوشته شده است. اعداد ارائه شده شماره وضعیت‌های (حالات) ممکن مناقشه هستند که جزییات این وضعیت‌ها در **جدول ۲** نمایش داده شده است. بعنوان مثال حالت ۵ برای بازیکن دادگستری اولویت اول می‌باشد، به معنی این

است که دادگستری ترجیح می‌دهد شرکت آب منطقه‌ای از بارگذاری جدید بر منابع آبی جلوگیری کرده و توسعه طرح‌های آبی ندهد. سازمان جهاد کشاورزی از اراضی کشاورزی صیانت کرده و توسعه طرح‌های کشاورزی ندهد. دادگستری به پرونده‌های مربوط به توسعه غیرمجاز اراضی حکم قضایی ندهد. کشاورز سودجو توسعه کشاورزی دهد. پژوهش حاضر، نتایج بازی به کمک تعاریف پایداری بازی‌های غیرهمکارانه در مدل گراف مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت و وضعیت‌های پایدار برای هر بازیکن مشخص گردید. در صورتی که تمام بازیکنان نتایج پایداری را بیابند، برای حرکت از مجموعه تصمیمات اتخاذ شده، تمایلی ندارند. بنابراین آن وضعیت یک تعادل نام داشته و می‌تواند یک راه حل ممکن برای اختلاف می‌باشد. در شرایطی که وضعیت برای بازیکن پایدار نباشد، با استفاده از تعاریف پایداری می‌توان پیش‌بینی نمود، چگونه بازیکن استراتژی خود را از آن وضعیت در طی مسیر تغییر می‌دهد (Zarezadeh et al., 2016).

جدول ۲- وضعیت‌های باقی‌مانده در مناقشه توسعه اراضی کشاورزی

Table 2- Remaining situations in the agricultural land development conflict

ذی‌نفعان Stakeholders	گزینه‌ها Options	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
شرکت آب منطقه‌ای Regional Water Authority	جلوگیری از بارگذاری جدید بر منابع آب Prevent new loading on water resources	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
	توسعه طرح‌های آبی Development of water projects	N	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N	N	N	Y	N
سازمان جهاد کشاورزی Jihad Agriculture Ministry	صیانت از اراضی کشاورزی Protection of agricultural lands	N	N	N	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	
	توسعه طرح‌های کشاورزی Development of agriculture projects	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	Y
دادگستری Justice	صدور حکم قضایی Issue judicial order	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y
کشاورز سودجو Profiteering Farmer	توسعه اراضی برای کشاورزی Development of agricultural land	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y

جدول ۳- اولویت‌بندی وضعیت‌های ممکن مناقشه منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی

Table 3- Prioritization of possible situations of water resource conflict in agricultural land development

ذی‌نفعان Stakeholders	کمترین اولویت Lowest Priority														بیشترین اولویت Highest Priority
شرکت آب منطقه‌ای Regional Water Authority	9	7	3	1	6	4	11	13	8	2	14	10	5	12	
سازمان جهاد کشاورزی Jihad Agriculture Ministry	9	8	7	14	3	1	2	4	5	10	6	11	13	12	
دادگستری Justice	9	7	3	1	8	6	13	14	11	10	4	2	12	5	
کشاورز سودجو Profiteering Farmer	12	5	11	10	14	13	2	4	6	8	3	7	1	9	

۲ برای بازیکنان شناسایی شده است. در این بین، حالت ۵ تنها وضعیتی است که بر اساس ۶ تعریف پایداری برای تمامی بازیکنان پایدار هستند. از سوی دیگر، با توجه به اینکه اولویت وضعیت‌های مناقشه برای هر یک از بازیکنان یکسان نیستند. لذا برای گزینش محتمل‌ترین نتایج مناقشه، بایستی از بین نقاط تعادل مناقشه، وضعیت‌هایی را که دارای اولویت بیشتری برای بازیکنان هستند بعنوان جواب‌های قابل قبول این مناقشه معین نمود. در شکل ۴ نیز Pay Off وضعیت‌های ممکن برای هر بازیکن و نتایج نقاط تعادل با تعاریف شش‌گانه پایداری ارائه گردیده است.

جدول ۴ نقاط تعادل مناقشه منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی را نشان می‌دهد. همچنین در **جدول ۵** میزان اولویت هر نقطه‌ی تعادل برای بازیکنان نشان داده شده است. که در این میان، ستون‌هایی که دارای بیشترین تعداد Y هستند مربوط به قوی‌ترین تعادل‌ها با بیشترین پایداری، که در ۶ تعریف پایداری (SIM، SEQ، SMR، GMR، Nash(R و SEQ-SIM) غیرهمکارانه به پایداری رسیده و در آن حالت به‌طور همزمان برای هر چهار بازیکن این پایداری‌ها وجود دارد. بعد از تعیین وضعیت‌های پایدار برای هر بازیکن بر مبنای تعاریف پایداری معین شده، نقاط تعادل بازی مشخص شد. چنانچه ملاحظه می‌شود، در مجموع، ۴ نقطه‌ی تعادل، شامل وضعیت‌های ۵، ۱۲، ۱۰ و

جدول ۴- نقاط تعادل مناقشه‌ی منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی

Table ۴- Equilibrium points of water resource conflict in agricultural land development

نقاط تعادل Equilibrium Points	اولویت Priority			
	5	10	12	2
اولویت وضعیت برای شرکت آب منطقه‌ای Status priority of Regional Water Authority	2	3	1	5
اولویت وضعیت برای سازمان جهاد کشاورزی Jihad Agriculture Ministry Status priority of	6	5	1	8
اولویت وضعیت برای دادگستری Justice Status priority of	1	5	2	3
اولویت وضعیت برای کشاورز سودجو Status priority of Profiteering Farmer	13	12	14	8

جدول ۵- میزان اولویت و ارجحیت نقاط تعادل مناقشه برای هر یک از ذی‌نفعان

Table 5- The amount of priority of the conflict Equilibrium points in stakeholders

نقاط تعادل Equilibrium Points	استراتژی‌ها Strategies	بازیکنان Players			
		5	10	12	2
شرکت آب منطقه‌ای Regional Water Authority	جلوگیری از بارگذاری جدید بر منابع آب Prevent new loading on water resources	Y	Y	Y	Y
	توسعه طرح‌های آبی Development of water projects	N	N	N	N
سازمان جهاد کشاورزی Jihad Agriculture Ministry	صیانت از اراضی کشاورزی Protection of agricultural lands	Y	N	Y	N
	توسعه طرح‌های کشاورزی Development of agriculture projects	N	N	N	N
دادگستری Justice	صدور حکم قضایی Issue judicial order	N	Y	Y	N
کشاورز سودجو Profiteering Farmer	توسعه اراضی برای کشاورزی Development of agriculture land	Y	Y	Y	Y
تعداد پایداری بر اساس تعاریف تعادل غیرهمکارانه Stability number based on non-cooperative equilibrium definitions		6	2	2	2

تعداد وضعیت‌ها شماره وضعیت‌ها	Ordered Decimal	Filter	1 32	2 33	3 34	4 36	5 37	6 38	7 40	8 41	9 42	10 49	11 52	12 53	13 54	14 57
1 - Regional water c شرکت آب منطقه‌ای	جلوگیری از برداشت غبی Implementation of the water توسعه طرح های آبی Prevent new loading on water	-	N	Y	N	N	Y	N	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
2 - Agricultural Org سازمان جهاد کشاورزی	توسعه سطح زیر کشت ار Development of the cultivated جلوگیری از توسعه ارا Preventing the agricultural	-	N	N	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	Y	Y	Y	N
3 - Justice organiza دادگستری	اعطای حکم قضایی Issue judicial order	-	N	N	N	N	N	N	N	N	N	Y	Y	Y	Y	Y
4 - Profiteering Far کشاورز سودجو	توسعه اراضی برای کشا Development of agriculture land	-	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Payoff For:	Regional water compa	-	4	10	3	6	13	5	2	9	1	12	7	14	8	11
Payoff For:	Agricultural Organiz	-	7	8	6	8	9	11	4	3	2	10	12	14	13	5
Payoff For:	Justice organization	-	5	12	4	11	14	6	4	6	3	10	9	13	7	8
Payoff For:	Profiteering Farmer	-	13	7	11	8	2	9	12	10	14	4	3	1	6	5
	Nash	-					Y									
	GMR	-		Y			Y					Y		Y		
	SEQ	-					Y									
	SIM	-					Y									
	SEQ & SIM	-					Y									
	SMR	-		Y			Y					Y		Y		

شکل ۴- نتایج ۶ معیار پایداری برای وضعیت‌های نقاط تعادل مناقشه‌ی منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی

Table 4- The Results of 6 stability criteria for the states of Equilibrium points of water resource conflict in agricultural land development

بررسی نتایج حاصل از تکمیل پرسش‌نامه‌های نخبگانی

لازمه تحلیل مناقشه با GMCR+ مدل‌سازی صحیح آن و وارد کردن منطقی اولویت‌ها بر اساس خصوصیات، ویژگی‌ها و سیاست‌های هر بازیکن و باتوجه تاریخچه مناقشه است. اگر ورودی‌های نرم‌افزار صحیح نباشد با وجود پیچیدگی‌های محاسباتی، جواب‌های حاصل نامعتبر خواهد بود. به‌منظور اطمینان از خروجی‌های مناقشه، پس از حذف وضعیت‌های نشدنی، پرسش‌نامه‌ای مشتمل بر ۱۴ وضعیت ممکن در مناقشه که در **جدول ۲** به آن اشاره شده است، تدوین و توسط کارشناسان و صاحب‌نظران شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی و دادگستری تکمیل شد. تقدم و تاخر رتبه‌ای هر کدام از این وضعیت‌ها با استخراج فراوانی هر کدام از آیتم‌های ۱۴ گانه از نظر جامعه مذکور انجام شده و پس از مشخص‌شدن اولویت‌های مد نظر هر بازیکن، مدل‌سازی مجدد مناقشه از طریق اولویت‌های جدید انجام و نتایج بررسی گردید. تعداد تعادل‌های مناقشه این حالت ۷ مورد است. وضعیت‌های تعادل شامل وضعیت‌های ۱۲، با تعداد ۶ تعریف پایداری و وضعیت‌های ۱۰، ۱۱، ۵، ۳، ۱۳، ۱۴ با تعداد ۲ وضعیت تعادل برای بازیکنان شناسایی شده‌است. در این بین، حالت ۱۲ تنها وضعیتی است که بر اساس ۶ تعریف تعادل برای تمامی بازیکنان پایدار می‌باشد.

بررسی وضعیت‌های تعادل در صورت ائتلاف

لزوم هماهنگی کافی جهت اقدام یکپارچه برای حل مناقشه بمنظور هم‌افزایی دستگاه‌های اجرایی و قضایی برای اثرگذاری هرچه بیشتر در دنیای واقعی، یک امر بدیهی است. یکی از امکانات نرم‌افزار GMCR+ بررسی و مدل‌سازی مناقشه در حالت ائتلاف بازیکنان می‌باشد. حالت ائتلاف به این معنی است که بازیکنان ائتلاف، برای رسیدن به نقاط تعادل با حرکت‌های خود منجر به تضرر سایر بازیکنان در ائتلاف نخواهند شد. فرض شد که شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی و دادگستری در یک ائتلاف باشند. پس از ائتلاف این بازیکنان در مجموع، ۲ نقطه‌ی تعادل، شامل وضعیت‌های ۵ و ۱۲ برای بازیکنان شناسایی شد. همانطور که مشاهده می‌شود این دو وضعیت بر اساس ۶ تعریف تعادل برای تمامی بازیکنان پایدار هستند. از سوی دیگر، با وجود اینکه اولویت وضعیت‌های مناقشه برای هر یک از بازیکنان یکسان نیستند، وضعیت‌های حاصل جزء اولویت‌های نخست بازیکنان ائتلاف می‌باشد. نقاط ۵ و ۱۲ در حالت بدون ائتلاف نیز جز وضعیت‌های تعادل مناقشه منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی محسوب می‌شدند، لذا می‌توان نتیجه گرفت این دو وضعیت محتمل‌ترین حالت برای وقوع و حل این مناقشه در دنیای واقعی می‌تواند باشد.

بررسی وضعیت‌های تعادل در صورت ائتلاف با اولویت‌های

پرسش‌نامه نخبگانی

برای بررسی و اطمینان بیشتر از خروجی‌های مناقشه منابع آبی توسعه اراضی کشاورزی، این بار حالت ائتلاف بین ۳ بازیکن (شرکت آب منطقه‌ای، سازمان جهاد کشاورزی و دادگستری) برگرفته از اولویت‌های پرسش‌نامه نخبگانی امتحان شد. در این حالت صرفاً یک وضعیت بعنوان نقطه تعادل مناقشه معرفی شد. وضعیت ۱۲ تنها وضعیت تعادل با استفاده از ۶ مفهوم تعادل برای تمامی بازیکنان مناقشه می‌باشد که در اولویت اول هر سه بازیکن در ائتلاف می‌باشد. در وضعیت ۱۲، شرکت آب منطقه‌ای از بارگذاری جدید بر منابع آبی جلوگیری کرده و توسعه طرح‌های آبی نمی‌دهد. سازمان جهاد کشاورزی از اراضی کشاورزی صیانت کرده و توسعه طرح‌های کشاورزی نمی‌دهد. دادگستری به پرونده‌های مربوط به توسعه غیرمجاز اراضی حکم قضایی می‌دهد. کشاورز سودجو توسعه کشاورزی می‌دهد. این وضعیت در اولویت اول بازیکنان داخل ائتلاف و اولویت آخر کشاورز سودجو می‌باشد.

نتایج حاصل از نقاط تعادل مناقشه و تحلیل مناقشه منابع

آب توسعه اراضی کشاورزی

- ✓ وضعیت ۵ در حالت ایده‌آل با ۶ تعریف تعادل بازی غیر همکارانه: SIM, SIM & SEQ, SEQ, SMR, GMR, Nash(R) برای تمامی ذی‌نفعان پایدار است.
- ✓ وضعیت‌های ۱۲، ۱۰ و ۲ در حالت ایده‌آل تنها بر اساس دو تعریف GMR و SMR پایدار است.
- ✓ وضعیت ۵ و ۱۲ در حالت ایده‌آل ائتلاف با ۶ تعریف تعادل بازی غیر همکارانه: SIM, SIM & SEQ, SEQ, SMR, GMR, Nash(R) برای تمامی ذی‌نفعان پایدار است.
- ✓ وضعیت ۱۲ در حالت تکمیل اولویت‌های با نتایج پرسش‌نامه نخبگانی، با ۶ تعریف تعادل بازی غیر همکارانه: SIM, SIM & SEQ, SEQ, SMR, GMR, Nash(R) برای تمامی ذی‌نفعان پایدار است.
- ✓ وضعیت‌های ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۴ و ۴ و ۵ در حالت تکمیل اولویت‌های با نتایج پرسش‌نامه نخبگانی، بر اساس دو تعریف GMR و SMR پایدار است.
- ✓ فقط وضعیت ۱۲ در حالت پرسش‌نامه نخبگانی ائتلاف، با ۶ تعریف تعادل بازی غیر همکارانه: SIM, SIM & SEQ, SEQ, SMR, GMR, Nash(R) برای تمامی ذی‌نفعان پایدار است.

یکی از نتایج مدل به‌عنوان نقطه‌ی تعادل در حالت ایده‌آل، وضعیت موجود و پایه یعنی حالت ۲ می‌باشد؛ به این معنی که پیش‌بینی شرایط

فعلی مناقشه توسط مدل در حل مناقشه با GMCR دلیلی بر انطباق مدل با تعاملات ذی‌نفعان و وضع موجود می‌باشد. وضعیت ۵ در حالت ایده‌آل با ۶ تعریف تعادل بازی غیرهمکارانه وضعیت تعادل می‌باشد. وجود این وضعیت بعنوان نقطه تعادل به معنی این است که سهم اصلی و تاثیر اصلی بر مناقشه از جانب شرکت آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی می‌باشد. دادگستری در وهله اول و قوی‌ترین وضعیت تعادل حالت ایده‌آل اقدام به صدور حکم نکرده است که به معنی تمایل دادگستری به مرتفع شدن مناقشه از طرف سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای می‌باشد. وضعیت ۵ در حالت ایده‌آل می‌تواند بیانگر این باشد که دادگستری طبق سیاست‌گذاری اخیر خود مبنی بر عدم تشکیل پرونده و رجوع شکایات به دادگستری، با تقویت اقداماتی در راستای پیش‌گیری از وقوع جرم، تمایل دارد در این مناقشه نقش ایفا نماید.

طبق نتایج وضعیت‌های تعادل در حالت تکمیل اولویت‌ها توسط نتایج پرسش‌نامه نخبگانی، همچنین نتایج وضعیت‌های تعادل ائتلاف‌ها در حالت‌های ایده‌آل و حالت نتایج پرسش‌نامه، وضعیت ۱۲ دارای پایداری با ۶ مفهوم حل و همچنین دارای بالاترین اولویت برای بازیکنان چه در حالت ایده‌آل و چه در حالت نتایج پرسش‌نامه‌ای می‌باشد. این امر نشان‌گر اهمیت بالای این وضعیت و نقش مهم آن در رسیدن به تعادل در این مناقشه می‌باشد.

نتیجه‌گیری

طی چندین سال اخیر با وجود ممنوعیت‌های اعمال شده، حوضه دریاچه ارومیه شاهد افزایش سطح زیر کشت محصولات پرآب‌بر، تغییر کاربری اراضی دیم به آبی و تغییر کاربری اراضی کشاورزی به مسکونی شده است. در بحث، پیرامون نقاط تعادل باید در نظر داشت که برای جواب مناقشه و راه‌حل پیشنهادی فقط پایداری نقاط را نباید در نظر گرفت بلکه باید به این نکته که آن حالت از نظر اولویت برای ذی‌نفعان چه وضعیتی دارد را نیز بررسی کرد. با توجه به آنچه گفته شد و نتایج خروجی حاصل از مدل‌سازی مناقشه توسط مدل GMCR+ می‌توان بهترین جواب و راه‌حل مناقشه را وضعیت‌های ۱۲ و ۵ دانست که برای ۳ بازیکن (سازمان جهاد کشاورزی، شرکت آب منطقه‌ای و دادگستری) جزء نخستین اولویت‌ها بوده و فقط برای کشاورز سودجو جزء اولویت‌های ابتدایی نمی‌باشد که علت این امر نیز ترجیح دادن منفعت شخصی و سودجویی بر منافع کل حوضه آبریز می‌باشد. وجود وضعیت ۵ بعنوان نقطه تعادل به معنی این است که سهم اصلی و تاثیر اصلی بر مناقشه از جانب شرکت آب منطقه‌ای و سازمان جهاد کشاورزی می‌باشد. دادگستری در وهله اول و قوی‌ترین وضعیت تعادل حالت ایده‌آل اقدام به صدور حکم نکرده است که به معنی تمایل دادگستری به مرتفع شدن مناقشه از طرف سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای

اراضی مبادرت خواهد ورزید.

مطابق اصل بازی فرار مالیاتی (Pastine et al., 2017) اگر توسعه اراضی هیچ پیامد اخلاقی و مالی برای کشاورز سودجو نداشته باشد و افراد سودجو بدانند که نهادهای صیانت کننده هیچ گاه هزینه بسیار زیاد جهت جلوگیری و مبارزه کامل با توسعه اراضی کشاورزی غیر مجاز نخواهند کرد، با توجه به درآمد زایی این قضیه و ایجاد جایگاه اجتماعی برای فرد، کشاورز سودجو همواره و در هر وضعیتی از مناقشه، دست به توسعه غیر مجاز خواهند زد. به همین خاطر تمامی وضعیت‌ها برای کشاورز سودجو وضعیتی پایدار می‌باشند. بنظر می‌رسد ایجاد بستر و شرایطی که کشاورز سودجو در آن شرایط خود اقدام به توسعه اراضی کشاورزی نداده و یا به خاطر صیانت‌های نهادهای دولتی اقدام به توسعه اراضی ندهند، بسیار قابل تامل، موثر و راه‌گشا می‌تواند باشد.

می‌باشد. وضعیت ۵ در حالت ایده‌آل می‌تواند بیانگر این باشد که دادگستری طبق سیاست‌گذاری اخیر خود مبنی بر عدم تشکیل پرونده و رجوع شکایات به دادگستری، با تقویت اقداماتی در راستای پیش‌گیری از وقوع جرم، تمایل دارد در این مناقشه نقش ایفا نماید. در وضعیت‌های تعادل حالت ایده‌آل، شرکت آب منطقه‌ای نقش صیانتی خود از بارگذاری جدید بر منابع آبی از آب‌های سطحی و زیر زمینی حفظ کرده و از توسعه طرح‌های آبی ممانعت کرده است که این امر نشان‌دهنده اهمیت نقش این بازیکن در رساندن مناقشه به نقطه تعادل، حتی بدون ورود مستقیم دادگستری و یا همکاری جهاد کشاورزی می‌باشد. نتایج حاصل نشان می‌دهد دادگستری در صورت ائتلاف و همکاری با دو بازیکن موجود در ائتلاف علاوه بر نقش و تمایل خود به پیش‌گیری از وقوع جرم، در عمل به صدور حکم قضایی برای متخلفین جهت جلوگیری از توسعه

منابع

1. Bahrini, A., Riggs, R.J., & Esmaeili, M. (2021). In common resource conflicts, social choice rules, fallback bargaining, and related games. *Journal of Hydrology*, 602, 126663. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126663>
2. Danesh Yazdi, M., Abrishamchi, A., & Tajrishy, M. (2014). Conflict resolution of water resources allocations using the game theoretic approach: the case of Orumieh river basin. *Journal of Water and Wastewater; Ab va Fazilab*, 25(2), 48-57 (In Persian).
3. Fang, L., Hipel, K.W., & Kilgour, D.M. (1993). *Interactive decision making: the graph model for conflict resolution* (Vol. 11). John Wiley & Sons.
4. Farajzadeh Arnesa, M., Mianabadi, H., & Bagheri, A. (2020). Rethinking concepts and approaches to face water conflicts. *Iran-Water Resources Research*, 16(4), 205-224. <https://sid.ir/paper/388143/fa>
5. FAO, F. (2018). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, URL: <http://faostat.fao.org>.
6. Han, Z., Niyato, D., Saad, W., Başar, T., & Hjørungnes, A. (2012). *Game theory in wireless and communication networks: theory, models, and applications*. Cambridge university press.
7. Kangabam, R.D., Selvaraj, M., & Govindaraju, M. (2019). Assessment of land uses land cover changes in Loktak Lake in Indo-Burma Biodiversity Hotspot using geospatial techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 22(2), 137-143. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.04.005>
8. Madani, K. (2010). Game theory and water resources. *Journal of Hydrology*, 381(3-4), 225-238. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.045>
9. Madani, K., & Hipel, K.W. (2007). *Strategic insights into the Jordan River conflict*. In World Environmental and Water Resources Congress 2007: Restoring Our Natural Habitat (pp. 1-10).
10. Madani, K., & Hipel, K.W. (2011). Non-cooperative stability definitions for strategic analysis of generic water resources conflicts. *Water Resources Management*, 25, 1949-1977.
11. Moghaddam, H.K., Javadi, S., Randhir, T.O., & Kavehkar, N. (2022). A multi-indicator, non-cooperative game model to resolve conflicts for aquifer restoration. *Water Resources Management*, 36(14), 5521-5543.
12. Nash Jr, J.F. (1950). The bargaining problem. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 155-162. <https://doi.org/10.2307/1907266>
13. Nikoo, M.R. (2008). *Formulation of a non-deterministic phase model for trading pollution discharge permits in rivers*. Master Thesis in Civil Engineering, Tehran University, Tehran. (In Persian with English abstract)
14. Nourollahi, M., Ziaei, A.N., & Davary, K. (2021). Proposing an optimal strategy in water allocation using non-cooperative game theory. *Iran-Water Resources Research*, 17(1), 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.iwrr.2021.10.011>
15. Ostrom, E., Gardner, R., Walker, J., & Walker, J. (1994). *Rules, games, and common-pool resources*. University of Michigan Press.
16. Pastine, I., Tuvana Pastine, T., & Humberstone, T. (2017). *Introducing Game Theory - A Graphic Guide*. Icon Books, Ltd, Omnibus Business Centre, 39-41 North Road, London, N7 9DP.
17. Rêgo, L.C., da Silva Costa, J.P., de Castro Cardoso, G.C., & dos Santos, C.V. (2021). A graph model analysis of the conflict in the irrigated perimeter in Chapada do Apodi-Brazil. *Environmental Challenges*, 4, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100124>
18. Safaee, A., & Malek Mohammadi, B. (2014). Game theoretic insights for sustainable common pool water resources

- governance (Case study: Lake Urmia water conflict). *Journal of Environmental Studies*, 40(1), 121-138.
19. Vasef, M., Khalili, K., Rezaie, H., & Fatollahzadeh Attar, N. (2020). *Ranking of the criteria to prevent indiscriminate land development with the help of Fuzzy Hierarchy Analysis (FAHP) technique*. The second international congress of agricultural engineering, natural resources and environment, Tehran, <https://civilica.com/doc/1127806/>.
20. Zarezadeh, M., Morid, S., Fatemi, F., & Madani, K. (2016). The strategic cooperation between Iran and Afghanistan in the Helmand basin is to allocate more water to the environment and control opium cultivation using the game theory approach.
21. Zeinalzadeh, K., & Esmailnezhad, R. (2017). Report on the study and monitoring of the set of actions of the executive bodies in the implementation of the resolution "Prohibiting any increase in cultivated area (land development) and water-rich crops in the catchment area of Lake Urmia and preventing new development in the agriculture and natural resources sector". Urmia lacks Research Institute. P.75.
22. Zoghi, M., Safae, A., & Malekmohammadi, B. (2014). Insights on game theory in conflict analysis of land use change (Case study: Tehran Dar Abad land area). *Geographical Urban Planning Research (GUPR)*, 2(3), 391-407. <https://doi.org/10.22059/JURBANGEO.2014.53064>



Investigation on Phytoremediation Capability of Artiplex (*Atriplex* sp.) and Oleander (*Nerium oleander*) in Aradkooh Landfill for Cadmium and Lead

M. Rafati^{1*}, M. Malekzade², M. Firoozi³

Received: 23-02-2023

Revised: 06-06-2023

Accepted: 23-06-2023

Available Online: 24-06-2023

How to cite this article:

Rafati, M., Malekzade, M., & Firoozi, M. (2023). Investigation on phytoremediation capability of Artiplex (*Atriplex* sp.) and Oleander (*Nerium oleander*) in Aradkooh landfill for cadmium and lead. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 547-560. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81321.1256>

Introduction

Increasing industrial activities with the production of pollutants, including heavy metals, is one of the serious problems of modern communities, which has led to their accumulation in the environment. Heavy metals are also one of the important pollutants in landfill leachate. Plants and soil near the landfill may be contaminated by the leachate. Landfilling is the oldest method of solid waste disposal which can be a threat to the environment and health. Due to its easy operation and cost-effective, landfill is the most widely used method of municipal solid waste disposal in the world. Pollution cleaning technologies to reduce the harmful effects in the locations contaminated with heavy metals can be done by physical, chemical and biological methods. Phytoremediation, as a biological method, uses the green plants to extract, sequester, and detoxify pollutants. This method is a low-cost technique, environmentally friendly, and due to the non-production of by-products, is non-destructive for natural ecosystems. Considering the high moisture of wastes in Iran and their potential to produce leachate, as well as the possibility of contamination of water and soil in the landfill, especially with heavy metals, this study was conducted with the aim of evaluating the accumulation of lead (Pb) and cadmium (Cd) heavy metals in the soil, shoots and roots of artiplex (*Atriplex* sp.) and oleander (*Nerium oleander*) plants in Aradkooh landfill of Tehran.

Materials and Methods

This study was conducted in Aradkooh landfill which is located in the south of Tehran in the Kahrizak region. About 5200 tons of municipal solid waste were sent to this landfill every day. A part of the solid waste in Aradkooh was placed in various processes to energy and compost, and about 2500 tons of the solid waste was landfilled. According to previous reports, it is estimated that 250 cubic meters of leachate are produced daily in the Aradkooh landfill. In the studied landfill, there is an artiplex plant in four areas and a hand-planted oleander in one area. Ten samples of soil, root, and shoot, totaling 120 total were randomly selected from each growing area of the artiplex plant. Oleander shoots and soil were also tested from 10 different plants for a total of 40 samples. Then the levels of Cd and Pb in the soil, roots, and shoots were assessed. In this study, the outcomes were analyzed employing four key indices: the bioconcentration factor (BCF), the translocation factor (TF), the pollution index (PI), and PINemerow. The BCF and TF indices were employed to assess the phytoextraction and phytostabilization capabilities of plants, while the PI and PINemerow methods were used to pinpoint the most environmentally hazardous heavy metal in the soil.

Results and Discussion
According to the results, the concentration of Pb and Cd in shoots of artiplex area 2 (with an average of 19.7 and 5.75 mg/kg, respectively) were significantly higher than in other areas, while the concentration of these metals in root of oleander (with an average of 8.17 and 1.06 for Pb and Cd, respectively) were higher than the shoot. The amount of Pb element in soil of the oleander plant (with an average of 35.13 mg/kg) and Cd in soil of the artiplex

1, 2 and 3- Assistant Professors and M.Sc., Department of Environment, Faculty of Marine Science and Technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: m_rafati@iau-tnb.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.81321.1256](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81321.1256)

area 2 (with an average of 3.78 mg/kg) were significantly higher than other areas. Additionally, the levels of heavy metals in the soil of two plants were higher than the Nemerow index, which indicated high levels of pollution in the sampling areas, but still below the safe levels that was set by national standards (3.9 and 300 mg/kg for Cd and Pb respectively) and the World Health Organization (5 and 40 mg/kg for Cd and Pb, respectively). In addition, bioaccumulation factor of shoot in all growth atriplex areas for Pb and Cd (with an average of 1.44 and 1.3, respectively) were higher than 1.0 while, the root bioaccumulation factors of this plant in any of the growth areas, were not higher than 1.0. In the case of oleander, the shoot and root bioconcentration factors for Pb and Cd were not reported more than one.

Conclusion

In general, it appears that atriplex, a native plant in the Aradkooh landfill, exhibits superior capabilities for absorbing heavy elements compared to oleander. Therefore, atriplex seems well-suited for the extraction of Pb and Cd from the soil, as it can accumulate these metals in its shoots. In contrast, oleander is not well-suited for phytostabilization or phytoextraction of these elements, as it exhibits limited ability to accumulate these heavy metals in its roots and shoots. Consequently, atriplex can be a valuable choice as a resilient species for phytoremediation projects in landfills and areas near mines. It is worth noting that the Pb content in the soil is higher than that of Cd. Although both metals fall within the permissible limits of national and WHO standards, the soil in the Aradkooh landfill is considered to be significantly polluted based on the Nemerow index.

Keywords: *Atriplex* sp., Bioaccumulation factor, *Nerium oleander*, Phytoremediation, Translocation factor

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۴۷-۵۶۰

بررسی قابلیت گیاه‌پالایی آتریپلکس (*Atriplex sp.*) و خرزهره (*Nerium oleander*) در جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در مرکز دفن آرادکوه

مریم رفعتی^۱ - مریم ملک زاده^۲ - مجید فیروزی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۰۲

چکیده

فلزات سنگین یکی از آلاینده‌های اصلی شیرابه زباله هستند که می‌توانند گیاهان و خاک اطراف محل دفن را آلوده نمایند. در این پژوهش به بررسی تجمع فلزات سنگین سرب و کادمیوم در دو گونه گیاهی آتریپلکس (*Atriplex sp.*) و خرزهره (*Nerium oleander*) در مرکز دفن آرادکوه شهر تهران پرداخته شد. در این مرکز، گیاه آتریپلکس به صورت خودرو در چهار منطقه و خرزهره به صورت دست‌کاشت در یک منطقه وجود دارد. از هر منطقه رویش آتریپلکس، ۱۰ نمونه به‌طور تصادفی از ریشه و اندام هوایی و خاک پای گیاه (جمعا ۱۲۰ نمونه) برداشت شد. همچنین از ریشه، ساقه و برگ‌های گیاه خرزهره هر کدام ۱۰ نمونه و ۱۰ نمونه از خاک پای هر گیاه نمونه‌برداری گردید (جمعا ۴۰ نمونه). بر اساس نتایج، غلظت سرب و کادمیوم در اندام هوایی آتریپلکس منطقه ۲ با میانگین به‌ترتیب ۱۹/۷ و ۵/۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم از دیگر مناطق به‌صورت معنی‌داری بیشتر بود و این در حالی است که در گیاه خرزهره میانگین غلظت این فلزات در ریشه (با مقادیر ۸/۱۷ و ۱/۰۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم به‌ترتیب برای سرب و کادمیوم) بیشتر از اندام هوایی بود. میزان تجمع عنصر سرب در خاک پای گیاه خرزهره با میانگین ۳۵/۱۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کادمیوم در خاک آتریپلکس منطقه ۲ با میانگین ۳/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز از دیگر مناطق به‌صورت معنی‌داری بیشتر بود و با اینکه هر دو فلز در محدوده مجاز استانداردهای ملی و سازمان بهداشت جهانی واقع شدند، اما خاک منطقه براساس شاخص Nemerow در وضعیت آلودگی زیاد قرار داشت. همچنین میانگین فاکتور تجمع زیستی اندام‌های هوایی در چهار منطقه رویشی آتریپلکس برای سرب و کادمیوم به‌ترتیب برابر با ۱/۴۴ و ۱/۳ بود، در صورتی که ریشه این گیاه در هیچ یک از مناطق رویشی، ضریب تجمع زیستی بالاتر از ۱ برای فلزات مذکور نداشت. در مورد خرزهره نیز ضریب تجمع زیستی کادمیوم و سرب در اندام هوایی و ریشه بالاتر از ۱ گزارش نشد. به‌طور کلی، می‌توان گفت که آتریپلکس برای استخراج عناصر سرب و کادمیوم از خاک و تجمع این فلزات در اندام‌های هوایی مناسب به نظر می‌رسد. در صورتی که خرزهره برای تثبیت یا استخراج عناصر مذکور مناسب نبوده و قابلیت اندکی برای تجمع فلزات مذکور در ریشه یا اندام هوایی دارد.

واژه‌های کلیدی: آتریپلکس، خرزهره، فاکتور انتقال، فاکتور تجمع زیستی، گیاه‌پالایی

مقدمه

افزایش روزافزون فعالیت‌های صنعتی توأم با تولید آلاینده‌ها از جمله فلزات سنگین یکی از مشکلات جدی و درحال گسترش انسان عصر حاضر است که منجر به تجمع آنها در محیط‌زیست شده است (Marsum et al., 2022). در بین آلودگی‌های ایجاد شده، افزایش تجمع و غلظت فلزات سنگین در خاک یکی از مخرب‌ترین نتایج فعالیت‌های بشر بوده است که باعث کاهش کیفیت خاک، آلودگی محصولات کشاورزی و سفره‌های زیرزمینی شده است (Motuzova et al., 2014). حضور فلزات سنگین در آب و خاک به دلیل سمیت، خطر بالقوه ورود آنها به زنجیره غذایی و تجمع زیستی، همچنین تجزیه ناپذیری و پایداری در طبیعت، تهدیدی بزرگ برای محیط‌زیست و سلامت انسان محسوب می‌گردد (Zahedi Mehrab et al., 2020; et al., 2014).

آلودگی خاک به فلزات سنگین علاوه بر منابع طبیعی، ناشی از فعالیت‌های گوناگون بشر از جمله معدن‌کاوی، ذوب فلزات، استفاده از کودهای شیمیایی در زمین‌های کشاورزی و استفاده از لجن فاضلاب است (Zahedi et al., 2013; Solgi et al., 2021). در این بین مراکز دفن پسماند نیز به‌عنوان یکی از کانون‌های تولید و تجمع فلزات سنگین مطرح هستند که از طریق حضور باتری‌ها، رنگ‌ها، روغن‌ها و محصولات الکتریکی در معرض حضور فلزات سنگینی چون سرب و کادمیوم قرار دارند. طبق نظر آژانس حفاظت از محیط‌زیست امریکا، سرب اولین و کادمیوم هفتمین فلز سنگین آلاینده با اثرات مخرب بر بدن انسان، گیاهان و حیوانات است (Zhang et al., 2021). مهمترین آلودگی مرتبط با سایت‌های دفن پسماند، شیرابه و گاز تولید شده در اثر تجزیه زباله‌های دارای ترکیبات آلی است که در صورت عدم کنترل و نشت به محیط به دلیل اثرگذاری طولانی مدت، حتی صدها سال پس از بسته شدن محل دفن نیز تاثیر منفی آن مشاهده می‌شود (Anjanapriya et al., 2022; Kowsari et al., 2022). ترکیبات موجود در شیرابه زباله از جمله فلزات سنگین، مواد هومیک و نمک‌های آلی و معدنی کلردار از مهم‌ترین آلاینده‌های محیط زیست هستند که اثرات نامطلوبی بر بدن موجودات زنده دارند. بنابراین پالایش شیرابه بسیار ضروری است (Hassan et al., 2021; Anning and Akoto, 2018).

از میان روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کنترل آلاینده‌ها، گیاه‌پالایی به عنوان تکنولوژی سبز، قادر به حذف و تغییر شکل طیف گسترده‌ای از آلاینده‌های فلزات سنگین شیرابه و خاک با کمترین هزینه بوده که در مقایسه با سایر روش‌های فیزیکی و شیمیایی به علت عدم تولید محصولات جانبی، برای اکوسیستم های طبیعی

مخرب نیست (Geravand et al., 2021). در این راستا مطالعات مختلفی در تعیین میزان آلودگی گیاهان موجود در مرکز دفن پسماند به فلزات سنگین صورت گرفته است. شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2022) با مطالعه توانمندی گیاه گزنه (*Urtica dioica* L.) در جذب فلزات سنگین از خاکی که با شیرابه محل دفن پسماند آبیاری شده بود، نشان دادند با افزایش غلظت شیرابه، مقدار فلزات سنگین نیکل، سرب و کادمیم در این گیاه افزایش یافته و اندام هوایی توانایی جذب بیشتری نسبت به سایر اندام‌ها دارد. در پژوهشی دیگر، گراوند و همکاران (Gravand et al., 2021) به بررسی میزان جذب فلزات سنگین شیرابه زباله توسط گیاه وتیور (*Vetiveria zizanioides*) از یک خاک آلوده پرداختند که نتایج این تحقیق نشان از بیشتر بودن میزان جذب فلزات سنگین سرب، کادمیم، منگنز و نیکل در ریشه این گیاه داشت. نتایج بررسی ونگدالا و همکاران (Vongdala et al., 2019) بر روی تجمع برخی فلزات سنگین در خاک و گیاهان محل دفن پسماند شهری در لائوس، نشان داد که ساقه و ریشه گیاه ایپوموآ آکواتیکا (*Ipomoea aquatica*) به ترتیب فلزات کادمیم < کروم < سرب < روی در خود انباشته کرده بود. پژوهش واورکا و همکاران (Vaverkova et al., 2014) در بررسی فلزات سنگین کادمیم، کروم، مس، نیکل، سرب و روی توسط گونه‌های گیاهی مختلف در یک منطقه دفن زباله در جمهوری چک نشان داد که گیاهان تاناکتوم و لگره (*Tanacetum vulgare*) و لایکوپیرسکون ایسکلبنتوم (*Lycopersicon esculentum*) دارای محتوی کادمیم بالا در ریشه هستند. همچنین با مطالعه‌ای که بر روی گیاهان آتریپلکس (*Atriplex verucifera*، سالیکورنیا (*Salicornia europaea*) و سلمه تره (*Chenopodium album*) در جذب فلزات سنگین سرب و کادمیم بر روی سه نوع متفاوت خاک شور- سدیمی، آهکی و معمولی انجام شد، مشخص گردید که سالیکورنیا بالاترین انباشت کادمیم و سالیکورنیا و آتریپلکس بالاترین انباشت سرب را در خاک‌های شور- سدیمی داشتند، درحالی که سلمه تره و آتریپلکس عملکرد نسبی بالایی از نظر مقدار ماده خشک تولیدی تحت شرایط آلودگی با کادمیم در خاک معمولی از خود نشان دادند (Hamzenejad et al., 2012; Taghlidabad).

یکی از مراکز دفن زباله‌ی تولید شده در شهر تهران، مجتمع پردازش و دفن زباله آرادکوه در بخش جنوبی کهریزک است. با توجه به ورود روزانه بیش از ۵۲۰۰ تن انواع پسماند به این مجتمع، دفن مستقیم آنها در چند دهه گذشته و خروج شیرابه ناشی از مراکز دفن به حوضچه‌های موجود و لایه‌های زیرین خاک، احتمال دارد که در صورت وجود فلزات سنگین در پسماندهای ورودی، شیرابه ناشی از آنها نیز به

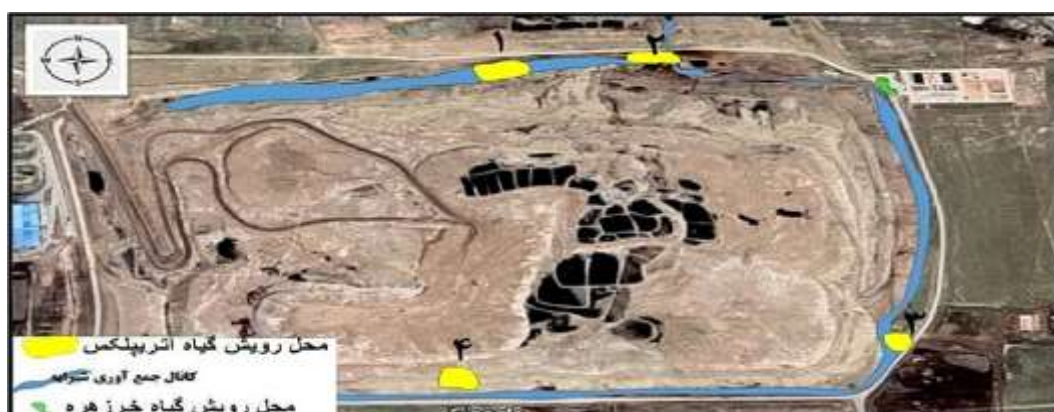
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مجتمع پردازش و دفن زباله آرادکوه از تاسیسات دفع و بازیافت پسماندهای شهر تهران است. این مجتمع در سال ۱۳۳۰ با مساحت حدود ۱۳۰۰ هکتار در بخش کهریزک ساخته شد که در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی در شهرستان ری استان تهران واقع شده است (شکل ۱). طبق گزارش سازمان مدیریت پسماند تهران، روزانه میزان ۵۲۰۰ تن پسماند شهری جهت پردازش و دفع، وارد این مجتمع می‌شود که از این مقدار حدود ۲۵۰۰ تن دفن شده و مابقی وارد فرایندهای دیگری چون تولید کمپوست، زباله سوزی و ... می‌گردد که به صورت تخمینی روزانه حدود ۲۵۰ متر مکعب شیرابه در آرادکوه تولید می‌شود (Pasalari et al., 2019).

در این مجتمع، گیاه آتریپلکس به صورت خودرو در چهار منطقه و خرزهره به صورت دست کاشت در یک منطقه وجود دارد که موقعیت پراکنش آن‌ها در شکل ۱ و مختصات جغرافیایی آن‌ها در جدول ۱ مشخص شده است. فلزات مورد مطالعه در این پژوهش سرب و کادمیوم بودند. نمونه‌برداری از گیاهان و خاک این منطقه به صورت تک مرحله ای در مرداد سال ۱۴۰۰ انجام شد. بدین ترتیب که از هر منطقه رویش آتریپلکس ۱۰ نمونه (Khorami Pour et al., 2019) بطور تصادفی از ریشه، اندام هوایی و خاک پای گیاهان از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر (جمعا ۱۲۰ نمونه) برداشت شد. همچنین از ریشه، ساقه و برگ‌های گیاه خرزهره هر کدام ۱۰ نمونه و ۱۰ نمونه از خاک پای هر گیاه از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری گردید (جمعا ۴۰ نمونه).

این فلزات آلوده باشند. گیاهان موجود در مرکز دفن در صورت انباشت فلزات سنگین موجود در شیرابه در اندام‌های خود بدون نشان دادن علائم مسمومیت، گزینه‌های بسیار مناسبی برای گیاه‌پالایی بوده و می‌توانند در کاهش آلودگی این مناطق موثر واقع شوند (Pasalari et al., 2019). با توجه به سر سبزی و سلامت ظاهری گیاهان موجود در مرکز دفن آرادکوه، احتمال می‌رود که آنها بتوانند میزان قابل توجهی از فلزاتی چون سرب و کادمیوم که در خاک مراکز دفن به وفور یافت می‌شود، را در اندام‌های خود تجمع دهند. در این مرکز، گیاه خودرو آتریپلکس و سالسولا (*Salsola* sp.) و گیاه دست کاشت خرزهره وجود دارد که البته به دلیل پراکنش بیشتر گیاه آتریپلکس به عنوان گونه غالب، این گونه و خرزهره به عنوان گیاهان مورد نظر در پژوهش حاضر انتخاب شدند. آتریپلکس گیاهی علفی از تیره تاج‌خروسان (*Amaranthaceae*) است که در مقابل خشکی، کم آبی و گرمای زیاد مقاوم بوده و در محیط‌های شور به خوبی رشد می‌کند (Ghorbanian et al., 2018). کشت این گیاه خوشخوراک برای تغذیه دام‌ها در شرایط آب و هوایی خاص کشورمان (به خصوص گونه بومی آن)، نتیجه بسیار مطلوب و خوبی دارد (Motamedi et al., 2019). خرزهره درختچه‌ای همیشه سبز و البته سمی از تیره خرزهره‌ایان (*Apocynaceae*) است که بومی مدیترانه بوده و در ایران به دلیل داشتن گل‌های زیبا به عنوان گیاهی زینتی در برخی پارک‌ها و فضاهای سبز به خصوص در جنوب کشور کاشته می‌شود (Alinia, 2022; Nofal et al., 2022). با توجه به به رطوبت بالای زباله‌های موجود در ایران و پتانسیل آنها برای ایجاد شیرابه، استفاده از دفن به عنوان یک روش نسبتاً مناسب و ارزان برای اکثر پسماندهای شهری در ایران و همچنین امکان آلودگی آب و خاک محل دفن به ویژه به فلزات سنگین، پژوهش حاضر با هدف بررسی تجمع فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک، ریشه و اندام هوایی دو گیاه آتریپلکس و خرزهره در مرکز دفن آرادکوه تهران انجام شد.



شکل ۱- محل رویش گیاهان آتریپلکس و خرزهره در مرکز دفن آرادکوه

Figure 1- Growth place of atriplex and oleander in Aradkooh landfill

جدول ۱- موقعیت قرارگیری گیاهان آتریپلکس و خرزهره در مرکز دفن آرادکوه (سیستم مختصات جغرافیایی)

Table 1- Geographic position of Atriplex and Oleander in Aradkooch landfill

مشخصات Characteristic	خرزهره Oleander	آتریپلکس ۱ Atriplex 1	آتریپلکس ۲ Atriplex 2	آتریپلکس ۳ Atriplex 3	آتریپلکس ۴ Atriplex 4
طول جغرافیایی Latitude	530964	530427	529846	531903	531278
عرض جغرافیایی Longitude	3923959	3923378	3923709	3924434	3923581

جدول ۲- برخی ویژگی های خاک مناطق مورد مطالعه

Table 2- Some soil properties of the studied areas

منطقه Area	اسیدیته pH	شوری EC (dS/m)	درصد ماده آلی OM (%)	بافت Texture
آتریپلکس ۱ Atriplex 1	7.7	1.13	7	لوم-رسی Clay loam
آتریپلکس ۲ Atriplex 2	7.4	1.21	8	لوم-رسی Clay loam
آتریپلکس ۳ Atriplex 3	7.4	1.22	9	لوم-رسی Clay loam
آتریپلکس ۴ Atriplex 4	7.4	1.07	8	لوم-رسی Clay loam
خرزهره Oleander	7.5	1.07	8	لوم-رسی Clay loam

اندازه‌گیری غلظت کل فلزات سنگین در نمونه‌های گیاه و خاک

برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های گیاهی و خاک به ترتیب از روش خاکسترخشک (Mahohi *et al.*, 2018) و هضم اسیدی استفاده شد (Gravand *et al.*, 2021). غلظت کل فلزات سنگین مورد مطالعه در عصاره‌های مورد نظر توسط دستگاه جذب اتمی مدل AANALYST 200 قرائت گردید.

محاسبه شاخص‌های گیاهی و خاک

ضریب تجمع زیستی (BCF^۱) برای هر اندام و فاکتور انتقال (TF^۲) برای هر گونه به ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه گردید (Rafati *et al.*, 2018; Gravand *et al.*, 2021)

$$\text{BCF} = \frac{C_{\text{plant}}}{C_{\text{soil}}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$\text{TF} = \frac{C_{\text{Shoot}}}{C_{\text{Root}}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن C_{plant} غلظت فلز در بافت گیاه، C_{soil} غلظت کل فلز در

نمونه‌های گیاهان پس از انتقال به آزمایشگاه شسته شده و ابتدا در فضای باز و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، داخل آون قرارگرفت تا کاملاً خشک شود. در نهایت توسط هاون عقیق کاملاً پودر گردید تا برای هضم آماده گردد. نمونه‌های خاک نیز، ابتدا در هوای آزاد و پس از آن در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون قرار گرفت و از آنک ۲ میلی‌متری رد شد تا برای هضم آماده گردد (Rafati *et al.*, 2018). لازم به ذکر است که ۵ نمونه از خاک هر منطقه نیز جهت تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه ارسال گردید. تعیین بافت خاک به روش هیدرومتری بایکاس، هدایت الکتریکی توسط دستگاه شوری‌سنج، pH به روش گل اشباع و استفاده از دستگاه pH متر انجام شد (Bahrami and Ghorbani, 2016). ماده آلی خاک نیز به روش والکی بلک (Sepahvand *et al.*, 2019) اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۲ آمده است.

- 1- Bioconcentration factor
- 2- Translocation factor

ریشه و در منطقه ۲ رویشی آتریپلکس بیشتر از سایر مناطق بود، در حالی که در ریشه گیاه خرزهره با میانگین ۸/۱۷ میلی گرم بر کیلوگرم بیشتر از اندام هوایی بود (شکل A ۲ و جدول ۴). همچنین نتایج آزمون t نشان داد که غلظت کادمیوم نیز همانند سرب در چهار منطقه رویشی آتریپلکس در اندام‌های هوایی (با میانگین به ترتیب ۲/۵۵، ۵/۷۵، ۲/۱۴ و ۲/۱۸ میلی گرم بر کیلوگرم) به صورت معنی داری بیشتر از ریشه و در منطقه ۲ رویشی آتریپلکس بیشتر از سایر مناطق بود ($F=493/348$ ، $P=0/000$ ، در صورتی که در گیاه خرزهره نتیجه معکوس حاصل شد (شکل B ۲ و جدول ۴). تفاوت در مقدار انباشت سرب و کادمیوم در آتریپلکس‌های مناطق مختلف را می‌توان به مقدار متفاوت این عناصر در خاک آن‌ها نسبت داد که بر اساس عمر سلول دفن و نوع زباله مدفون شده در آن، مقدار فلزات سنگین را در خاک مناطق رویشی آتریپلکس متفاوت می‌سازد. این نتایج با یافته‌های شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2022) مطابقت دارد. این پژوهشگران در بررسی توانایی گیاه گزنه (*Urtica dioica* L.) در جذب فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک، سرب و نیکل از شیرابه محل دفن پسماند تنکابن نتیجه گرفتند که مقدار تجمع تمامی این فلزات در اندام هوایی بیشتر از ریشه بود. همچنین سلگی و همکاران (Solgi et al., 2020) نیز توانایی جذب سرب در برگ گونه عسلی (*Alyssum maritimum*) را بیشتر از ریشه عنوان کردند. ریشه اولین اندام در تماس با عناصر سمی است که به طور معمول تجمع فلزات سنگین ابتدا در ریشه‌های گیاه صورت گرفته و سپس جهت جلوگیری از آسیب، به اندام‌های هوایی منتقل می‌شوند (Sharifi et al., 2022). نیسیم و همکاران (Nissim et al., 2022) در مطالعه ارتباط بین آلودگی ناشی از شیرابه و واکنش گیاهان دریافتند که جذب فلزات سنگین در گیاهان شامل انتقال فلزات به خارج از سلول های ریشه، ذخیره سازی در بافت‌های آوندی و سپس متعاقب آن سم زدایی، جابجایی و جداسازی فلزات در سطح سلول و کل گیاه است. در خصوص دلیل افزایش فلزات در اندام‌های گیاهان پالایش گر نسبت به ریشه، تجمع آنها در واکوئل‌ها به دلیل اثر گذاری کمتر بر روی گیاهان گزارش شده است (Haider et al., 2021). این پدیده یک استراتژی است که برخی گیاهان برای مقابله با سمیت فلزات سنگین اتخاذ می‌کنند. به این ترتیب اندام‌هایی که در متابولیسم گیاهان نقش دارند، از آسیب محافظت می‌شوند (Hassanpour et al., 2019).

خاک، C_{shoot} غلظت فلز در اندام هوایی و C_{Root} غلظت فلز در ریشه است. بر این اساس گیاهانی که دارای ضریب تجمع زیستی بیشتر از ۱ به خصوص در مجموع اندام‌های هوایی خود بوده، جهت استخراج گیاهی^۱ و آن‌هایی که دارای ضریب تجمع زیستی بیشتر از ۱ در ریشه و فاکتور انتقال کوچک‌تر از ۱ هستند، برای تثبیت گیاهی^۲ مناسب‌اند (Rafati et al., 2018).

همچنین شاخص‌های آلودگی^۳ و آلودگی نمرو^۴ برای تشخیص میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین به ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه و بر اساس جدول ۳ طبقه‌بندی شدند (Kowalska et al., 2018; Mohammadi et al., 2020).

$$PI = C_{Sample}/Bn \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$PI_{Nemerow} = \sqrt{\left(\frac{\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n PI\right)^2 + PI_{max}^2}{2}\right)} \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این روابط، PI شاخص آلودگی برای یک فلز سنگین در خاک، C_{Sample} غلظت فلز در نمونه خاک، Bn غلظت فلز در زمینه ژئوشیمیایی خاک (با مقدار ۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم برای کادمیوم و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای سرب) (Kowalska et al., 2018)، $PI_{Nemerow}$ درجه آلودگی خاک بر اساس تمامی فلزات سنگین موجود در آن، PI_{Max} بیشترین شاخص آلودگی محاسبه شده در بین فلزات سنگین موجود در خاک و n تعداد فلزات سنگین است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

ابتدا نرمال بودن و همگن بودن داده‌ها توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و لون بررسی شد. پس از حصول اطمینان از نرمال بودن داده‌ها و همگنی واریانس‌ها، برای مقایسات آماری از آزمون تجزیه واریانس (ANOVA) بهره گرفته شد و در صورت معنی دار بودن، از آزمون چند دامنه دانکن برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. کلیه تجزیه و تحلیل‌ها در سطح اطمینان آماری ۹۵ درصد انجام پذیرفت. تجزیه و تحلیل‌ها در نرم افزار SPSS (نسخه ۲۲) انجام گرفت و برای ترسیم شکل‌ها از نرم‌افزار EXCEL (نسخه ۲۰۱۰) بهره گرفته شد.

نتایج و بحث

غلظت سرب و کادمیوم در اندام‌های هوایی و ریشه دو گیاه در مناطق مختلف

نتایج آزمون t نشان داد که غلظت سرب در چهار منطقه رویش آتریپلکس (با میانگین به ترتیب ۱۰/۳، ۱۹/۷، ۱۲/۳۲ و ۲/۶۲ میلی گرم بر کیلوگرم) در اندام‌های هوایی به صورت خیلی معنی داری بیشتر از

3- Pollution Index (PI)

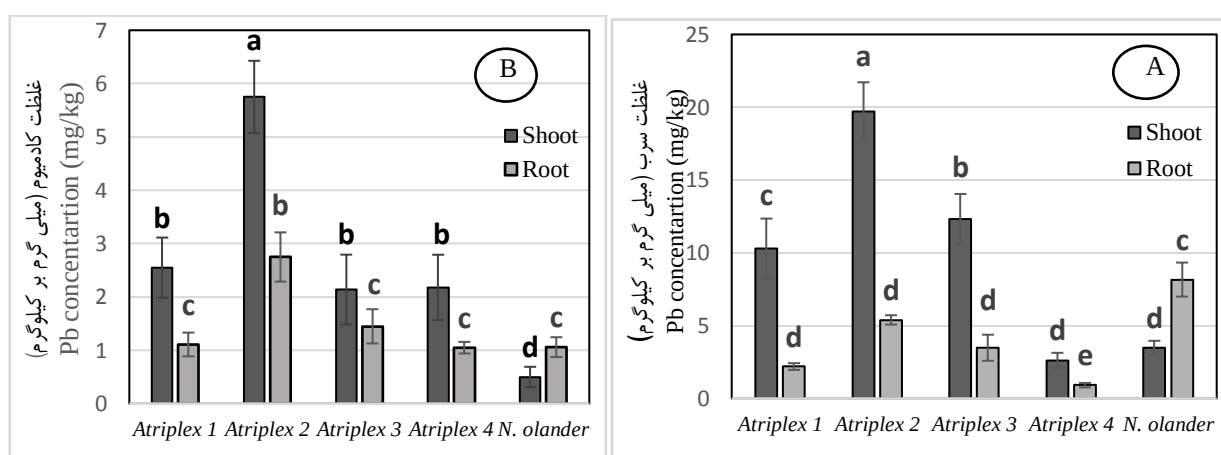
4- PINemerow

1- Phytoextraction

2- Phytostabilization

جدول ۳- طبقه‌بندی آلودگی خاک بر اساس شاخص‌های PI و $PI_{Nemerow}$ (Kowalska et al., 2018)

مقدار PI The value of PI	آلودگی خاک Soil contamination	مقدار $PI_{Nemerow}$ The value of $PI_{Nemerow}$	وضعیت آلودگی خاک Soil Contamination
$PI < 1$	----	$PI_{Nemerow} < 0.7$	بدون آلودگی Uncontaminated
$1 < PI < 2$	کم Low	$0.7 < PI_{Nemerow} < 1$	محدوده خطر Danger range
$2 < PI < 3$	متوسط Medium	$1 < PI_{Nemerow} < 2$	آلودگی کم Low contamination
$3 < PI < 5$	زیاد Strong	$2 < PI_{Nemerow} < 3$	آلودگی متوسط Moderate contamination
$PI > 5$	خیلی زیاد Very strong	$PI_{Nemerow} > 3$	آلودگی زیاد Severe contamination



شکل ۲- میانگین غلظت فلز سرب (A) و کادمیوم (B) در اندام‌های دو گیاه در مناطق مختلف

ستون‌هایی با حروف متفاوت از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری دارند (دانکن، ۹۵٪).

Figure 2- Mean of concentration of Pb(A) and Cd(B) in roots and shoots of two plants in different regions
Bars with different letters indicate significant differences (Duncan test, 95%)

بود که نتایج این مطالعه با نتایج پژوهش حاضر درباره گیاه خرزهره برای سرب همسو است. همچنین بیشتر بودن سرب در ریشه گیاه وتیور (*Vetiver zizanioides*) که توسط شیرابه زباله آبیاری شده، در پژوهش‌های جداگانه‌ای به تایید رسیده است (Gravand et al., 2021; Ghaemi et al., 2017).

نتایج غلظت سرب و کادمیوم در خاک دو گیاه در مناطق مختلف

براساس نتایج آزمون تجزیه واریانس، غلظت سرب در خاک پای دو گیاه در مناطق مختلف دارای اختلاف خیلی معنی‌دار است، به طوری که آزمون دانکن نشان داد، غلظت این عنصر در خاک پای گیاه خرزهره با میانگین ۳۵/۱۳ میلی گرم بر کیلوگرم از دیگر مناطق به صورت معنی‌داری بیشتر است (شکل ۳C و جدول ۴).

اما تجمع بیشتر سرب و کادمیوم در ریشه گیاه خرزهره و انتقال کمتر به اندام هوایی را می‌توان به گونه‌های دافع نسبت داد که در خاک‌هایی با غلظت بالای فلزی، این گیاهان فقط فلزات را در ریشه های خود نگه داشته و از انتقال آن به بخش‌های هوایی جلوگیری می‌کنند (Salehi, 2019; Gosh and sing, 2005). در این زمینه محققین اعلام داشتند که عدم تحرک قابل توجه برخی فلزات در گیاهان، به دلیل اتصال به سلول‌های ریشه رخ می‌دهد که می‌تواند نوعی مکانیسم تحمل گیاه محسوب شود (Peng et al., 2015). خرمی پور و همکاران (Khorami Pour et al., 2019) طی مطالعه ای درخصوص ارزیابی توان گیاه‌پالایی درمنه دشتی (*Artemisia sieberi*) برای جذب سرب در مرکز دفن محمدآباد قزوین گزارش دادند که میانگین غلظت این فلز در ریشه درمنه بیشتر از اندام هوایی

جدول ۴- نتایج آزمون تجزیه واریانس غلظت سرب و کادمیوم در ریشه، اندام هوایی و خاک پای گیاهان برای مناطق مختلف نمونه برداری

سرب (Pb)				کادمیوم (Cd)			
منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares	Sig	میانگین مربعات Mean squares	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares	Sig.
آتریپلکس ۱ Atriplex 1	بین گروه‌ها Between groups	199.7146	0.000	بین گروه‌ها Between groups	30	11.3446	0.000
	داخل گروه‌ها Within groups	98.35		داخل گروه‌ها Within groups	130	4.85	
	کل Total	160		کل Total	160		
آتریپلکس ۲ Atriplex 2	بین گروه‌ها Between groups	664.5403	0.000	بین گروه‌ها Between groups	30	54.9134	0.000
	داخل گروه‌ها Within groups	342.37		داخل گروه‌ها Within groups	130	36.64	
	کل Total	160		کل Total	160		
آتریپلکس ۳ Atriplex 3	بین گروه‌ها Between groups	246.9618	0.000	بین گروه‌ها Between groups	30	10.0677	0.000
	داخل گروه‌ها Within groups	127.43		داخل گروه‌ها Within groups	130	4.37	
	کل Total	160		کل Total	160		
آتریپلکس ۴ Atriplex 4	بین گروه‌ها Between groups	20.6417	0.000	بین گروه‌ها Between groups	30	9.1673	0.000
	داخل گروه‌ها Within groups	12.34		داخل گروه‌ها Within groups	130	3.76	
	کل Total	160		کل Total	160		
خرزهره Oleander	بین گروه‌ها Between groups	1315.9374	0.000	بین گروه‌ها Between groups	30	2.9612	0.000
	داخل گروه‌ها Within groups	659.76		داخل گروه‌ها Within groups	130	1.47	
	کل Total	160		کل Total	160		

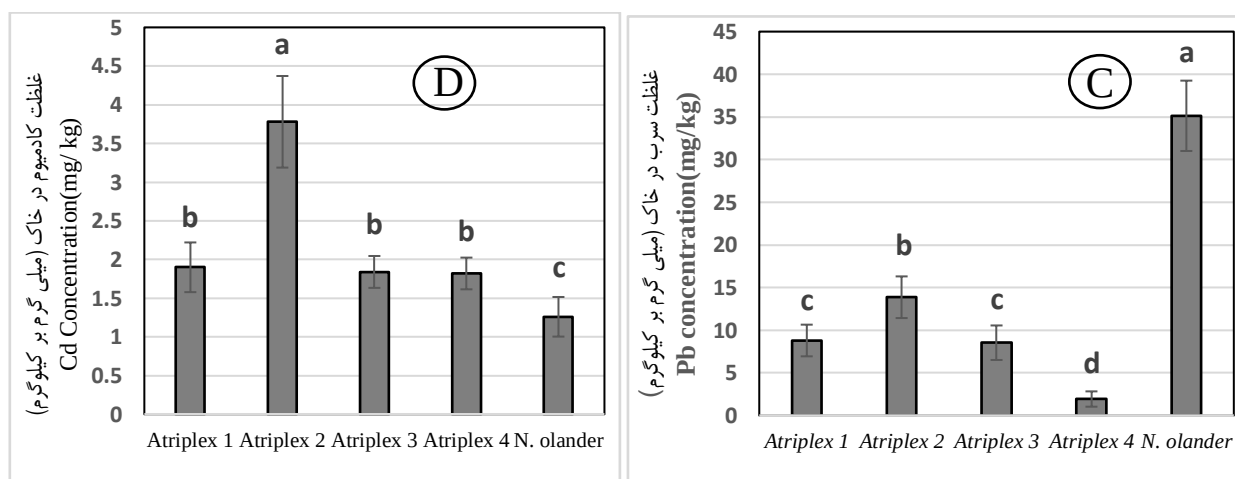
شاخص PI تشخیص می‌دهد که کدام فلز سنگین، تهدید بیشتری برای محیط خاک محسوب شده و شاخص Nemerow ارزیابی کلی از درجه آلودگی خاک بر اساس همه فلزات سنگین موجود در آن ارایه می‌دهد (Qingjie et al., 2008) که مقادیر این شاخص‌ها (با مقدار ۰/۳ میلی گرم بر کیلوگرم کادمیوم و ۲۰ میلی گرم بر کیلوگرم سرب در زمینه ژئوشیمیایی خاک) در جدول ۴ آمده است. بر اساس این جدول تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه به جز منطقه رویشی خرزهره، از نظر وضعیت آلودگی سرب در خاک در طبقه بدون آلودگی (با عدد شاخص کمتر از ۱) قرار دارند، در صورتی که برای کادمیوم مناطق رویشی یک تا چهار آتریپلکس به ترتیب با مقادیر شاخص ۶/۳۳، ۱۲/۶، ۱۳/۶ و ۶/۰۶ در وضعیت خیلی آلوده و منطقه رویشی خرزهره با عدد شاخص ۴/۲ در وضعیت آلوده طبقه‌بندی می‌شود. مقدار شاخص Nemerow به دست آمده در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه نیز، محدوده آلودگی زیاد را نشان داد. در این زمینه، دیگر محققین به نتایج مشابهی دست

همچنین براساس نتایج آزمون تجزیه واریانس، مقدار کادمیوم نیز در خاک پای دو گیاه در مناطق مختلف دارای اختلاف معنی‌داری است ($P = 0.000, F = 537/200$)، به‌طوری‌که غلظت این عنصر با توجه به آزمون دانکن، در خاک پای گیاه آتریپلکس در منطقه ۲ با میانگین ۳/۷۸ میلی گرم بر کیلوگرم از دیگر مناطق به‌صورت معنی‌داری بیشتر است (شکل D ۳ و جدول ۴). لازم به ذکر است که تمامی مقادیر اندازه گیری شده این فلزات پایین‌تر از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی (به ترتیب ۵ و ۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای فلزات کادمیوم و سرب در خاک) و ملی (به‌ترتیب ۳،۹ و ۳۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم برای فلزات کادمیوم و سرب در استاندارد کیفیت منابع خاک ایران) بود. طی مطالعه ای، مقدار میانگین غلظت سرب و نیکل خاک در محل دفن پسماند محمد آباد قزوین به‌ترتیب ۱۹ و ۵۰ میلی گرم در کیلوگرم و کمتر از حد استاندارد فلزات در خاک‌ها گزارش شده که در خصوص سرب با نتایج پژوهش حاضر همسو است (Khorami Pour et al., 2019).

یافته و اظهار داشتند که میانگین غلظت عناصر کادمیوم، مس، نیکل، سرب و کروم در خاک مرکز دفن زباله‌ای در مراکش، بالاتر از زمینه ژئوشیمیایی خاک بوده و شاخص Nemerow به دلیل مقادیر بالای فلزات به خصوص کادمیوم و سرب در طبقه آلاینده‌گی متوسط تا زیاد جای می‌گیرد (El fadili et al., 2022).

نتایج فاکتور تجمع زیستی و انتقال در ایستگاه‌های مختلف

مقادیر فاکتور تجمع زیستی و انتقال نشان دهنده قابلیت گیاهان جهت تحمل و تجمع فلزات سنگین در اندام‌های خود بوده و کارایی گیاه را جهت تثبیت یا استخراج فلزات نشان می‌دهد که شاخص‌های مهمی برای تعیین پتانسیل گیاه‌پالایی نیز محسوب می‌شوند (Salehi, 2019).



شکل ۳- میانگین غلظت فلز سرب (C) و کادمیوم (D) در خاک پای دو گیاه در مناطق مختلف

ستون‌هایی با حروف متفاوت از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری دارند (دانکن، ۹۵٪).

Figure 3- Mean of concentration of Pb(C) and Cd(D) in soil of two plants in different regions
Bars with different letters indicate significant differences (Duncan test, 95%)

جدول ۴- شاخص‌های PI و $PI_{Nemerow}$ محاسبه شده برای مناطق مختلف نمونه‌برداری

Table 4- The calculated PI and $PI_{Nemerow}$ Indices for different Sampling Areas

منطقه Area	$PI_{Nemerow}$	PI pb	PI Cd
آتریپلکس ۱ Atriplex 1	4.94	0.44	6.33
آتریپلکس ۲ Atriplex 2	10.07	0.70	12.6
آتریپلکس ۳ Atriplex 3	4.91	0.43	6.13
آتریپلکس ۴ Atriplex 4	4.81	0.01	6.06
خرزهره Oleander	3.64	1.75	4.2

بالا تر از ۱ در ریشه، توانایی استخراج فلزات مذکور از خاک و تجمع آن‌ها در اندام هوایی در فرایند گیاه پالایی را داشت، در صورتی که خرزهره به دلیل داشتن ضریب تجمع زیستی کمتر از ۱ در اندام هوایی و ریشه، جهت استخراج یا تثبیت گیاهی سرب و کادمیوم مناسب نبود. برخی از گونه‌های گیاهی توانایی جذب و انباشت مقادیر زیادی از عناصر سنگین بدون نشان دادن آثار سمی آشکار را دارند. بنابراین می‌توان از این ویژگی آن‌ها برای پاک‌سازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین استفاده کرد. از این رو آتریپلکس که به صورت بومی و خودرو در منطقه یافت می‌شود، قابلیت بهتری در جذب عناصر سنگین به خصوص در اندام هوایی نسبت به خرزهره که به همین منظور در منطقه کاشته شده، دارد. همچنین مقدار سرب در خاک بیشتر از کادمیوم بوده و با این که هر دو فلز در محدوده مجاز استانداردهای ملی و سازمان بهداشت جهانی واقع شدند، اما خاک منطقه براساس شاخص Nemerow در وضعیت آلودگی زیاد قرار داشت. با توجه به رشد روزافزون جمعیت و تولید حجم بالایی از زباله‌ها در شهر تهران و وجود میزان بالای عناصر سمی موجود در شیرابه‌های تولیدی، پیشنهاد می‌شود برای کنترل آلودگی و جلوگیری از گسترش آن، بررسی‌های زیست محیطی درباره کاشت دیگر گیاهان در مرکز دفن آرادکوه انجام شده و غلظت سایر فلزات سنگین در خاک و گیاهان منطقه به طور مستمر تعیین گردد. همچنین می‌توان از گونه آتریپلکس به عنوان یک گونه مقاوم به فلزات سنگین در پروژه‌های گیاه‌پالایی مراکز دفن، اطراف معادن و حتی فضای سبز استفاده نمود.

به عقیده ان جی و همکاران (Ng et al., 2016)، ضریب تجمع زیستی ۴ معیار دارد: مقدار کمتر از ۰/۰۱ به این معناست که هیچ انباشتی در گیاه وجود ندارد. مقدار بین ۰/۱-۰/۰۱ به معنای تجمع کم فلزات سنگین، مقدار بین ۰/۱ تا ۱ به عنوان انباشت متوسط و مقدار بیش از ۱ به عنوان انباشت زیاد فلزات سنگین در نظر گرفته می‌شود. همچنین طبق نظر ماتی‌نا و همکاران (Mattina et al., 2003)، در روش گیاه‌پالایی، فاکتور انتقال عناصر از ریشه به هوایی بسیار مهم بوده و از آن می‌توان به منظور شناسایی گونه‌های بیش انباشت کننده استفاده نمود که بر طبق نتایج ضریب تجمع زیستی و فاکتور انتقال، گیاه آتریپلکس به عنوان بیش‌انباشت‌گر فلزات سرب و کادمیوم در اندام‌های هوایی خود شناخته می‌شود. باراسراتی و همکاران (Barasarathi et al., 2021) نیز گیاه برگ‌گندمی (*Chlorophytum comosum*) را به دلیل داشتن فاکتور انتقال بیشتر از ۱، به عنوان انباشت‌گر فلزات سنگین کادمیوم، آرسنیک و سرب در یک مرکز دفن در کشور مالزی معرفی کردند.

نتیجه‌گیری

بر طبق نتایج این پژوهش گیاه آتریپلکس قادر به تجمع بیش از دو برابر فلزات سنگین سرب و کادمیوم در اندام‌های هوایی خود نسبت به ریشه بود. همچنین این گیاه به دلیل داشتن ضریب تجمع زیستی

جدول ۵- مقادیر ضریب تجمع زیستی در اندام هوایی، ریشه و فاکتور انتقال دو گیاه در مناطق مختلف نمونه‌برداری

Table 5- The amounts of BCF in root and shoot and TF for two plants in different sampling Areas

منطقه Area	ضریب تجمع زیستی اندام هوایی Shoot BCF		ضریب تجمع زیستی ریشه Root BCF		فاکتور انتقال TF	
	میانگین سرب ($\pm$ انحراف معیار) Pb average ($\pm$ Standard deviation)	میانگین کادمیوم ($\pm$ انحراف معیار) Cd average ($\pm$ Standard deviation)	میانگین سرب ($\pm$ انحراف معیار) Pb average ($\pm$ Standard deviation)	میانگین کادمیوم ($\pm$ انحراف معیار) Cd average ($\pm$ Standard deviation)	میانگین کادمیوم Cd average	میانگین سرب Pb average
آتریپلکس ۱ Atriplex 1	1.17 ($\pm$ 0.02)	1.34 ($\pm$ 0.06)	0.25 ($\pm$ 0.01)	0.58 ($\pm$ 0.03)	2.30	4.68
آتریپلکس ۲ Atriplex 2	1.82 ($\pm$ 0.07)	1.52 ($\pm$ 0.17)	0.39 ($\pm$ 0.02)	0.73 ($\pm$ 0.04)	2.09	3.65
آتریپلکس ۳ Atriplex 3	1.44 ($\pm$ 0.05)	1.16 ($\pm$ 0.11)	0.41 ($\pm$ 0.01)	0.79 ($\pm$ 0.02)	1.48	3.53
آتریپلکس ۴ Atriplex 4	1.35 ($\pm$ 0.08)	1.20 (0.0.. $\pm$ 0.13)	0.47 ($\pm$ 0.01)	0.58 ($\pm$ 0.04)	2.08	2.85
خرزهره Oleander	0.10 ($\pm$ 0.01)	0.40 ($\pm$ 0.03)	0.23 ($\pm$ 0.01)	0.84 ($\pm$ 0.09)	0.47	0.43

منابع

1. Alinia Keshtali, A.A. (2022). *Cultivation of ornamental trees and shrubs*. Agricultural Research, Education and Promotion Organization publication. 154 pages. (In Persian)
2. Anjanapriya, S., Sureka, M., Gunasundari, P., Meenakshi, N., & Sasirekha, N. (2022). *Providencia rettgeri* AVR20 with multiple tolerance of heavy metals from municipal solid waste dump site. *Journal of Materials and Environmental Science*, 13(01), 1-8.
3. Anning, A.K., & Akoto, R. (2018). Assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil from a mined site with *Typha latifolia* and *Chrysopogon zizanioides*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 97-104. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.014>.
4. Bahrami, B., & ghorbani, A. (2016). Investigation and determining environmental factors affecting on distribution of rangeland habitats in Southeast of Sabalan. *Journal of Natural Ecosystems of Iran*, 7(1), 33-44. (In Persian with English abstract)
5. Barasarathi, J., Auwal, H., Pariatamby, A., Shahul Hamid, F., & Chijioke Uche, E. (2021). Phytoremediation of leachate contaminated soil: a biotechnical option for the bio reduction of heavy metals induced pollution in tropical landfill. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(7), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17389-3>.
6. El Fadili, H., Ben ali, M., Touach, N., El Mahi, M., & Lotfi, M. (2022). Ecotoxicological and pre-remedial risk assessment of heavy metals in municipal solid wastes dumpsite impacted soil in Morocco. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100640. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100640>
7. Ghaemi, A.A., & Majdeddin, F. (2017). Investigation of the phytoremediation of Vetiver and Eucalyptus by absorption of heavy metals from sewage in a contaminated soil with Landfill Leachate. *Water Resource Engineering*, 9(28), 98-106. (In Persian with English abstract)
8. Ghorbanian, D., Sharafieh, H., Mozaffari, M., Amirjan, M., & Mirakhorli, R. (2018). Investigating the possibility of the establishment of the two species of the genus *Atriplex* (*Atriplex canescens* and *Atriplex verrocifera*) and comparing their forage production in saline and low yield soils. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 25(4), 761-769. (In Persian with English abstract)
9. Ghosh, M., & Singh, S.P. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied Ecology and Environmental Research*, 3(1), 1-18.
10. Gravand, F., Rahnavard, A., & Mohammad Pour, G. (2021). Investigation of the uptake of heavy metals in waste leachate by vetiver from a contaminated soil. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(1), 89-104. (In Persian with English abstract)
11. Haider, F.U., Liqun, C., Coulter, J.A., Cheema, S.A., Wu, J., Zhang, R., & Farooq, M. (2021). Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111887. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>.
12. Hamzenejad Taghliabad, R., Khodaverdiloo, H., Rezapour, S., & Manafi. SH. (2012). Evaluating of efficiency of three halophyte plants for reduction of soil exchangeable sodium (ESP) and cadmium (Cd) and lead (Pb) contamination. *Journal of Water and Soil Science*, 16(60), 131-143. (In Persian with English abstract)
13. Hassan, A., Pariatamby, A., Ossai, I.C., Ahmed, A., Muda, M.A., Wen, T.Z., & Hamid, F.S. (2021). Bioaugmentation-assisted bioremediation and kinetics modelling of heavy metal-polluted landfill soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(7), 6729- 6754. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03626-2>
14. Hassanpour, R., Zafarian, F., Rezvani, M., & Jalili, B. (2019). Study the effect of cadmium on plant pigments and antioxidant compounds of water mint (*Mentha aquatica* L.), eryngo (*Eryngium caucasicum* Trautv.) and *Froriepia* (*Froriepia subpinnata* Ledeb.). *Eco Phytochemistry Journal of Medicinal Plants*, 7(2), 91-103. (In Persian with English abstract)
15. Khorami Pour, S., Mafi Gholami, R., & Jahani, A. (2019). An investigation on the possibility of heavy metal (Pb and Ni) phytoremediation from plant *Artemisia sieberi* in Mohammadabad Waste disposal site in Ghazvin. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(10), 91-103. (In Persian with English abstract)
16. Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gąsiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health*, 40, 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>
17. Kowsari, M.H., Saghi, M.H., Ashoori, R., Rastgar, A., & Fakour, A. (2022). Investigating and compiling a map of the Sseverity of heavy metal pollution in the soil around the landfill of Sabzevar municipal waste with different indicators. *Journal of Environmental Health Sustainability Development*, 7(1), 1547-60. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v7i1.8965>
18. Mahohi, A., Raiesi, F., & Hosseinpour, A.R. (2018). Phytoremediation of Lead in the presence of individual and combined inoculation of earthworms, arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobacteria by maize. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(2), 91-110. (In Persian with English abstract)

19. Marsum, M., Taufik A., Slamet, S., Khayan, Kh., & Slamet, W. (2022). Phytoremediation as a barrier to heavy metal distribution in open dumping landfill in peatlands. *Journal of Ecological Engineering*, 23(6), 112–117. <https://doi.org/10.12911/22998993/148149>
20. Mattina, M.J.I., Lannucci-Berger, W., Musante, C., & White, J.C. (2003). Concurrent plant uptake of heavy metal and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution*, 124(3), 375-378. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(03\)00060-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(03)00060-5)
21. Mehrab, N., Chorom, M., & Norouzi Masir, M. (2020). Efficiency of Nitrilo Triacetic Acid (NTA) on leaching and refining of cadmium from soil by maize. *Journal of Water and Soil*, 34(3), 593-608. (In Persian with English abstract)
22. Mohammadi, A.A., Zarei, A., Esmaeilzadeh, M., Taghavi, M., Yousefi, M., Yousefi, Z., Sedighi, F., & Javan, S. (2020). Assessment of heavy metal pollution and human health risks assessment in soils around an industrial zone in Neyshabur, Iran. *Biological Trace Elements Research*, 195, 343–352. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01816-1>.
23. Motamedi, J., khodagholi, M., Sheidai Karkaj, E., & Ghodarzi, M. (2019). Positive and negative aspects of rangeland planting of native and non-native species of Atriplex. *Iran Nature*, 4(3), 43-5. (In Persian with English abstract)
24. Motuzova, G.V., Minkina, T.M., Karpova, E.A., Barsova, N.U., Mandzhieva., S.S. (2014). Soil contamination with heavy metals as a potential and real risk to the environment. *Journal of Geochemical Exploration*, 144, 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.01.026>.
25. Ng, C.C., Rahman, M.M., Boyce, A.N., & Abas, M.R. (2016). Effects of different soil amendments on mixed heavy metals contamination in vetiver grass. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 97(5), 695–701. <https://doi.org/10.1007/s00128-016-1921-5>
26. Nissim, W. G., Palm, E., Pandolfi, C., Mancuso, S., & Azzarello, E. (2021). Relationship between Leachate Pollution Index and growth response of two willow and poplar hybrids: Implications for phyto-treatment applications. *Waste Management*, 136, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.09.012>
27. Nofal, E.M.S., Shahin, S.M., EL-Tarawy, A.M.A., & Omar, S.H.M. (2022). Long-term effect of some heavy metal combinations on growth and chemical composition of some ornamental shrubs common in Egypt №2. – Common oleander (*Nerium oleander* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(5), 4351-4361. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2005_43514361
28. Pasalari, H., Farzadkia, M., Gholami, M., & Emamjomeh, M.M. (2019). Management of landfill leachate in Iran: valorization, characteristics, and environmental approaches. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 335-348.
29. Peng, D., Shafi, M., Wang, Y., Li, S., Yan, W., Chen, J., & Ye, Liu. (2015). Effect of Zn stresses on physiology, growth, Zn accumulation, and chlorophyll of *Phyllostachys pubescentis*. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22(19), 14983–14992. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4692-3>
30. Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., & Liqiang, Y. (2008). Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3), 230–241. [https://doi.org/10.1016/S1002-0705\(08\)60042-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0705(08)60042-4)
31. Rafati, M., Siahpoor, N., Mohammadi Roozbahani, M., & Heidari, M. (2018). Absorbability and translocation of Nickle from soil using sunflower plant (*Helianthus annuus*). *Journal of Advances in Environmental Health Research*, 6, 234- 239.
32. Salehi, A. (2019). Phytoremediation: A remediation technology of heavy metal contaminated soils. *Human & Environment*, 49, 27-42. (In Persian with English abstract)
33. Sepahvand, H., Feizian, M., Mirzaeitalarposhti, R., & Mueller, T. (2020). Comparison of different methods for the determination of organic carbon in calcareous soils under different land uses of Lorestan province. *Journal of Water and Soil*, 34(1), 169-177. (In Persian with English abstract)
34. Sharifi, Kh., Rahnavard, A., Saeb, K., Farid Fahimi, Gh., & Tavana, A. (2022). Capacity of nettle (*Urtica dioica* L.) in adsorption of heavy metals (Pb, As, Cd, Ni) from Tonekabon landfill leachate. *Journal of Environmental Science and Technology*, 24(2), 17-30. (In Persian with English abstract)
35. Solgi, E., Yazdanyar, R., & Taghizadeh, M. (2020). Assessment of phytoremediation potential of *Alyssum maritimum* in remediation of lead-contaminated soil. *Scientific Journal of School of Public Health and Institute of Public Health Research*, 17(4), 363-372. (In Persian with English abstract)
36. Vavřková, M., & Adamcová, D. (2014). Heavy metals uptake by select plant species in the Landfill area of Štěpánovice, Czech Republic. *Polish Journal of Environmental Studies*, 6(23), 2265-2269. <https://doi.org/10.15244/pjoes/26106>.
37. Vongdala, N., Tran, H.D., Dang Xuan, T., Teschke, R., & Dang Khanh, T. (2019). Heavy metal accumulation in water, soil, and plants of municipal solid waste landfill in Vientiane, Laos. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 1-13. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010022>
38. Water and soil office, Vice President of Human Environment, (2018). *Quality standards of soil resources and its guidelines*. Department of Environment publication, 164 pages. (In Persian)

39. Zahedi, S., Akbarzadeh, A., Rafati, M., Banaee, M., Sepehri Moghadam, H., & Raeisi, H. (2013). Biochemical responses of juvenile European sturgeon, (*Huso huso*) to a sub-lethal level of copper and cadmium in freshwater and brackish water environments. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 11(26), 1-8. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-11-26>.
40. Zahedi, S., Mirvaghefi, A., Rafati, M., Rafiee, Gh., Mojazi Amiri, B., Hedayati, M., Makhdoomie, Ch., & Zarei Dangesarakie, M. (2014). The effect of sub-lethal exposure to copper and the time course of recovery in clean water on biochemical changes in juvenile fish (*Acipenser persicus*). *Marine and Freshwater Behavior and Physiology*, 479(4), 253–264. <http://dx.doi.org/10.1080/10236244.2014.926077>
41. Zhang, J., Shi, Z., Ni, Sh., Wang, X., Liao, Ch., & We., F. (2021). Source Identification of Cd and Pb in Typical Farmland Topsoil in the Southwest of China: A Case Study. *Sustainability*, 13(7), 1-11. <https://doi.org/10.3390/su13073729>



Evaluation of Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Cow Compost on the Yield and Nitrate Uptake of *Allium hirtifolium* in FereydunShahr Region

Z. Khanmohammadi^{1*}, A. Ahmadi²

Received: 16-03-2023

Revised: 06-08-2023

Accepted: 09-08-2023

Available Online: 09-08-2023

How to cite this article:

Khanmohammadi, Z., & Ahmadi, A (2023). Evaluation of different levels of nitrogen fertilizer and cow compost on the yield and nitrate uptake of *Allium hirtifolium* in FereydunShahr region. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 561-574. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81652.1266>

Introduction

Iranian shallot, scientifically known as *Allium hirtifolium* Boiss. is a perennial plant of the *Allium* genus and native to Iran. The *Allium* genus has many antioxidant properties due to its being rich in organic compounds of sulfur and phenol. The shallot is used to treat rheumatic and inflammatory pains, soothe superficial wounds, treat some stomach diseases, be antispasmodic, and also as a spice and flavoring in some foods. Considering the health benefits of shallot and its application in the food industry, shallot corms are harvested from the natural resources in different stages of growth. Therefore, it is necessary to preserve the natural habitats of shallot and also supply the market demand for this plant. It appears that the cultivation of shallots within agricultural systems could serve as a significant strategy for meeting the demands of the expanding global market. Furthermore, shallots are known for their low water requirements, making their cultivation a focal point in Isfahan province in recent years. Additionally, this crop stands out as a high-income generator in the region. Despite its economic potential, there has been limited research into optimizing the growth conditions for this valuable plant. Hence, this study aimed to explore the impact of urea and cow compost on the yield of Iranian shallots in the Fereydun Shahr region, focusing on the uptake of nitrogen, phosphorus, potassium, and nitrates.

Materials and Methods

This research was carried out in the crop year of 1400-1401 in a field with an area of 300 square meters (32° 55' 53" N, 49° 56' 43" E) located in Fereydunshahr city of Isfahan province. The experiment was conducted according to a completely randomized design. Factorial arrangement of experimental treatments including two fertilization factors (urea and cow compost) was used. Plots with dimensions of 2 × 3 meters were created with a distance of 50 cm between the rows. The treatments were considered as urea fertilization at four levels (0, 120, 240 and, 360 kg ha⁻¹) and cow compost treatment at three levels (0, 40 and, 60 tons ha⁻¹). After plotting and applying cow compost treatments, shallot corms were planted at a depth of 10 to 15 cm in November 1400. Urea fertilizer treatment was applied in two stages, the first stage when the plant germinated (mid-April) and the second stage before flowering (second half of May). All treatments were applied in 3 replications. It should be noted that the treatments in this research are shown as 0-0 (control), 0-40, 0-60, 120-0, 120-40, 120-60, 240-0, 240-40, 240-60, 360-0, 360-40 and 360-60. The corms were harvested in June 1401 and the fresh and dry yield of the shallots was determined. The amount of nitrogen, phosphorus and, potassium in shallots was measured. Nitrate concentration was also measured in the harvested corms based on the Iranian national standard No. 4106. The nitrogen, phosphorus and, potassium uptake by shallots was obtained from the product of yield and the concentration of these elements. Results were analyzed using analysis of variance (ANOVA) procedure and the

1- Assistant Professor, Department of Soil and Water Research, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Isfahan, Iran

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

2- Former student, Department of Horticulture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.81652.1266](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81652.1266)

means were compared using the protected least significant difference (LSD) test at $p < 0.05$ probability level using SAS 9.3 software.

Results and Discussion

The results showed that the combined use of chemical fertilizer (urea) and cow compost has a significant effect on the shallot yield increment, as the highest yield was obtained in the combined treatment of urea fertilizer 240 (kg ha^{-1}) and cow compost 40 (ton ha^{-1}) application. Although the highest nitrogen concentration and uptake were observed in the treatment of 360 (kg ha^{-1}) of urea along with 60 (ton ha^{-1}) of cow compost, it was not significantly different from the treatment of 240-40 (the treatment with the highest yield). In general, the concentration of shallots nitrate was much lower than the permissible limit according to the national standard of Iran No. 16596. The highest nitrate concentration (24.63 mg kg^{-1} of fresh weight) was observed in the combined treatment of 120 (kg ha^{-1}) of urea and 60 (ton ha^{-1}) of cow compost application (120-60), which was significantly higher than other treatments. On the other hand, the concentration of shallots nitrate in the 240-40 treatment was significantly lower than the treatments of 360 kg of urea per hectare along with 40 or 60 (ton ha^{-1}) of cow compost.

Conclusion

According to the results, to achieve the best yield, the most suitable level of urea application was 240 kg ha^{-1} and the best level of cow compost was 40 ton ha^{-1} . It seems, utilization more amounts of urea or cow compost will only cause additional costs to the farmer and a waste of capital. Moreover, it can increase environmental pollution and nitrate concentration of product, which cause to quality decrement.

Keywords: Cow compost, Nitrate, Nitrogen fertilization, Shallot, Yield



مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۷۴-۵۶۱

ارزیابی سطوح مختلف کود نیتروژن و کمپوست گاوی بر عملکرد و جذب نیترات موسیر (*Allium hirtifolium* Boiss.) در منطقه فریدونشهر

زهرا خان محمدی^{۱*} - ابوالفضل احمدی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۸

چکیده

موسیر ایرانی با نام علمی (*Allium hirtifolium* Boiss.) گیاهی چندساله است که از رویشگاه‌های طبیعی از جمله مراتع برداشت می‌شود. با توجه به کاربردهای متنوع و رو به افزایش این گیاه در صنایع غذایی و دارویی، کشت زراعی آن در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. به‌علاوه نیاز آبی موسیر کم بوده و در عین حال درآمدزایی خوبی برای کشاورزان به دنبال دارد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر مقادیر مختلف کودهای نیتروژن و کمپوست گاوی بر عملکرد موسیر و جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و نیترات در منطقه فریدونشهر استان اصفهان انجام شد. به این منظور تیمار کوددهی اوره در چهار سطح (۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار) و تیمار کمپوست گاوی در سه سطح (۰، ۴۰ و ۶۰ تن در هکتار) در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی و با دو عامل کود نیتروژنی و کمپوست گاوی به‌صورت فاکتوریل اعمال شد. تیمارها به شکل ۰-۰ (شاهد)، ۰-۴۰، ۰-۶۰، ۱۲۰-۰، ۱۲۰-۴۰، ۱۲۰-۶۰، ۲۴۰-۰، ۲۴۰-۴۰، ۲۴۰-۶۰، ۳۶۰-۰، ۳۶۰-۴۰ و ۳۶۰-۶۰ در نظر گرفته شدند که با احتساب سه تکرار، در مجموع ۳۶ کرت آزمایشی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد تر و خشک کورم موسیر در تیمار تلفیقی کاربرد ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی به دست آمد. بیشترین جذب نیتروژن در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار اوره به همراه ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی مشاهده شد، اما تفاوت معنی‌داری با تیمار ۴۰-۲۴۰ نداشت. به طور کلی غلظت نیترات در کورم موسیر کمتر از حد مجاز استاندارد ملی ایران بود. بیشترین غلظت نیترات مربوط به تیمار تلفیقی کاربرد ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی بود. با کاربرد ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره، غلظت نیترات به‌طور معنی‌داری کاهش و با افزایش مقدار کاربرد اوره به ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار و البته کاربرد هم‌زمان کمپوست گاوی، غلظت نیترات کورم موسیر مجدد افزایش یافت. با توجه به نتایج، تیمار تلفیقی ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی به عنوان بهترین تیمار برای حصول بیشترین عملکرد کورم موسیر در منطقه پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: عملکرد، کوددهی نیتروژن، کمپوست گاوی، موسیر، نیترات

۱- استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
(*) نویسنده مسئول: (Email: Z.khanmohamadi@areeo.ac.ir)

۲- دانشجوی سابق گروه علوم باغبانی، دانشگاه شهرکرد، ایران

مقدمه

موسیر ایرانی با نام علمی (*Allium hirtifolium* Boiss.) و نام انگلیسی Iranian shallot یا Mosir یک گیاه چندساله از جنس آلیوم (*Allium*) و بومی ایران است. این گیاه غالباً به صورت خودرو در مناطق سردسیر و نسبتاً مرتفع استان‌های مختلف کشور از قبیل آذربایجان غربی، لرستان، همدان، اصفهان، کرمانشاه، چهارمحال بختیاری، کهگیلویه و بویر احمد، فارس، ایلام و کردستان می‌روید که تاکنون ژنوتیپ‌های مختلفی برای آن گزارش شده است (Davazdahemami, 2021). آلیوم از متنوع‌ترین و بزرگترین جنس‌های گیاهان چند ساله در گروه گیاهان تک‌لپه است و بیش از ۹۰۰ گونه دارد که ۱۲۱ گونه آن ایرانی است (Fritch and Abbasi, 2013). این گیاهان به دلیل غنی بودن از ترکیبات آلی گوگرد و فنول، خواص آنتی‌اکسیدانی زیادی دارند (Panahandeh et al., 2016). کورم موسیر برای درمان دردهای روماتیسمی و التهابی، تسکین زخم‌های سطحی، درمان برخی بیماری‌های معده، ضد اسپاسم و همچنین به عنوان ادویه و طعم دهنده در برخی غذاها استفاده می‌شود (Jafari-Mofidabadi and Rezaee, 2015). با توجه به خواص درمانی موسیر و نیز کاربرد آن در صنایع غذایی، کورم‌های موسیر در عرصه‌های منابع طبیعی، در مراحل مختلف رشد و معمولاً به صورت رقابتی توسط بهره‌برداران و روستائیان برداشت می‌شود. این امر باعث شده که عملکرد محصول و امکان بقای گیاه در محیط طبیعی غیر قابل پیش‌بینی باشد. در پژوهشی در ارومیه، از مرتعی به وسعت حدود ۳۷ هکتار، حدود ۶۵۱ کیلوگرم موسیر برداشت شد که در آن تمامی سطح تیپ‌های موسیر ایرانی قابل مشاهده بوده است. این گزارش نشان‌دهنده پایین بودن عملکرد محصول موسیر در مراتع است. البته وضعیت تولید موسیر در دیمزارها اندکی مناسب‌تر است و به طور متوسط عملکرد آن حدود ۵۰۰ کیلوگرم در هکتار گزارش شده است (Davazdahemami, 2021). متأسفانه به دلیل بهره‌برداری‌های بی‌رویه و برداشت نادرست در بسیاری از مراتع، تراکم گیاه موسیر در واحد سطح به شدت کاهش یافته است و جزء گونه‌های در خطر انقراض قرار دارد (Farhadi and Alizadeh Salte, 2017). به منظور حفظ زیستگاه‌های طبیعی و نیز تأمین نیاز بازار به این گیاه، به نظر می‌رسد تولید موسیر در سیستم‌های زراعی می‌تواند به عنوان یک استراتژی مهم در تأمین بازار رو به گسترش جهانی عمل کند. بررسی منابع نشان می‌دهد که پژوهش‌های چندانی درباره بهینه‌سازی شرایط رشد این گونه ارزشمند صنعتی انجام نشده است (Askari-Khorasgani and Pessarakli, 2019). امیرخانی و همکاران (Amirkhani et al., 2022) در پژوهشی اثر کاربرد تیمارهای شیمیایی، آلی و زیستی بر عملکرد و صفات بیوشیمیایی موسیر ایرانی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان اندازه کورم، وزن کورم،

مقدار نیتروژن، پتاسیم، پروتئین، فنل و آنتی‌اکسیدان به ترتیب در تیمارهای ورمی‌کمپوست و کود شیمیایی تلقیح شده با کود زیستی به دست آمد. به‌علاوه بیشترین مقدار فسفر و فلاونوئید در تیمار ورمی کمپوست تلقیح شده با کود زیستی به دست آمد. کمترین میزان اندازه و وزن کورم، مقدار فسفر، پتاسیم، فنل، فلاونوئید و پروتئین کل مربوط به تیمار شاهد بود که نشان‌دهنده پاسخ گیاه به کوددهی می‌باشد. در پژوهش دیگری تأثیر وزن اولیه کورم بذری (در چهار گروه وزنی ۲۵-۱۵، ۳۵-۲۵، ۴۵-۳۵، ۵۵-۴۵ گرم) و کود دامی (در سه سطح ۰، ۴۰ و ۶۰ تن در هکتار) بر زادآوری و عملکرد موسیر (*Allium altissimum* Regel.) در شرایط آب و هوایی شهرستان شیروان مطالعه شد (Arefkhani et al., 2016). نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین وزن کورم خواهری تک‌بوته مربوط به کورم‌های کشت شده در محدوده (۴۵-۵۵ گرم) و مصرف کود دامی به میزان (۶۰ تن در هکتار)، به ترتیب به میزان ۱۲/۸۱ و ۸/۵۱ گرم بود. همچنین بیشترین عملکرد خشک کورم در تیمار کورم‌های کشت شده در محدوده (۴۵-۵۵ گرم) و مصرف کود دامی به میزان (۴۰ تن در هکتار) به ترتیب ۳۸۶/۲ و ۸۸/۹۴ گرم در مترمربع به دست آمد. خیرخواه و همکاران (Kheirkhah et al., 2017) تأثیر سطوح مختلف کود سوپر فسفات (۰، ۱۵۰، ۲۵۰ و ۳۵۰ کیلوگرم) و تراکم کاشت (۳۰ و ۴۰ بوته در متر مربع) را بر عملکرد و اجزای عملکرد موسیر بررسی نمودند. بر اساس نتایج، کاربرد سوپر فسفات باعث افزایش معنی‌دار عملکرد تر و خشک پیاز، عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه و ارتفاع گیاه در مقایسه با تیمار شاهد شد. در مقابل، افزایش تراکم بوته بطور معنی‌داری ویژگی‌های مورد بررسی را کاهش داد. عارفی و همکاران (Arefi et al., 2012) در پژوهشی گلدانی اثر سطوح مختلف نیتروژن، فسفر و پتاسیم بر عملکرد، فتوسنتز و مقدار کلروفیل موسیر را مطالعه نمودند. نتایج این پژوهش حاکی از این مطلب بود که افزایش نیتروژن تأثیر معنی‌داری در افزایش عملکرد خشک و تر پیاز و میزان نسبی کلروفیل داشت. بر اساس یافته‌های این پژوهش، کاربرد نیتروژن و فسفر تأثیر معنی‌داری بر افزایش فتوسنتز برگ گیاه داشت، ولی پتاسیم تأثیر معنی‌داری بر صفات مورد مطالعه نداشت که احتمالاً به دلیل پتاسیم کافی محیط رشد بوده است. در پژوهش دیگری با استفاده از روش بهینه‌سازی مرکب مرکزی، اثر مدیریت کوددهی نیتروژن (۱۰۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار)، آبیاری (۱۵۰۰ و ۳۵۰۰ متر مکعب) و تراکم کاشت (۱۰ و ۱۸ بوته در متر مربع) بر موسیر ایرانی (*Allium hirtifolium*) مورد بررسی قرار گرفت (Mansouri et al., 2015). بر اساس نتایج این پژوهش در سناریو اقتصادی، مقدار بهینه کود نیتروژن، آبیاری و تراکم به ترتیب برابر با ۲۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار، ۲۲۲۷ متر مکعب آب در هکتار و ۱۶/۷ بوته در متر مربع برآورد شد. پژوهش دیگری نیز به بررسی تأثیر رژیم آبیاری و عمق کاشت بر عملکرد و اجزاء عملکرد

موسیر در شرایط آب و هوایی مشهد پرداخت (Sharif Rohani et al., 2014). کافی و همکاران (Kafi et al., 2012) نیز اثر زمان کشت و تراکم بوته بر عملکرد و صفات مرفوفیزیولوژیکی گیاه موسیر (*Allium altissimum* Regel.) در شرایط آب و هوایی مشهد را بررسی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که به طور کلی در شرایط آب و هوایی مشهد کاشت موسیر در ۲۵ مهر ماه با تراکم ۱۸ بوته در متر مربع برای تولید کورم و تراکم ۱۴ بوته در متر مربع برای تولید بذر عملکرد مطلوبی خواهد داشت.

با توجه به کمبود بارندگی‌ها و کاهش منابع آبی و همچنین نیاز آبی کم موسیر، در سال‌های اخیر کشت موسیر در استان اصفهان مورد توجه قرار گرفته است، به‌طوری‌که در سال ۱۴۰۰ مجموع سطح زیر کشت آبی و دیم آن در استان ۷۰۴ هکتار با تولید ۱۰۰۱۵ تن بوده است، که از این سطح ۵۸۱ هکتار آن کشت آبی با تولید ۸۸۱۵ تن در هکتار می‌باشد (Anonymous, 2022). این گیاه از محصولات درآمدزا در منطقه به شمار می‌آید و حتی قابلیت صادرات و مصرف در اروپا و کشورهای حوزه خلیج فارس را دارد. در همین راستا نیاز است تا بهره‌وری هر یک از عوامل موثر در تولید این گیاه مورد بررسی قرار گیرد. یکی از مهمترین عوامل تولید، خاک مناسب و تعادل صحیح بین عناصر غذایی مورد نیاز گیاه است. برای برداشت بهترین محصول موسیر، کمبود هر یک از عناصر غذایی موجب کاهش محصول می‌شود. از سوی دیگر مقدار هر یک از این عناصر باید متناسب با نیازهای گیاه باشد تا ضمن حفظ کیفیت و سلامت محصول، از هدررفت کود و سرمایه جلوگیری شود. نیتروژن یکی از عناصر ضروری پرمصرف برای گیاهان است که به دلیل شرکت در ساختار بسیاری از مولکول‌های بزرگ مانند پروتئین‌ها، اسیدهای آمینه و اسیدهای نوکلئیک اثر قابل توجهی بر عملکرد گیاه دارد (Zhao et al., 2006). دامنه نیتروژن جذب شده توسط گیاهان پیازدار بسته به رقم، اقلیم، تراکم گیاه و سطح کود و عملکرد بین ۴۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار قرار دارد (Pier et al., 2001). از آنجا که این گیاه غالباً در عرصه‌های منابع طبیعی رشد می‌کند و توسط بهره‌برداران مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیاز است که به منظور حفظ منابع طبیعی و افزایش بهره‌برداری از گیاه موسیر، کشت آن به صورت اقتصادی بومی‌سازی شود. هرچند هم‌اکنون کشت آن با کوددهی بر اساس تجربه کشاورز در حال انجام است. از طرف دیگر با توجه به این که این گیاه نسبت به کوددهی پاسخ نشان می‌دهد، می‌توان سطح بهینه‌ای برای مصرف کود آن به دست آورد. بنابراین با توجه به مطالب بیان شده، از آنجا که مطالعات مدونی درباره اثر کودهای نیتروژنی و کمپوست گاوی گیاه ارزشمند موسیر در کشور انجام نشده است، بنابراین پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تاثیر مقادیر مختلف کودهای نیتروژن و کمپوست گاوی بر عملکرد موسیر و جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم و نترات در منطقه فردوس، شهر استان اصفهان، انجام شد.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک قبل از کشت

Table 1- Chemical and physical properties of soil before culture

ویژگی‌ها Properties

پ-هاش گل اشباع pH of saturated paste	هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع Electrical conductivity of saturated paste extract (EC _e)	کربن آلی Organic carbon (OC)	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (CaCO ₃)	نیتروژن Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	رس Clay	شن Sand	سیلت Silt	بافت Texture
-	dS m ⁻¹	%	mg kg ⁻¹	%	%	%	%	%	%	-
7.37	0.9	1.44	5.5	0.132	15.9	325	21	30	49	لوم

جدول ۲- ویژگی‌های کمپوست گاوی استفاده شده در پژوهش

Table 2- Properties of cow compost used in the study

ویژگی‌ها Properties

پ-هاش (۱:۱۰) pH _{1:10}	هدایت الکتریکی (۱:۱۰) Electrical conductivity (EC _{1:10})	کربن آلی Organic carbon (OC)	نیتروژن کل Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	نسبت کربن به نیتروژن Nitrogen to carbon ratio (C/N)
-	dS m ⁻¹	%	%	%	%	-
7.4	14.3	34.5	1.92	0.89	1.75	17.9

افزار SAS 9.3 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر تیمار کود شیمیایی (اوره)، کمپوست گاوی و برهم‌کنش آن‌ها بر عملکرد تر و خشک کورم موسیر، غلظت و جذب عناصر نیتروژن، فسفر، پتاسیم و غلظت نیترات در کورم گیاه موسیر در سطح آماری یک درصد ($p \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۳). در ادامه به بررسی اثرات متقابل کود اوره و کمپوست گاوی بر ویژگی‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

عملکرد تر و خشک کورم

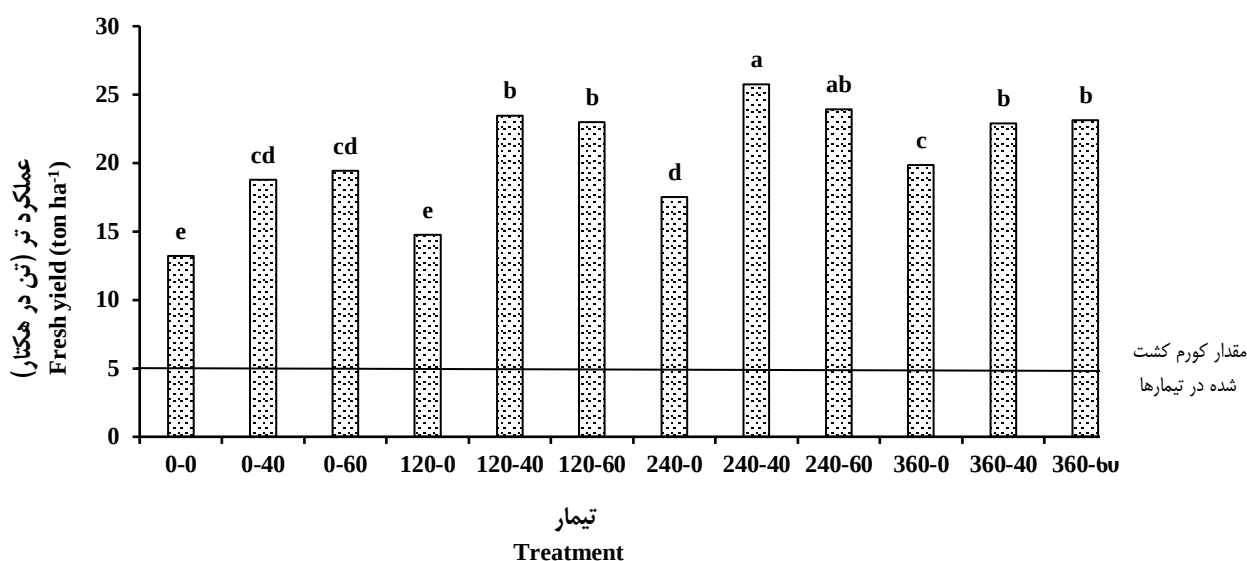
به طور کلی کاربرد کمپوست گاوی و اوره به جز سطح (۰-۱۲۰) باعث افزایش معنی‌دار عملکرد تر کورم موسیر نسبت به تیمار شاهد (۰-۰) شد. بیشترین عملکرد تر کورم موسیر در تیمار کاربرد ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی مشاهده شد (شکل ۱). پس از تیمار ۲۴۰-۴۰ بیشترین عملکرد تر مربوط به تیمار ۲۴۰-۶۰ بود، هرچند تفاوت معنی‌داری با بیشترین عملکرد نداشت. همچنین تفاوت معنی‌داری بین عملکرد تر تیمارهای کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به همراه ۴۰ و ۶۰ تن کمپوست گاوی با تیمارهای ۱۲۰-۴۰ و ۱۲۰-۶۰ مشاهده نشد (شکل ۱). حداقل افزایش وزن کورم‌های برداشت شده نسبت به کورم‌های کشت شده ۲/۶۵ برابر بود که در تیمار شاهد مشاهده شد.

سپس نمونه‌برداری از کورم‌های هر کرت انجام و مقدار عناصر نیتروژن (روش کج‌دلال)، فسفر (روش رنگ‌سنجی مولیبدات-وانادات و قرائت در طول موج ۴۷۰ نانومتر) و پتاسیم (روش نشر شعله با دستگاه فلیم فتومتر) اندازه‌گیری شد (Khanmohammadi et al., 2010). غلظت آنیون نیترات نیز بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۴۱۰۶ در کورم‌های برداشت‌شده اندازه‌گیری شد (Anonymous, 2021). این روش برای اندازه‌گیری نیتريت و نیترات در میوه‌ها، سبزی‌ها و فرآورده‌های آن‌ها استفاده می‌شود. در این روش ابتدا نیترات با آب داغ استخراج شده، سپس پروتئین‌ها با افزودن محلول‌های پتاسیم هگزا سیانوفرات (II) و استات روی رسوب داده می‌شود. پس از صاف کردن محلول به دست آمده، احیای نیترات به نیتريت توسط کادمیوم فلزی انجام و با افزودن سولفانیل آمید کلراید و ان- (۱-نفتیل) اتیلن دی آمید دی هیدرو کلراید به محلول، شدت کمپلکس قرمز رنگ تشکیل شده توسط نیتريت، در طول موج ۵۳۸ نانومتر با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری می‌شود. جذب عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم به وسیله کورم موسیر از حاصل ضرب عملکرد تر در غلظت این عناصر به دست آمد. همچنین پس از برداشت گیاه، نمونه‌برداری از خاک کرت‌های آزمایشی به صورت جداگانه از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری صورت گرفت. خاک‌ها هوا خشک و پس از عبور از الک ۲ میلی‌متری، مقادیر نیتروژن کل به روش کج‌دلال و فسفر قابل دسترس خاک به روش اولسن تعیین شدند (Knudsen et al., 1982). پتاسیم قابل دسترس خاک با استفاده از استات آمونیوم عصاره‌گیری شده و با فلیم فتومتر اندازه‌گیری شد (Olsen and Sommers, 1982). در پایان داده‌ها با استفاده از نرم

جدول ۳- تجزیه واریانس (ANOVA) اثر کود اوره، کمپوست گاوی و اثرات متقابل آن‌ها بر عملکرد تر و خشک، غلظت و جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، غلظت نیترات و میانگین قطر کورم موسیر
Table 3- ANOVA (mean squares) for the effects of urea fertilizer, cow compost and their mutual effects on fresh and dry yield, nitrogen, phosphorus, potassium concentration and uptake, nitrate concentration and mean diameter of shallot

میانگین مربعات Mean square												
غلظت Concentration					جذب Uptake							
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	عملکرد تر Fresh yield	عملکرد خشک Dry yield	نیتروژن Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	نیترات Nitrate (NO3)	نیتروژن Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	میانگین قطر کورم Mean diameter of shallot	
Treatment	11	45.36***	3.41***	0.11**	0.005**	0.73***	139.88***	24554***	1251***	54375***	21.52 ^m	
اوره Urea	3	51.15***	3.32***	0.28***	0.002 ^{ns}	0.35***	193.92***	42357***	1183***	50636***	12.18 ^m	
کمپوست گاوی Cow compost	2	154.3***	11.28***	0.11**	0.009**	0.72***	359.32***	66151***	3881***	110503***	56.61 ^m	
اوره × کمپوست												
گاوی Urea × Cow compost	6	6.15***	0.83**	0.026 ^{ns}	0.005*	0.93***	39.71***	1785 ^{ns}	407**	37536***	14.48 ^m	
خطا Error	24	0.56	0.13	0.02	0.002	0.03	0.905	1593	99.07	1174	24.97	

***، **، * نشان دهنده معنی دار بودن در سطح آماری ۰.۰۰۱، ۰.۰۱ و ۰.۰۵ است. ns نشان دهنده معنی دار بودن در سطح آماری ۰.۰۵ و *، **، *** نشان دهنده معنی دار بودن در سطح آماری ۰.۰۰۱، ۰.۰۱، ۰.۰۵ و ۰.۰۰۱ است. ns indicate significant at $p \leq 0.001$, $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$ and no significant effect respectively.



شکل ۱- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف اوره و کمپوست گاوی بر مقدار عملکرد تر (تن در هکتار) در تیمارهای مورد مطالعه
Figure 1- Comparison of the mean interaction effect of different amounts of urea and cow compost on the amount of fresh yield (ton ha⁻¹) in the studied treatments

و با تأمین بخشی از مواد غذایی مورد نیاز گیاه، رشد و عملکرد گیاه را بهبود بخشیده و کیفیت و سلامت محصول را افزایش می‌دهد (Siedt *et al.*, 2021; Bertola *et al.*, 2021).

بررسی نتایج مربوط به عملکرد خشک نیز نشان داد که بیشترین عملکرد خشک کورم موسیر در تیمار ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی مشاهده شد که افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار شاهد و سایر تیمارها (به جز تیمار ۱۲۰-۴۰) داشت (شکل ۳). مقایسه نتایج عملکرد خشک بین تیمارهای کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار اوره و مقادیر ۴۰ و ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی روندی مشابه عملکرد تر نشان داد (شکل ۳).

غلظت و جذب نیتروژن

بیشترین غلظت نیتروژن به مقدار ۲ درصد و بیشترین جذب نیتروژن به مقدار ۴۶۲ کیلوگرم در هکتار در تیمار ۳۶۰-۴۰ مشاهده شد و تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۳۶۰-۶۰، ۳۶۰-۰، ۲۴۰-۶۰، ۲۴۰-۰ و ۱۲۰-۶۰ نداشت. از طرف دیگر تفاوت معنی‌داری بین تیمار ۳۶۰-۴۰ و تیمارهای شاهد، ۳۶۰-۰، ۱۲۰-۰، ۰-۶۰، ۰-۴۰ و ۱۲۰-۴۰ مشاهده شد (جدول ۴). همچنین غلظت و جذب نیتروژن تفاوت معنی‌داری بین تیمار ۳۶۰-۴۰ و ۲۴۰-۴۰ (تیمار با بیشترین عملکرد تر و خشک) نداشت. یکی از دلایل افزایش نیتروژن کورم‌های موسیر، این است که مقدار زیادی از نیتروژن در طول فصل رشد و در مرحله انتقال مجدد وارد کورم آن می‌شود (Arefi *et al.*, 2012). نتایج پژوهش ارشادی و همکاران (Ershadi *et al.*, 2010) بیانگر افزایش غلظت نیتروژن در کورم گیاه سیر با افزایش مقدار کاربرد کود حاوی نیتروژن تا مقدار ۳۰۰

بررسی نتایج نشان داد که در تیمار تلفیقی ۲۴۰ کیلوگرم کود اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی، وزن کورم‌های برداشت شده نسبت به کورم‌های کشت شده، ۵/۱۵ برابر افزایش یافت. پس از آن، تیمارهای ۲۴۰-۶۰، ۲۴۰-۴۰، ۱۲۰-۴۰، ۳۶۰-۶۰، ۳۶۰-۰ و ۱۲۰-۶۰ به ترتیب با افزایش ۴/۷۹، ۴/۷، ۴/۶۳، ۴/۶، ۴/۵۸ برابری وزن کورم‌های برداشت شده نسبت به کورم‌های کشت شده قرار داشتند (شکل ۱). تصویر کورم‌های کشت شده و نیز کورم‌های برداشت شده در شکل ۲ قابل مشاهده است.

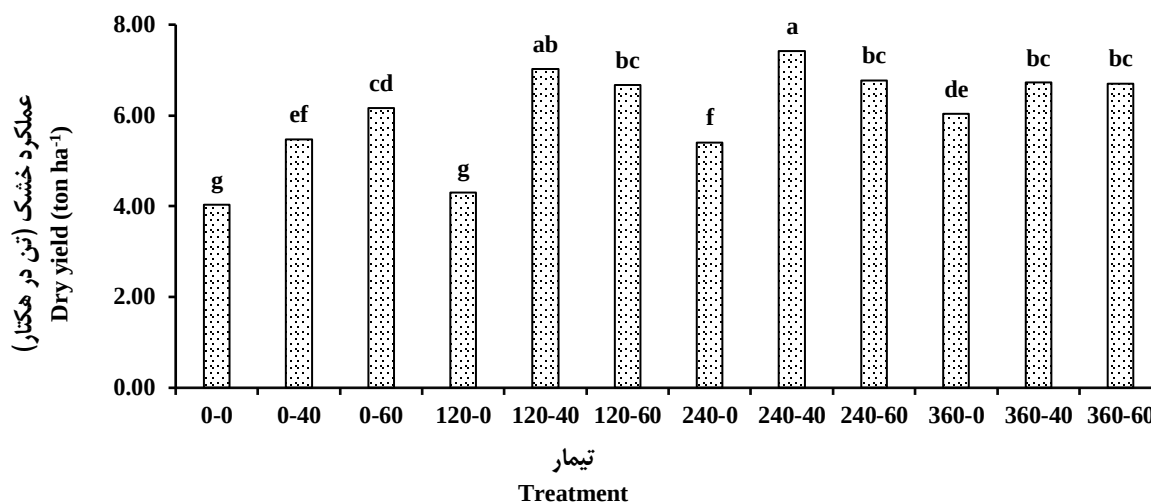
بر اساس پژوهش‌ها کاربرد هم‌زمان کود شیمیایی و کود آلی سبب آزادسازی تدریجی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در هر مرحله رشدی می‌شود. در این شرایط راندمان جذب بسیاری از عناصر غذایی و زمان قابل دسترسی بودن آن‌ها افزایش یافته و شرایط بهتری برای رشد و نمو بیشتر گیاه فراهم می‌گردد (Aalipour *et al.*, 2020). منصور بهمنی و همکاران (Mansor Bahmani *et al.*, 2014) در پژوهشی اثر میزان کود اوره (در هفت سطح ۰، ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۶۰، ۴۵۰ و ۵۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار) بر عملکرد اندام زیرزمینی (سوخ) پیاز در تولید خارج از فصل در دشت جیرفت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش مصرف نیتروژن تا سطح ۲۷۰ کیلوگرم در هکتار، عملکرد اندام زیرزمینی (سوخ) پیاز افزایش می‌یابد و پس از آن افزایش مقدار نیتروژن، عملکرد را کاهش داد؛ هرچند تفاوت آماری معنی‌داری بین تیمار ۲۷۰ و ۱۸۰ کیلوگرم نیتروژن مشاهده نکردند. کمپوست گاوی نیز یک منبع بیولوژیکی ارزشمند است که قادر به افزایش قدرت نگهداری آب توسط خاک، افزایش تنوع میکروبی خاک، بهبود ساختمان فیزیکی خاک و جلوگیری از فرسایش خاک بوده

گیاه و عملکرد موسیر به طور معنی داری افزایش می یابد (Arefi *et al.*, 2012). نیتروژن بخش مهمی از آمینواسیدها اسید نوکلئیک، فلاوین ها، پورفیرین ها، آنزیم ها، کوآنزیم ها و آلكالوئیدها را تشکیل می دهد و در ساخت کلروفیل، دریافت، ذخیره و انتقال انرژی از خورشید (فتوسنتز) و در نهایت بر عملکرد گیاه نقش دارد.

کیلوگرم در هکتار است. پژوهش ها نشان می دهد که کاربرد کودهای دامی، فعالیت میکروبی خاک را تسریع نموده و سبب افزایش کارایی جذب عناصر غذایی نظیر نیتروژن، فسفر و پتاسیم می شود (Shrestha *et al.*, 2020). نتایج پژوهش دیگری نشان داد که با افزایش مقدار کاربرد کود نیتروژن (اوره)، مقدار کلروفیل و در پی آن مقدار فتوسنتز



شکل ۲- مرحله کاشت و کورم های کشت شده (الف)، مرحله داشت (ب) و مرحله برداشت و کورم های برداشت شده (س)
Figure 2- Planting stage and planted corms (A) growing stage (B) and harvesting stage harvested corms (C)



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف اوره و کمپوست گاوی بر مقدار عملکرد خشک (تن در هکتار) در تیمارهای مورد مطالعه
Figure 3- Comparison of the mean interaction effect of different amounts of urea and cow compost on the amount of dry yield (ton ha⁻¹) in the studied treatments

غلظت نیترات

بررسی غلظت نیترات در کورم موسیر نشان داد که به طور کلی غلظت نیترات در موسیر بسیار کمتر از حد مجاز (۵۰۰ میلی گرم در کیلوگرم) اعلام شده بر اساس استاندارد ملی ایران شماره ۱۶۵۹۶ است (Anonymous, 2021). بیشترین غلظت نیترات به مقدار ۲۴/۶۳ میلی گرم در کیلوگرم وزن تازه، در تیمار کاربرد ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی (۱۲۰-۶۰) مشاهده شد که به طور معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود (جدول ۴). پس از تیمار ۱۲۰-۶۰، بیشترین مقادیر نیترات به ترتیب در تیمارهای ۳۶۰-۴۰، ۳۶۰-۶۰ و ۱۲۰-۴۰ مشاهده گردید. به عبارت دیگر غلظت نیترات در تیمارهای حاوی ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره در مقایسه با تیمار ۱۲۰-۶۰ به طور معنی داری کمتر بود و با افزایش مقدار کاربرد اوره به ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار و البته کاربرد هم زمان کمپوست گاوی، غلظت نیترات کورم موسیر مجدد افزایش یافت. این روند افزایش، کاهش و سپس افزایش دوباره غلظت نیترات با افزایش مقدار کاربرد اوره در پژوهش‌های انجام شده در سایر گیاهان نیز گزارش شده است (Yang et al., 2015; Mansor Bahmani et al., 2014). بر اساس پژوهش‌ها در مواردی که مقدار مصرف کود حاوی نیتروژن زیاد باشد معمولاً نیترات جذب شده توسط ریشه‌ها احیا نشده، به برگ‌ها فرستاده شده و در آنجا تجمع می‌یابد. هر چند در این پژوهش نیترات در برگ‌های موسیر اندازه گیری نشد ولی با توجه به نتایج سایر پژوهش‌ها (Mansor Bahmani et al., 2014; Tucker et al., 2004) به نظر می‌رسد که در چنین شرایطی کاهش مقدار نیترات در کورم موسیر با افزایش مقدار کاربرد اوره قابل توجیه باشد.

غلظت و جذب فسفر

غلظت فسفر کورم موسیر در تیمار شاهد و ۱۲۰-۰ کمتر از سایر تیمارها بود. بیشترین غلظت فسفر کورم موسیر در تیمار ۱۲۰ کیلوگرم اوره و ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی مشاهده شد، هر چند تفاوت معنی داری با سایر تیمارهای کودی نداشت. تنها تفاوت معنی دار غلظت فسفر در کورم موسیر بین تیمار شاهد و ۱۲۰-۰ با تیمار ۱۲۰-۶۰ به دست آمد. بیشترین جذب فسفر در کورم موسیر در تیمار ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی (۲۴۰-۴۰) مشاهده شد که با سایر تیمارها به جز ۱۲۰-۶۰، ۱۲۰-۴۰ و ۲۴۰-۶۰ تفاوت معنی داری داشت (جدول ۴). پس از نیتروژن، فسفر مهمترین عنصر غذایی مورد نیاز گیاه است که برای ساختن بسیاری از ترکیبات آلی مانند اسیدهای نوکلئیک، فسفولپیدها، فسفوپروتئین‌ها و کوآنزیم‌ها ضروری است. گیاهان همچنین برای جذب و انتقال انرژی شیمیایی و سوخت و ساز نیازمند فسفر هستند. این عنصر به‌ویژه در گیاهان دارای کورم، در افزایش اندازه کورم و عملکرد، نقش مهمی دارد (Arefi et al., 2012).

غلظت و جذب پتاسیم

غلظت و جذب پتاسیم کورم موسیر در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی به طو معنی داری بیشتر از سایر تیمارها بود. پس از تیمار ۳۶۰-۴۰ بیشترین غلظت پتاسیم به ترتیب در تیمارهای ۲۴۰-۰ و ۲۴۰-۴۰ مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف اوره و کمپوست گاوی بر غلظت و جذب نیتروژن، فسفر، پتاسیم، غلظت نیترات و میانگین قطر کورم موسیر

Table 4- Mean' comparison of on fresh and dry yield, nitrogen, phosphorus, potassium concentration and uptake, nitrate concentration and mean diameter of shallot

تیمار Treatment	نیتروژن Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	نیترات Nitrate (NO ₃)	نیتروژن Nitrogen (N)	فسفر Phosphorus (P)	پتاسیم Potassium (K)	میانگین قطر کورم Mean diameter of shallot
	غلظت Concentration	غلظت Concentration	غلظت Concentration	غلظت Concentration	جذب Uptake	جذب Uptake	جذب Uptake	جذب Uptake
	درصد Percent	درصد Percent	درصد Percent	میلی گرم در کیلوگرم mg kg ⁻¹	کیلوگرم در هکتار kg ha ⁻¹	کیلوگرم در هکتار kg ha ⁻¹	کیلوگرم در هکتار kg ha ⁻¹	میلی متر mm
0-0	1.39 ^c	0.32 ^b	1.52 ^c	1.38 ^h	184.1 ^g	42.2 ^f	201.2 ^f	53.10 ^b
0-40	1.40 ^c	0.39 ^{ab}	1.50 ^c	10.39 ^e	263.0 ^{ef}	73.3 ^{de}	280.6 ^{de}	54.00 ^{ab}
0-60	1.41 ^{bc}	0.42 ^{ab}	1.64 ^{bc}	5.64 ^g	273.4 ^{ef}	82.2 ^{cde}	319.0 ^{cd}	56.5 ^{ab}
120-0	1.40 ^{bc}	0.32 ^b	1.51 ^c	8.50 ^f	207.1 ^{fg}	47.2 ^f	223.1 ^{ef}	53.17 ^b
120-40	1.50 ^{bc}	0.34 ^{ab}	1.50 ^c	16.23 ^c	351.3 ^{cd}	80.8 ^{cde}	351.0 ^c	59.26 ^{ab}
120-60	1.60 ^{abc}	0.46 ^a	1.51 ^c	24.63 ^a	368.8 ^{bcd}	105.8 ^{ab}	346.5 ^c	55.38 ^{ab}
240-0	1.41 ^{bc}	0.40 ^{ab}	2.05 ^b	6.30 ^g	247.7 ^{fg}	70.2 ^e	359.3 ^c	54.84 ^{ab}
240-40	1.63 ^{abc}	0.41 ^{ab}	1.75 ^{bc}	14.40 ^d	419.3 ^{ab}	106.6 ^a	449.5 ^b	57.94 ^{ab}
240-60	1.63 ^{abc}	0.40 ^{ab}	1.50 ^c	10.79 ^e	390.4 ^{bc}	96.4 ^{abc}	358.0 ^c	45.26 ^{ab}
360-0	1.63 ^{abc}	0.41 ^{ab}	1.27 ^c	5.44 ^g	322.7 ^{de}	81.5 ^{cde}	251.0 ^{ef}	55.16 ^{ab}
360-40	2.01 ^a	0.41 ^{ab}	3.13 ^a	17.31 ^c	462.1 ^a	94.2 ^{abc}	717.3 ^a	62.27 ^a
360-60	1.81 ^{ab}	0.39 ^{ab}	1.40 ^c	19.57 ^b	421.1 ^{ab}	89.8 ^{bcd}	325.5 ^{cd}	54.58 ^{ab}

کیلوگرم کود اوره در هکتار و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی (در مقایسه با مقادیر بیشتر کوددهی)، ضمن عملکرد بالا، کورم‌هایی با قطر و اندازه مناسب تولید می‌شوند که بازارپسند بوده و به علت قیمت فروش بیشتر، بازده اقتصادی بهتری به دنبال دارد. اثر کاربرد کود دامی بر افزایش میانگین قطر کورم موسیر در پژوهش دیگری نیز گزارش شده است (Amirkhani et al., 2022).

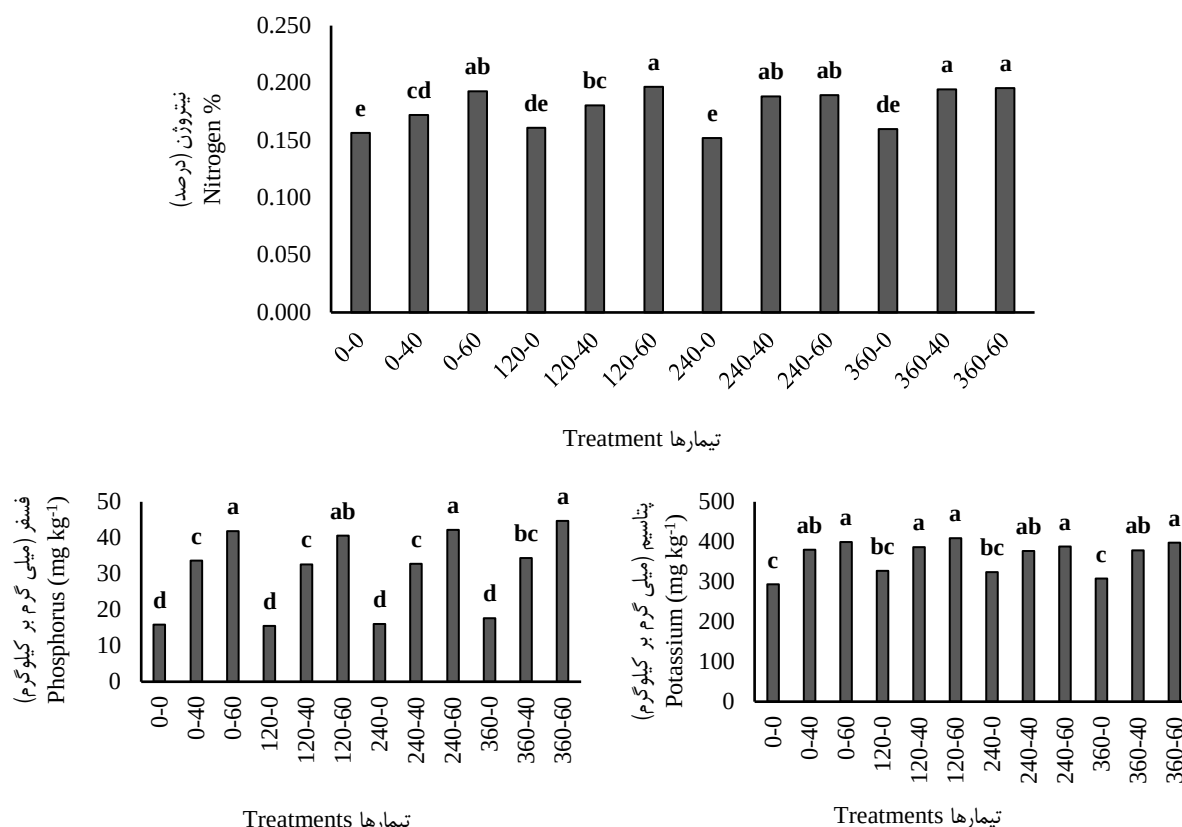
غلظت عناصر نیتروژن، فسفر و پتاسیم در خاک

مقایسه میانگین اثرات متقابل مقدار نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک پس از برداشت، نشان داد که در هر یک از مقادیر مشخص کاربرد اوره، استفاده از کمپوست گاوی و افزایش مقدار کاربرد آن سبب تغییرات معنی‌دار مقدار این عناصر در خاک شده است (شکل ۴)، به طوری که حداقل غلظت‌های نیتروژن، فسفر و پتاسیم در تیمارهای شاهد و پس از آن در تیمارهای فقط کود اوره مشاهده شد (شکل ۴). غلظت نیتروژن خاک پس از برداشت تیمارهای حاوی کمپوست گاوی با افزایش سطح کوددهی نیتروژن افزایش یافت هرچند در برخی موارد تفاوت معنی‌داری ندارد. بنابراین تیمارهای حاوی کمپوست گاوی سطح نیتروژن خاک را افزایش داده و باعث بهبود شرایط خاک پس از برداشت می‌شود (شکل ۴). روند نسبتاً مشابهی در مورد عناصر فسفر و پتاسیم خاک پس از برداشت نیز مشاهده شد (شکل ۴).

از سوی دیگر افزایش مجدد غلظت نیترات با افزایش سطح کاربرد اوره به ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار می‌تواند به این دلیل باشد که ظرفیت احیا نیترات توسط برگ‌ها نیز محدود است. در زمانی که مقدار کاربرد کودهای نیتروژن بیش از نیاز گیاه باشد، برگ‌ها توانایی احیا نیترات اضافه را ندارند و نیترات به سمت کورم گیاه یعنی محل مصرف حرکت کرده و در آنجا تجمع می‌یابد. به عبارت دیگر احتمالاً حرکت نیترات از ریشه به برگ و از برگ به کورم یا اندام زیرزمینی، دلیل افزایش مجدد نیترات پس از یک روند کاهشی با افزایش مقدار کاربرد کودهای نیتروژن‌دار است (Mansor Bahmani et al., 2014; Tucker et al., 2004).

میانگین قطر کورم

بیشترین میانگین قطر کورم موسیر در تیمار کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۴۰ تن در هکتار کمپوست گاوی (۶۲/۲۷ میلی‌متر) مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد (۵۳/۱ میلی‌متر) و ۰-۱۲۰ داشت. مقایسه میانگین قطر کورم موسیر بین سایر تیمارها حاکی از عدم وجود تفاوت معنی‌دار آماری بود. همچنین میانگین قطر کورم موسیر در تیمار ۴۰-۳۶۰ تفاوت معنی‌داری با تیمار ۲۴۰-۲۴۰ یعنی تیمار با بیشترین عملکرد تر و خشک و بیشترین افزایش درصد متوسط وزن کورم برداشت شده نسبت به کورم کشت شده، نداشت (جدول ۴). این یافته حاکی از این است که در کوددهی تلفیقی در مقادیر ۲۴۰



شکل 4- مقایسه میانگین اثر متقابل مقادیر مختلف اوره و کمپوست گاوی بر غلظت نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک پس از برداشت کورم موسیر

Figure 4- Comparison of the mean interaction effect of different amounts of urea and cow compost on post-harvest soil nitrogen, phosphorus and potassium concentration

تن در هکتار کمپوست گاوی می‌تواند بیشترین جذب نیتروژن به وسیله کورم موسیر را فراهم نماید. از سوی دیگر غلظت نیترات در کورم موسیر نیز در تیمار ۴۰-۲۴۰ به طور معنی‌داری کمتر از تیمارهای کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به همراه ۴۰ یا ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی بود. همچنین مقادیر عناصر غذایی (N,P,K) خاک پس از برداشت در این تیمار به طور معنی‌داری از تیمار شاهد و فقط کوددهی اوره بیشتر بود که می‌تواند از فقر خاک از عناصر غذایی جلوگیری کند. به علاوه افزایش بیشتر کمپوست گاوی (۶۰ تن در هکتار) تاثیر معنی‌داری در مقادیر عناصر خاک پس از برداشت نداشت. با توجه به نتایج، برای حصول بهترین عملکرد، مناسب‌ترین سطح کاربرد اوره ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار و بهترین سطح استفاده از کمپوست گاوی ۴۰ تن در هکتار پیشنهاد می‌شود. به نظر می‌رسد که استفاده از مقادیر بیشتر اوره یا کمپوست گاوی فقط سبب اعمال هزینه اضافه بر کشاورز و هدررفت سرمایه شود؛ به علاوه می‌تواند سبب افزایش آلودگی محیط‌زیست، افزایش غلظت نیترات و کاهش کیفیت محصول گردد.

همچنین در بین تیمارهای حاوی کمپوست گاوی تیمار ۴۰-۲۴۰ غالباً غلظت عناصر کمتری نسبت به سایر تیمارها داشت که می‌تواند به دلیل عملکرد بیشتر این تیمار و افزایش جذب عناصر از خاک باشد؛ هرچند تفاوت‌ها معنی‌دار نیست.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که کاربرد تلفیقی کود شیمیایی (اوره) و کمپوست گاوی اثر معنی‌داری بر افزایش عملکرد کورم گیاه موسیر دارد، به گونه‌ای که بیشترین عملکرد کورم موسیر در تیمار تلفیقی کود اوره ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار و کمپوست گاوی ۴۰ تن در هکتار به دست آمد. علی‌رغم آنکه بیشترین غلظت و جذب نیتروژن در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار اوره به همراه ۶۰ تن در هکتار کمپوست گاوی مشاهده شد، اما تفاوت معنی‌داری با تیمار ۴۰-۲۴۰ (تیمار بیشترین عملکرد) نداشت. به عبارت دیگر کاربرد ۲۴۰ کیلوگرم اوره به همراه ۴۰

1. Aalipour, H., Nikbakht, A., & Etemadi, N. (2020). Biochemical response and interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria during establishment and stimulating growth of Arizona cypress (*Cupressus arizonica* G.) under drought stress. *Scientia Horticulturae*, 261, 108923. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108923>
2. Anonymous. (2022). Organization of Agriculture Jihad, Isfahan.
3. Anonymous. a. (2021). Agricultural products -Maximum level for nitrate and test method, INSO 16596. 1st revision. Iranian National Standardization Organization.
4. Anonymous. b. (2021). Test method for measuring nitrite and nitrate in fruits and vegetables and their products through molecular interferometry. NO, 4106. Iranian National Standardization Organization.
5. Amirkhani, R., Arouiee, H., & Ghasemi pirbalooti, A. (2022). Effect of the Application of chemical, organic and biological fertilizers on yield and biochemical traits of Iranian shallot. *Journal of Agroecology*, 15(1), 31-49. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/AGRY.2021.69445.1030>
6. Arefi, I., Kafi, M., Khazaie, H., & Bannayan Aval, M. (2012). Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertiliaer levels on yield, photosynthetic rate, photosynthetic pigments, chlorophyll content and nitrogen concentration of plant components of *Allium altissimum* Regal. *Journal of Agroecology*, 4(3), 207-214. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAGV4I3.15309>
7. Arefkhani, M., Kheirkhah, M., Ghorbanzadeh Naghab, M., & Babaeian, M. (2016). Effect of initial weight of shallot Bulb and farm manure on reproduction and shallot yield (*Allium altissimum* Regel.) in Shirvan climate. *Journal of Agroecology*, 9(3), 749-759. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V9I3.50987>
8. Askari-Khorasgani, O., & Pessarakli M. 2019. Agricultural management and environmental requirements for production of true shallot seeds – a review. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 9(2), 318-322. <https://doi.org/10.15406/apar.2019.09.00441>
9. Bertola, M., Ferrarini, A., & Visioli, G. (2021). Improvement of soil microbial diversity through sustainable agricultural practices and its evaluation by-omics approaches: A perspective for the environment, food quality and human safety. *Microorganisms*, 9(7), 1400. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9071400>
10. Davazdahemami, S. (2021). *Allium hirtifolium* Boiss. Production. Publication No. 59710. Research Institute of Forests and Rangelands. Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO).
11. Ershadi, A., Noori, M., Dashti, F., & Bayat, F. (2010). Effect of different nitrogen fertilizer on yield, pungency and nitrate accumulation in garlic (*Allium sativum*). *Acta Horticultural*, 853(15), 135-138. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2010.853.15>
12. Farhadi, N., & Alizadeh Salte, S. (2017). The effect of forchlorfenuron on bulblet formation, antioxidant characteristics and phytochemicals compounds on Persian shallot (*Allium hirtifolium*). *Journal of Horticultural Science*, 31(3), 565-576. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V31I3.56997>
13. Fritsch, R.M., & Abbasi, M. (2013). A taxonomic review of *Allium* subg. *Melanocrommyum* in Iran. IPK Gatersleben. ISBN 978-3-9813096-3-8
14. Jafari-Mofidabadi, A., & Rezaee, M.B. (2015). Domestication of Persian shallot (*Allium hirtifolium*) as cultivated crop. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 4(1), 9-12. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/JMPB.2015.108885>
15. Kafi, M., Rezvan Beydokhti, Sh., & Sanjani, S. (2012). Effect of sowing date and plant density on yield and morphophysiological traits of Perssian shallot (*Allium altissimum* Regel) in Mashhad climate condition. *Journal of Horticultural Science*, 25(3), 310-319. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V1390I0.11338>
16. Khanmohammadi, Z., Khoshgoftarmanesh, A.H., & Melali, A.H. (2010). *Methods of plant analysis*. Academic Jihad Publishing Center, Isfahan Industrial Unit.
17. Kheirkhah, M., Mohammadkhani, F., & Ghorbanzadeh, M. (2017). The effect of different levels of phosphorus fertilizer and different planting density on yield and yield component of Persian shallot (*Allium altissimum* Regel.). *Plant Ecophysiology*, 8(27), 174-181. (In Persian with English abstract)
18. Knudsen, D., Peterson, G.A., & Pratt, P.F. (1982). Lithium, sodium, and potassium. PP. 225–246. In: A. L. Page, R.H. Miller, D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis*, Part 2, Chemical Methods, SSSA/ASA, Madison, Wisconsin.
19. Mansor Bahmani, S., Saffari, V.R., & Maghsoudi Moud, A.A. (2014). Effect of the amount and time of partitioning of nitrogen fertilizer on the yield and nitrate content of onion in out-season production in Jiroft. *Journal of Horticultural Science*, 27(4), 400-410. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JHORTS4.V0I0.30582>
20. Mansouri, H., Banayan Aval, M., Rezvani Moghaddam, P., & Lakzian, A. (2015). Management of nitrogen, irrigation and planting density in Persian shallot (*Allium hirtifolium*) by using central composite optimizing method. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, 24(4-1), 41-60. (In Persian with English abstract)
21. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). Phosphorus. PP. 403–430. In: Page, A. L., R. H. Miller and D. R. Keeney

- (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical Methods*. Agronomy Monographs, SSSA/ASA, Madison, Wisconsin.
22. Panahandeh, J., Farhadi, N., Motallebi Azar, A., & Alizadeh Salte, S. (2016). Evaluation of Persian shallot (*Allium hirtifolium*) ecotypes for phytochemical components and antioxidant activity. *Journal of Medicinal Plants and By-products*, 5(2), 217-226. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/JMPB.2016.109399>
 23. Pire, R., Ramirez, H., Riera, J., & Gómez de, T.N. (2001). Removal of N, P, K and Ca by an onion crop (*Allium cepa* L.) in a silty-clay soil, in a semiarid region of Venezuela. *Acta Horticulturae*, 555, 103-109. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2001.555.12>
 24. Sharif Rohani, M., Kafi, M., & Nezami, A. (2014). The effect of irrigation regime and sowing depth on yield and yield components of Persian shallot (*Allium altissimum* Regel.) in Mashhad climate conditions. *Journal of Agroecology*, 6(2), 219-228. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JAG.V6I2.39364>
 25. Shrestha, J., Shah, K.K., & Timsina, K.P. (2020). Effects of different fertilizers on growth and productivity of rice (*Oryza sativa* L.): A review. *International Journal of Global Science Research*, 7(1), 1291-1301. <https://doi.org/10.26540/ijgsr.v7.i1.2020.151>
 26. Siedt, M., Schaffer, A., Smith, K.E., Nabel, M., Rob-Nickoll, M., & van Dongen, J.T. (2021). Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment*, 751(1), 141607.
 27. Tucker, D.E., Allen, D.J., & Ort, D.R. (2004). Control of nitrate reductase by circadian and diurnal rhythms in tomato. *Planta*, 219(2), 277-285. <https://doi.org/10.1007/s00425-004-1213-x>
 28. Yang, S., Peng, S., Xu, J., He, Y., & Wang, Y. (2015). Effects of water saving irrigation and controlled release nitrogen fertilizer managements on nitrogen losses from paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 13, 71-80. <https://doi.org/10.1007/s10333-013-0408-9>
 29. Zhao, R.F., Chen, X.P., Zhang, F.S., Zhang, H., Schroder, J., & Romheld, V. (2006). Fertilization and nitrogen balance in a wheat -maize rotation system in North China. *Agronomy Journal*, 98, 935-945.



The Effect of Rock Phosphate Acidification and Vermicompost on Phosphorus Release Kinetics in a Calcareous Soil

Z. Sokhanvar Mahani^{1*}, N. Boroomand², M. Sarcheshmeh Pour³

Received: 27-04-2023

Revised: 13-08-2023

Accepted: 15-08-2023

Available Online: 16-08-2023

How to cite this article:

Sokhanvar Mahani, Z., Boroomand, N., & Sarcheshmeh Pour, M. (2023). The effect of acidification rock phosphate and vermicompost on phosphorus release kinetics in calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 575-588. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82137.1277>

Introduction

Phosphorus (P) is one of the most important elements necessary for plant growth and production of agricultural products. In calcareous soils, phosphorus deficiency is a general issue due to high pH, high soil calcium carbonate content, lack of organic matter and moisture. Phosphorus absorption capacity depends on different soil reactions such as: adsorption, sedimentation, stabilization and release. The speed and amount of plant available P depends on the soil reactions. Studying the kinetics of P release from soil is a good indicator to check the status of P uptake by plant. The kinetics of P release in soils is a subject of importance in soil and environmental sciences. The aim of this research was to investigate the kinetics of P release and derive the most suitable equation to describe the release of P from a calcareous soil when subjected to the acidification of rock phosphate and the addition of vermicompost.

Materials and Methods

In order to investigate the ability of acidified rock phosphate and vermicompost in P release, an experiment was conducted with 2 replications on a light-textured soil with low OC and Olsen-P (1.2 mg/kg). One hundred grams air dried calcareous soil was transferred into special containers and 5 treatments including: 1- control (soil), 2- rock phosphate, 3- acidified rock phosphate (20 CC nitric acid 0.1 N and 5 g rock phosphate), 4- vermicompost, and 5- acidified vermicompost (20 CC nitric acid 0.1 N and 5 g vermicompost) were applied. The treatments incubated two weeks in 20±2°C temperature. The Kinetics of P release was studied by adding 20 mL of 0.5N NaHCO₃ to, one gram of air dried treatments. Extraction times were considered to be 0.25 h to 256 h (in 11 times) based on the time of adding the NaHCO₃ extractant until filtering. After adding the extractant, the samples were shaken and centrifuged. After filtering, the concentration of released P in samples were determined by spectrophotometer (Model: CE 292 Series2, ultraviolet). For higher accuracy in the measurements, acid-washed containers were adjusted based on the amount of soil moisture which was dried in the oven (105°C). Finally, the P release data were fitted to different kinetic equations. The effect of different fertilizer treatments on P release in specified times and then kinetics parameters were investigated and compared with the control.

Results and Discussion

Addition of acidified and non acidified rock phosphate and vermicompost increased the amount and speed of P release in the calcareous soil. Six kinetic equations were fitted to describe the release of P in the period of 0.25 h to 256 h from the soil to evaluate the effect of the treatments. The highest release of P was in vermicompost and acidified rock phosphate treatment, which were an organic fertilizer and a source for preparing phosphate

1, 2 and 3- Master's Degree and Associate Professors, Department of Soil Science., Faculty of Agriculture., Shahid Bahonar University of Kerman, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Z.sokhanvar@agr.uk.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.82137.1277](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82137.1277)

fertilizers. To describe the release rate, kinetic equations were used. The best equations were chosen by highest coefficient of determination (R^2) and the least of standard error (SE). The zero, first, second order equations could not describe the release of P in the studied calcareous soil. The R^2 value decreased from the zero to second order equation. The simplified Elovich equation described well the release of P from the soil with the average R^2 of 0.79 and with the average SE of 0.4. Comparison of the average effect of the studied treatments with the control showed that the acidified vermicompost and rock phosphate treatments increased the capacity and speed of P release compared to the control. On the other hand, acid addition has increased the capacity and speed of P release in the calcareous soil.

Conclusion

The findings indicated an initial rapid release of P, which then decreased over time. Notably, the application of vermicompost and the acidification of the soil with rock phosphate resulted in a pronounced and accelerated release of P. Generally, organic fertilizer treatments exhibited a higher release of P compared to chemical fertilizer treatments. This observation is in accordance with the findings of the data presented by Ghorbanzadeh et al. (2009), who explored the P release potential of bone meal. Their data demonstrated that the acidification of bone meal accelerated and enhanced P release. To further enhance the practical relevance of these results, it is recommended to conduct this research in the presence of plants.

Keywords: Kinetics, Kinetic equations, Organic fertilizer, Rock phosphate, Vermicompost



مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۷۵-۵۸۸

تأثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی

زینب سخنور ماهانی^{۱*} - ناصر برومند^۲ - مهدی سرچشمه پور^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۴

چکیده

فسفر یکی از مهمترین عناصر ضروری برای رشد گیاهان و تولید محصولات کشاورزی است. در خاک‌های آهکی به علت pH بالا، درصد زیاد کربنات کلسیم، کمبود مواد آلی و رطوبت؛ کمبود فسفر به صورت یک عارضه عمومی دیده می‌شود. قابلیت جذب فسفر تابع واکنش‌های مختلف خاک است. سرعت و مقدار آزادسازی فسفر قابل استفاده تابع واکنش‌های خاک و زمان انجام این واکنش‌ها می‌باشد. اطلاعات درباره سرعت آزاد شدن فسفر در خاک آهکی محدود می‌باشد. مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر از خاک شاخص خوبی برای بررسی وضعیت جذب فسفر توسط گیاه می‌باشد. هدف از این تحقیق مطالعه سینتیک رهاسازی فسفر و به دست آوردن بهترین معادله برای توجیه رهاسازی فسفر از یک خاک آهکی تحت تأثیر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بود. در این مطالعه به منظور بررسی توان خاک فسفات و ورمی کمپوست اسیدی شده در رهاسازی فسفر آزمایشی با ۲ تکرار و ۵ تیمار شامل: ۱- شاهد، ۲- خاک فسفات، ۳- خاک فسفات اسیدی شده، ۴- ورمی کمپوست و ۵- ورمی کمپوست اسیدی شده انجام شد و پس از دو هفته انکوباسیون در دمای $20 \pm 2^\circ\text{C}$ میزان فسفر رهاسازده نمونه‌ها با دستگاه اسپکتروفتومتر در زمان‌های ۰/۲۵ تا ۲۵۶ ساعت اندازه‌گیری شد. شش مدل سینتیکی برای توصیف رهاسازی فسفر مورد استفاده قرار گرفت. معادله الوویچ ساده شده با میانگین ضرایب تبیین (R^2) ۰/۷۹ و با میانگین خطای معیار (SE) ۰/۴ در تمام تیمارها رهاسازی فسفر از خاک را به خوبی توصیف کرد. نتایج نشان داد که در ابتدا رهاسازی فسفر سریع و با گذشت زمان کاهش یافت. اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست منجر به تسریع و افزایش رهاسازی فسفر گردید. نتایج همچنین نشان داد که با اسیدی کردن ورمی کمپوست، به دلیل کاهش pH می‌تواند موجب کاهش تثبیت فسفر در تیمارهای حاوی مواد آلی نسبت به کود شیمیایی شود و فسفر سریع‌تر از این منبع آلی رها گردد.

واژه‌های کلیدی: خاک فسفات، سینتیک، کود آلی، معادلات سینتیکی، ورمی کمپوست

(Mahmoud Soltani et al., 2011).

مقدمه

یکی از مشکلات عمده خاک‌های ایران کمبود فسفر است (Frišták and Soja, 2015). در خاک‌های آهکی وجود pH بالا، درصد زیاد کربنات کلسیم، کمی مواد آلی و خشکی خاک باعث شده که مقدار قابل جذب فسفر کمتر از مقدار لازم برای تأمین رشد بهینه اکثر محصولات کشاورزی باشد (Spinks and Barber, 1947; Tisdale et al., 1993).

فسفر یکی از عناصر ضروری برای گیاهان است که از دیدگاه‌های مختلف کشاورزی، زیست‌محیطی، شیمی خاک و حفاظت پایدار آن مورد توجه محققان واقع شده است (Meissner et al., 2008; Lee et al., 2004). فسفر در بین عناصر غذایی بعد از نیتروژن مهم‌ترین عامل محدود کننده تولیدات کشاورزی در بیشتر مناطق جهان و ایران می‌باشد. منابع فسفر محدود بوده و امکان اتمام آنها وجود دارد

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و دانشیاران گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Z.sokhanvar@agr.uk.ac.ir)

اسیدهای به کار رفته اسیدفسفریک بیشترین تأثیر را در کاهش مقدار pH خاک داشت.

به منظور افزایش کارایی استفاده فسفر، کاربرد منابع آلی به همراه کودهای شیمیایی و یا به صورت جداگانه در مدیریت حاصلخیزی خاک مناسب‌تر از کودهای شیمیایی است (Eghball et al., 2005). لذا امروزه تأکید زیادی بر به کارگیری روش‌های کشاورزی پایدار می‌شود. ماده آلی خاک از شاخص‌های مهم کیفیت خاک و از ارکان مهم کشاورزی پایدار است (Stevenson, 1994). کودهای آلی می‌توانند پویایی فسفر در خاک از طریق بلوکه کردن مکان‌های جذب و رقابت بین اسیدهای آلی با فسفر برای جذب تحت تأثیر قرار داده و جذب فسفر توسط اجزای خاک را کاهش دهد. همچنین اسیدهای آلی شکل و سرعت تبدیل کانی‌های فسفات کلسیم را تغییر داده و از این طریق فراهمی فسفر در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Uygun and Karabatak, 2009).

یکی از روش‌های مرسوم برای جبران کمبود عناصر غذایی در خاک‌های آهکی استفاده از کودهای شیمیایی حاوی این عناصر می‌باشد، اما این روش چندان تأثیرگذار نیست زیرا عناصر غذایی به سرعت به شکل غیر قابل دسترس تبدیل می‌شوند (Wiedenfled, 2011).

با توجه به اهمیت ماده آلی در خاک و از آنجایی که در اکثر خاک‌های تحت کشت ایران، محتوای ماده آلی زیر یک درصد است، امروزه استفاده از ترکیبات آلی مختلف مانند کودهای دامی، بقایای گیاهی و ورمی کمپوست در اراضی زراعی توصیه می‌شود (Lim et al., 2015b; Wei et al., 2020).

یکی از ویژگی‌های مثبت ورمی کمپوست که از نظر حاصلخیزی خاک اهمیت زیادی دارد، رهاسازی عناصر غذایی در خاک است (Edwards, 1995).

برای مطالعه پویایی فسفر بین فاز محلول و جامد خاک می‌توان از آزمایش‌های سینتیکی بهره گرفت، آزمایش‌های سینتیکی با هدف مطالعه ماهیت، ظرفیت و سرعت جذب و رهاسازی فسفر توسط اجزای خاک طراحی شده‌اند (Nafilu, 2009).

مدل‌های مختلفی برای توصیف داده‌های رهاسازی فسفر در خاک ارائه شده است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به مدل (Hejazi Mehrizi et al., 2016) مرتبه صفر، مرتبه اول، مرتبه دوم، الویج ساده، انتشار پارابولیک (پخشیدگی پارابولیکی) و تابع نمایی (توانی) اشاره کرد (Labafzadeh, 2015). در مطالعه لباف زاده (Labafzadeh, 2021) در خاک آهکی تیمار شده با بیوجار، معادله شبه مرتبه اول و پخشیدگی درون ذره‌ای بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر نشان داد. زرین کلاه و همکاران (Zarinkolah et al., 2019) در مطالعه سینتیکی رهاسازی فسفر از خاک‌های آهکی تیمار شده با منابع مختلف آلی شامل باگاس نیشکر و پوسته چوبی گردو و بیوجار آنها به

خاک فسفات که ماده اولیه تهیه کودهای فسفاته است جز منابع غیر تجدید شونده بوده و معادن آن در چند نقطه دنیا از جمله شمال آفریقا، ایران، ایالات متحده، روسیه، چین و مراکش یافت می‌شود که چهار کشور اخیر ۷۵ درصد خاک فسفات دنیا را تولید می‌کند (Van Kauwenbergh, 2001).

کاربرد مستقیم خاک فسفات به عنوان یک کود فسفره که از ساده‌ترین و کم هزینه‌ترین روش‌های تامین فسفر گیاه محسوب می‌شود، عمدتاً در خاک‌های اسیدی توصیه شده است، ولی در خاک‌های آهکی به علت وجود pH و کربنات کلسیم بالا، حلالیت خاک فسفات ناچیز بوده و استفاده آن ثمر بخش نیست (Salim-pour et al., 2010).

به منظور کاهش هزینه‌های تولید کودهای فسفاته و کاربرد مستقیم خاک فسفات، روش‌های متفاوتی توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله این روش‌ها می‌توان به کاربرد خاک فسفات همراه با مواد آلی، گوگرد، اسید، سوپر فسفات، باکتری‌های حل کننده فسفات و یا باکتری‌های تیوباسیلوس اشاره نمود (Rosa et al., 1989). فسفر در خاک واکنش‌های گوناگونی مانند جذب سطحی، رسوب، تثبیت و رهاسازی دارد (Kuo and Lotse, 1972). این واکنش‌ها نقش مهمی در عرضه فسفر برای گیاهان، تعیین نیاز کودی و همچنین تعیین سرنوشت زیست محیطی فسفر و کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی دارند (Wang et al., 2011). فرایندهای جذب سطحی و رسوب توسط کانی‌های کربنات کلسیم به عنوان سازوکار اصلی کاهش فراهمی فسفر در خاک‌های آهکی شناخته شده است به طوری که در غلظت‌های کم اورتو فسفات (کمتر از $10^{-4.5}$ مولار) جذب سطحی (Tunesi et al., 1999) و در غلظت‌های بالاتر رسوب کانی‌های کم محلول فسفات کلسیم، بخش عمده‌ای از فسفر را به صورت غیر قابل دسترس برای گیاه تبدیل می‌کند (Delgado and Torrent, 2000).

استفاده از اسیدهای معدنی در خاک‌های آهکی به دلیل تأثیر آن‌ها در کاهش مقدار pH محلول خاک رایج می‌باشد (Bertrand et al., 1979; Khorasandi, 1994; Ryan and Stroehlein, 2006). کاربرد این اسیدها در کنار کودهای شیمیایی باعث افزایش قابلیت جذب برخی عناصر غذایی شده و در نهایت منجر به افزایش عملکرد می‌شود (Mikkelsen and Jarrell, 1987; Miyamoto et al., 1975). اختر و همکاران (Akhtar et al., 2016) با مقایسه کاربرد سه منبع کود فسفوری دی آمونیوم فسفات، سوپر فسفات تریپل و اسیدفسفریک در مزرعه گندم گزارش نمودند که بیشترین عملکرد در مورد اسیدفسفریک به دست آمد. اعتمادیان و همکاران (Etemadian et al., 2018) به منظور بررسی رهاسازی عناصر غذایی با مقایسه اسیدهای آلی و معدنی پنج منبع اسیدهای سیتریک، اگزالیک، استیک، سولفوریک و فسفریک با غلظت‌های ۱، ۵ و ۱۰ میلی‌مولار (۲۵ میلی لیتر محلول و ۱۰ گرم خاک) انجام دادند، گزارش نمودند از بین

هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی شدن با اسید (Nelson, 1987)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، فسفر کل به روش تیزآب سلطانی (Hossner, 1996) و درصد اشباع (SP) با استفاده از گل اشباع (Rhoades, 1982) اندازه گیری شد.

سینتیک رهاسازی فسفر از خاک

برای انجام آزمایشات سینتیک، ۱۰۰ گرم خاک هوا خشک در ظروف، ریخته شد. سپس تیمارهای آزمایشی شامل ۱- شاهد، ۲- ۵ گرم خاک فسفات، ۳- ۵ گرم خاک فسفات فسفات اسیدی شده با ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۱ نرمال (Ghorbanzadeh et al., 2009; Etemadian et al., 2018)، ۴- ۵ گرم ورمی کمپوست و ۵- ۵ گرم ورمی کمپوست اسیدی شده با ۲۰ میلی لیتر اسید نیتریک ۰/۱ نرمال (Etemadian et al., 2018 Ghorbanzadeh et al., 2009;) روی خاک اعمال گردید و در شیکر انکوباتور مدل SAJ 27، در دمای 20 ± 2 درجه سانتی گراد به مدت ۱۴ روز در دو تکرار مورد استفاده قرار گرفت. شرایط خوابانیدن در شیکر انکوباتور و رطوبت خاک در مدت آزمایش تقریباً در حد ظرفیت مزرعه نگهداری شد. پس از سپری شدن مدت زمان خوابانیدن، نمونه ها خارج و پس از هوا خشک شدن به منظور بررسی سینتیک رهاسازی فسفر به یک گرم از نمونه های هوا خشک شده ۲۰ میلی لیتر عصاره گیر بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار اضافه گردید. پس از افزودن عصاره گیر در تکان دهنده رفت و برگشتی با سرعت ۱۴۰ دور در دقیقه به مدت پنج دقیقه و سپس پنج دقیقه سانتریفیوژ کردن با سرعت ۲۵۰۰ دور در دقیقه و بلافاصله صاف کردن با کاغذ صافی ۴۲، عصاره گیری به روش اولسن انجام شد. زمان های عصاره گیری شامل ۰/۵، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۳۲، ۶۴، ۱۲۸، ۲۵۶ ساعت بر مبنای زمان اضافه کردن عصاره گیر بی کربنات سدیم تا صاف کردن در نظر گرفته شد.

پس از قرائت غلظت فسفر در نمونه ها با دستگاه اسپکتروفتومتر دیجیتال Ultraviolet مدل Series2 CE 292، در طول موج ۸۸۰ نانومتر تعیین شد. میانگین تکرارها به عنوان غلظت فسفر رهاسده در هر زمان انتخاب گردید و نتایج بر اساس مقدار رطوبت خاک که در آن (105°C) خشک شد اصلاح گردید. سرانجام داده های رهاسازی فسفر با معادلات سینتیک مختلف (جدول ۱) برازش داده شد. تاثیر تیمارهای مختلف کودی در یک زمان مشخص بر سینتیک رهاسازی فسفر و پارامترهای سینتیک بررسی شده و با شاهد مقایسه گردید.

این نتیجه رسیدند معادله تابع توانی به خوبی توانست سرعت رهاسازی فسفر از خاک ها را توصیف نماید. سرعت رهاسازی فسفر در خاک های تیمار شده با بیوچار کمتر از خاک های تیمار شده با ترکیبات آلی می باشد. کاهش سرعت رهاسازی فسفر از خاک های تیمار شده با بیوچار در مقایسه با ترکیبات آلی نشان داد، تبدیل ترکیبات آلی به بیوچار می تواند موجب رهاسازی تدریجی فسفر و تامین کننده تدریجی فسفر مورد نیاز گیاه در خاک باشد. در مطالعه انجام شده توسط جلالی و رنجبر (Jalali and Rnjb, 2010) در تعدادی از خاک های آهکی تیمار شده با کود شیمیایی، مدل پارابولیک بهترین برازش را با داده های رهاسازی فسفر نشان داد. از طرف دیگر هانسن و استروان (Hanssen and Strawn, 2003) گزارش کردند که مدل الویج بهترین مدل برای برازش داده های رهاسازی فسفر در خاک آهکی تیمار شده با کود آلی هست. مطالعات نافیلو (Nafilu, 2009) نیز نشان داد که مدل های الویج، تابع نمایی و پارابولیک به خوبی داده های رهاسازی فسفر را در یک خاک آلفی سول توصیف می کنند.

در مطالعه ای که قربان زاده و همکاران (Ghorbanzadeh et al., 2009) به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزاد سازی فسفر و تاثیر آن در رشد گیاه ذرت انجام دادند نتایج آنان نشان داد که اسیدی کردن پودر استخوان منجر به تسریع افزایش آزاد سازی فسفر گردید و نتایج حاصل کشت گیاه ذرت نشان داد اسیدی کردن پودر استخوان منجر به افزایش معنی داری در وزن خشک اندام هوایی و مقدار جذب به وسیله گیاه شد.

با توجه به مشکلات pH بالای خاک های آهکی، کمبود فسفر و غلظت پایین فسفر خاک به علت واکنش های مانند جذب سطحی، رسوب، تثبیت و کند بودن سرعت واکنش های رهاسازی فسفر در خاک آهکی، در این پژوهش سینتیک آزاد سازی فسفر تحت تاثیر تیمارهای خاک فسفات اسیدی و ورمی کمپوست اسیدی بررسی شد تا احتمالاً به عنوان یک راهکار برای حل مشکل تغذیه فسفر در خاک آهکی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین این مطالعه با هدف بررسی اثر اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست بر سینتیک رهاسازی فسفر در یک خاک آهکی انجام شد.

مواد و روش ها

ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک

یک نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ cm) از مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان جمع آوری و به آزمایشگاه منتقل شد و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی متری، آزمایش های اولیه از قبیل pH خاک در سوسپانسیون ۱:۱ (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره اشباع (Rhoades, 1996)، کربن آلی خاک به روش واکلی و بلک (Black et al., 1965)، بافت خاک با استفاده از روش

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. خاک مورد نظر دارای بافت سبک، آهکی و میزان ماده آلی پایین هست که از ویژگی‌های معمول خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک هست. همچنین میزان فسفر قابل جذب خاک ۱/۲ میلی گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد که نشان دهنده کمبود فسفر در خاک مورد استفاده است.

جدول ۲- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش
Table 2- Selected chemical and physical properties of the soil studied

مقدار Value	واحد Unit	خصوصیت Property
شن لومی	-	بافت خاک Texture soil
11.4	%	رس Clay
21.2	%	سیلت Silt
67.4	%	شن Sand
8.2	-	اسیدیته pH
1	dS m^{-1}	قابلیت هدایت الکتریکی EC
13	%	کربنات کلسیم معادل (CaCO_3) C.C.E
1	%	کربن آلی O.C
0.1	%	فسفر کل (P_2O_5) Total P
1.2	mg kg^{-1}	فسفر قابل جذب Olsen-P
28	%	درصد اشباع SP

برخی از ویژگی‌های کودهای استفاده شده در این پژوهش (خاک فسفات و ورمی کمپوست) در جدول ۳ نشان داده شده است.

الگوی رهاسازی فسفر از تیمارها

الگوی رهاسازی فسفر از خاک در تیمارهای مورد مطالعه در شکل

جدول ۱- معادله سینتیکی مورد استفاده در آزمایش

Table 1-The kinetic equation used in the experiment

معادله Equation	مدل سینتیکی Kinetic model
$\frac{dq}{dt}=k$	مرتبه صفر Zero order
$\frac{dq}{dt}=k(q_e-q_t)$	مرتبه اول First order
$\frac{dq}{dt}=k(q_e-q_t)^2$	مرتبه دوم Second order
$(q_t-q_\infty)=\frac{4}{\pi^2}\left(\frac{Dt^2}{r^2}\right)-\frac{Dt}{r^2}$	پخشیدگی پارابولیک Parabolic diffusion
$q_t=at^b$	تابع توانی Two-constant rate
$\frac{dq}{dt}=ae^{-\beta q}$	الوویچ ساده شده Elovich

q_e و q_t به ترتیب بیانگر مقدار فسفر رهاشده در زمان تعادل و در زمان t (mg P kg^{-1}) و t زمان (h) ، k ثابت سرعت معادله $(\text{mg P kg}^{-1} h^{-1})$ ، r شعاع سیلندر، D ضریب پخشیدگی ظاهری، q_∞ مقدار فسفر رهاشده در زمان بی نهایت، a و b در معادله تابع توانی به ترتیب ثابت سرعت رهاسازی فسفر اولیه ($\text{mg P kg}^{-1} h^{-1}$) و ضریب رهاسازی فسفر $[(\text{mg P kg}^{-1})^{-1}]$ ، β در معادله الوویچ ساده شده ثابت رهاسازی فسفر $[(\text{mg P kg}^{-1})^{-1}]$ می‌باشند (Sparks, 1999).

تجزیه کود خاک فسفات

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره ۱:۱ (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۱:۱ (Thomas, 1996)، اندازه‌گیری مقدار کربن آلی به روش واکلی و بلک (Black et al., 1965) و مقدار فسفر کل با روش مخلوط اسید نیتریک و اسید کلریدریک (روش تیزآب سلطانی) اندازه‌گیری شد (Hossner, 1996).

تجزیه کود ورمی کمپوست

قابلیت هدایت الکتریکی (EC) عصاره ۱:۱ (Rhoades, 1996)، pH در سوسپانسیون ۱:۱ (Thomas, 1996)، اندازه‌گیری مقدار کربن آلی با استفاده از روش واکلی و بلک (Black et al., 1965) و مقدار فسفر کل به روش هضم خشک^۱ اندازه‌گیری شد (Chapman and Pratt, 1961).

۱ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، افزودن خاک فسفات، خاک فسفات اسیدی شده، ورمی کمپوست و ورمی کمپوست اسیدی شده باعث افزایش میزان و سرعت رهاسازی فسفر در خاک گردیده است.

جدول ۳- برخی از ویژگی‌های کودهای استفاده شده

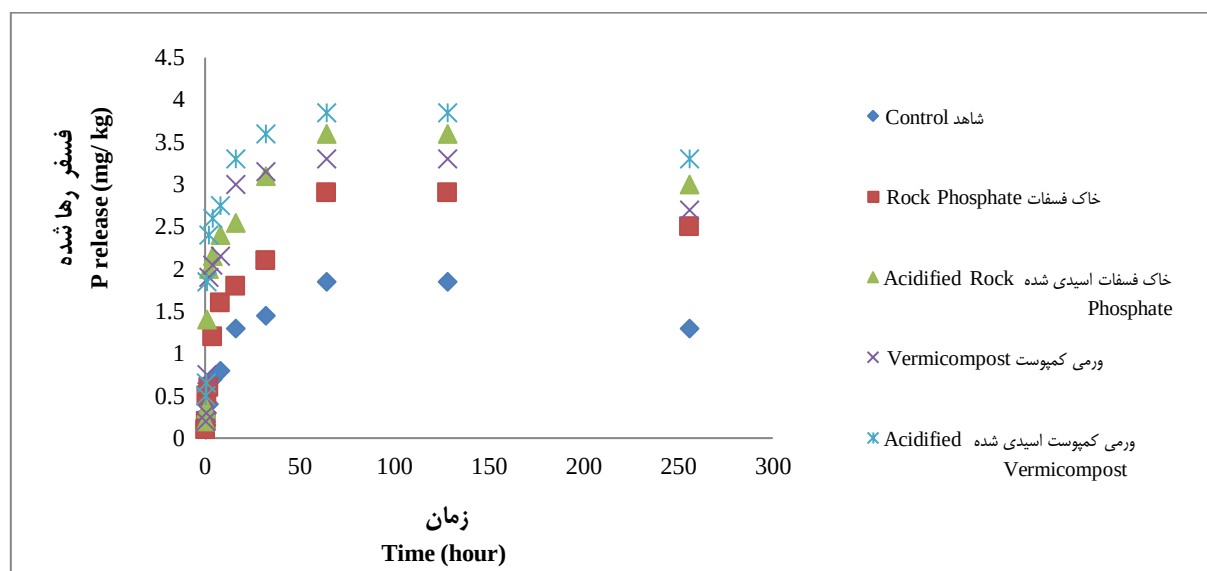
Table 3- Some characteristics of used fertilizers

نمونه Sample	خاک فسفات Rock Phosphate	ورمی کمپوست Vermicompost
اسیدیته pH _{1:1}	9.3	8.6
قابلیت هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹) EC _{1:1}	1	1.7
کربن آلی (%) O.C	0.6	1.1
فسفر کل (%) P ₂ O ₅ Total P	33.6	0.4

به بررسی سینتیک رهاسازی فسفر پرداخته است. وی گزارش نمود که سرعت رهاسازی در چند ساعت ابتدایی افزایش و سپس تا رسیدن به تعادل کاهش یافت. وی همچنین اظهار داشت که با افزایش نسبت محلول به خاک میزان رهاسازی فسفر نیز افزایش می‌یابد. رهاسازی فسفر در خاک را می‌توان به دو مرحله با سرعت‌های مختلف تقسیم کرد. شیب تند اولیه مربوط به زمان‌های آغازین واکنش بوده که رهاسازی فسفر عمدتاً از فازهای محلول و تبدیلی صورت گرفته و با کاهش غلظت فسفر به تعادل می‌رسد. به طور کلی، فرآیند رهاسازی یک عنصر در خاک تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله یکسان نبودن انرژی مکان‌های رهاسازی، تغییرات بار سطحی پس از رهاسازی، افزایش تعداد مکان‌های خالی پس از رهاسازی و تغییر در pH و قدرت یونی قرار دارد (Elkhatib and Hrn, 1988). شکل ۱ همچنین نشان می‌دهد که در تیمارهای اعمال شده نسبت به نمونه شاهد سرعت رهاسازی تا مرحله ۹ عصاره‌گیری (۶۴ ساعت) بالا بوده و به تعادل نسبی رسیده و پس از این مرحله کاهش یافته است. در تمامی زمان‌ها میزان فسفر رهاسازی از تیمارها نسبت به خاک شاهد بیشتر بود که نشان می‌دهد تیمار خاک با کودهای مورد مطالعه سبب افزایش رهاسازی فسفر در خاک شده است.

به طور کلی بیشترین افزایش در رهاسازی فسفر مربوط به ورمی کمپوست اسیدی شده طبق شکل ۱ به میزان ۳/۸۵ میلی گرم بر کیلوگرم و طبق جدول ۴ به دلیل کاهش pH بوده است.

در زمان‌های اولیه، سرعت رهاسازی فسفر سریع‌تر بوده و سپس با گذشت زمان کندتر شده و به تعادل نسبی رسیده است. بارو (Barrow, 1979) در پژوهشی با استفاده از عصاره‌گیر کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار



شکل ۱- الگوی رهاسازی فسفر از تیمارها

Figure 1- Phosphorus release pattern from treatments

جدول ۴- تاثیر تیمارهای مختلف بر مقدار pH پس از افزودن تیمارها به خاک آهکی

Table 4- The Effect of different treatments on the pH after adding the treatments to calcareous soil

تیمارها	خاک شاهد	خاک فسفات	خاک فسفات اسیدی شده	ورمی کمپوست	ورمی کمپوست اسیدی شده
Treatments	Control	Rock Phosphate	Acidified Rock Phosphate	Vermicompost	Acidified Vermicompost
اسیدیته pH	8.2	9.5	7.8	8.9	7.1

و همکاران (Maqhsoodi et al., 2015) که به منظور بررسی سینتیک رهاسازی فسفر و همبستگی پارامترهای آن با برخی ویژگی‌های خاک و رشد ذرت در چند خاک آهکی استان آذربایجان شرقی انجام دادند و با نتایج فکری و همکاران (Fekri et al., 2011) نیز همخوانی دارد. بیابانکی و حسین‌پور (Biabanaki and Hosseini, 2007) گزارش کردند که آزادشدن فسفر با بی کربنات سدیم ۰/۵ مولار از فاز جامد خاک توسط معادلات پخشیدگی پارابولیکی، مرتبه اول و تابع نمایی به خوبی قابل توصیف بود. شریعت مداری و همکاران (Shariatmadari et al., 2006) در خاک‌های آهکی ناحیه مرکزی ایران گزارش کردند که داده‌های سینتیک حاصل از استخراج فسفر با کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار توسط معادله الویچ ساده شده به بهترین نحو قابل توضیح بود و معادلات پخشیدگی پارابولیک و مرتبه اول نیز توانستند به خوبی داده‌های سینتیک فسفر را توضیح دهند. جلالی و همکاران (Jalali et al., 2011) معادله پخشیدگی پارابولیک را برای تخمین سرعت آزادشدن فسفر در خاک‌های با کاربری‌های مختلف در استان همدان مناسب دانستند.

ثابت‌های برآورد شده معادله‌های سینتیک در تیمارهای مطالعه شده در جدول ۶ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که معادلات مرتبه ای نمی‌توانند برای توصیف آزاد شدن فسفر استفاده شوند. میانگین ثابت سرعت در معادلات مرتبه صفر، مرتبه اول و مرتبه دوم به ترتیب ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۱- بود.

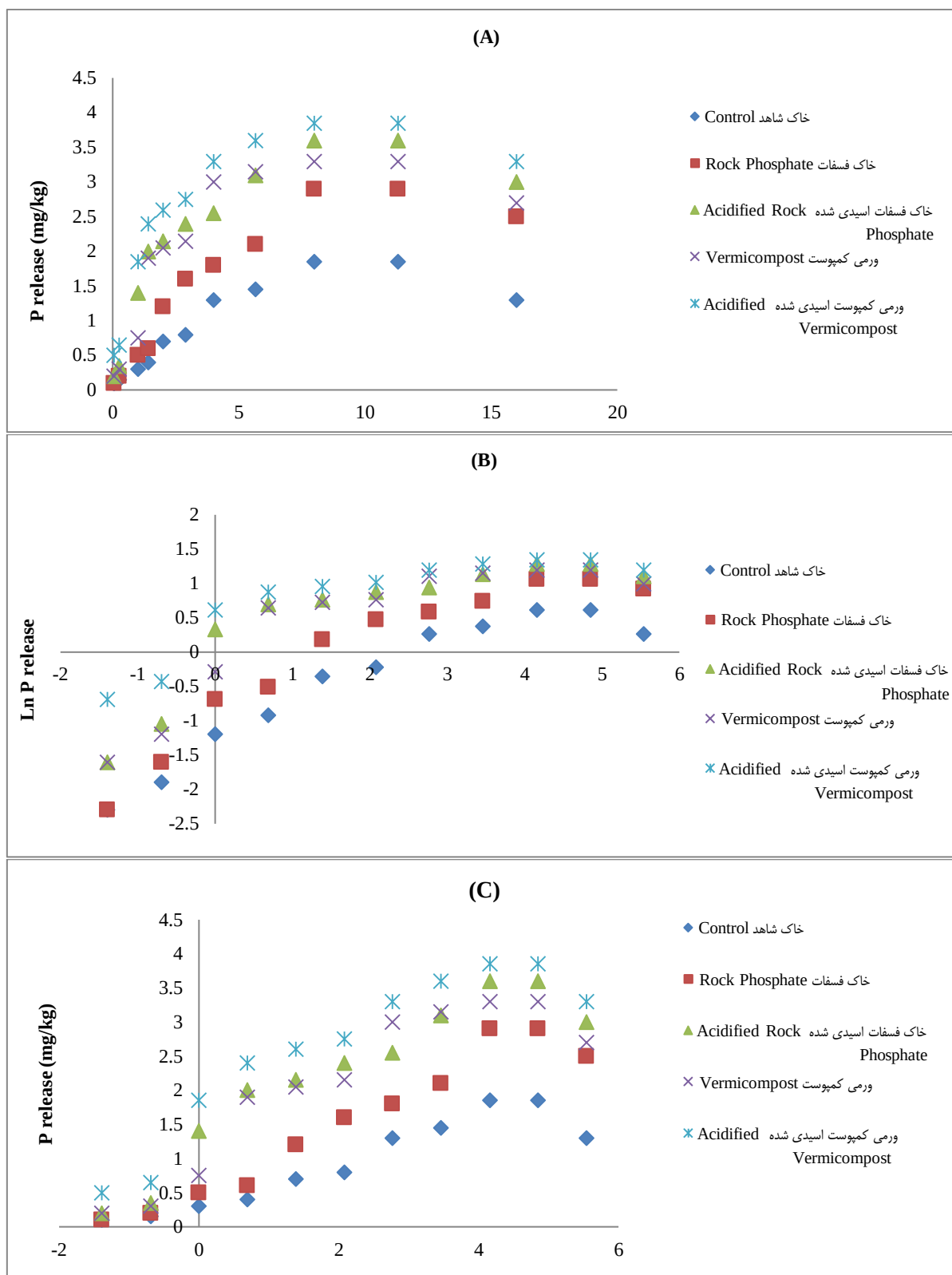
دامنه تغییرات ضریب سرعت رهاسازی فسفر در معادله پخشیدگی پارابولیکی بین ۰/۱۷ - ۰/۱ متغیر بود. تیمار خاک فسفات اسیدی شده بیشترین و تیمار شاهد کمترین ضریب سرعت را نشان می‌دهند. در معادله تابع توانی، دامنه تغییر پارامتر a (۱/۲۸ - ۰/۲۷) در معادله تابع توانی در خاک‌های مطالعه شده گسترده است در حالی که دامنه مقادیر ضریب سرعت b (۰/۴۶ - ۰/۲۶) مطالعه شده نسبتاً کوچک هستند (جدول ۶). بنابراین، احتمالاً یک افزایش در مقدار a و یک کاهش در مقدار b نشان دهنده افزایش در سرعت آزادسازی فسفر هست (Dang et al., 1994).

تأثیر تیمارها و مقایسه معادلات سینتیک مختلف در توصیف رهاسازی فسفر از خاک

سینتیک واکنش یکی از مهمترین جنبه‌های مطالعات رهاسازی عناصر در خاک می‌باشد زیرا مسیر واکنش و مکانیسم‌های درگیر در فرآیند جذب را آشکار می‌کند (Labafzadeh, 2021). جهت توصیف رهاسازی فسفر در دوره زمانی ۰/۲۵ تا ۲۵۶ ساعت از خاک و بررسی تاثیر تیمارهای مورد مطالعه از معادلات سینتیک مرتبه‌ای، پخشیدگی پارابولیکی، تابع توانی و الویچ ساده شده استفاده شد. شکل‌های ۲ به ترتیب برازش معادلات سینتیک مذکور را با داده‌های رهاسازی فسفر از خاک مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود بیشترین رهاسازی فسفر مربوط به ورمی کمپوست و خاک فسفات اسیدی شده که یک کود آلی است و یک منبع برای تهیه کودهای فسفاته است، می‌باشد. که با نتایج قربانزاده و همکاران (Ghorbanzadeh et al., 2009) که به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزادسازی فسفر انجام دادند، همخوانی دارد. نتایج مطالعه آنان حاکی از آن بود که اسیدی کردن پودر استخوان منجر به تسریع و افزایش آزادسازی فسفر گردید.

برای ارزیابی معادلات ذکر شده و انتخاب بهترین معادله توصیف کننده رهاسازی فسفر، ضرایب تبیین (R^2) و خطاهای معیار تخمین (SE) محاسبه شده برای هر معادله مورد مقایسه قرار گرفت. مدلی برتر است که ضرایب تبیین (R^2) بیشتر و خطای معیار تخمین (SE) کمتر باشد (Boroomand, 2009).

طبق جدول ۵ در همه تیمارهای مورد مطالعه معادلات الویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک با دارا بودن ضرایب تبیین بالاتر و خطای استاندارد پایین تر نسبت به معادلات مرتبه‌ای بهترین برازش را با داده‌های رهاسازی فسفر از خاک داشتند. به عبارت دیگر معادلات الویچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک به خوبی قادر به توصیف فرآیند رهاسازی فسفر از خاک در تیمارهای مورد مطالعه بوده است. این نتایج با نتایج نافیلو (Nafilu, 2009) که به منظور رهاسازی فسفر در یک خاک آلی سول انجام داد و همچنین با نتایج مقصودی



شکل ۲- برازش معادلات سینتیکی با داده‌های رهاسازی فسفر از خاک تحت تأثیر تیمارها
(A) پخشیدگی پارابولیک، (B) تابع توانی و (C) الووچ ساده شده

Figure 2- Fitting Kinetic equations with phosphorus release data from soil under the influence of treatments
(A) Parabolic diffusion, (B) Two-constant rate and (C) Elovich

سرعت آزادسازی فسفر افزایش می‌یابد (Raiesi and Hosseinpour, 2015).

طبق جدول ۶ در معادلات سینتیکی الویج ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیک و در تیمارهای ورمی کمپوست اسیدی شده و خاک فسفات اسیدی شده بیشترین ثابت‌های سینتیکی برآورد شده را دارا هستند. معادله الویج ساده شده با میانگین ضرایب تبیین (R^2) ۰/۷۹ و با میانگین خطای معیار (SE) ۰/۴ در تمام تیمارها رهاسازی فسفر از خاک را به خوبی توصیف کرد.

مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف در رهاسازی فسفر نسبت به شاهد

شکل ۳ مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد مطالعه نسبت به شاهد در افزایش رهاسازی فسفر را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود تیمار ورمی کمپوست اسیدی شده مورد مطالعه ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر به نسبت به شاهد افزایش داده است. از طرفی افزودن اسید به خاک فسفات باعث افزایش ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر در خاک گردیده است. از بین کودهای مورد مطالعه خاک فسفات کمترین تاثیر را بر ظرفیت و سرعت رهاسازی فسفر در خاک داشته است.

در معادله تابع توانی، در صورتی که از معادله $q_t = at^b$ نسبت به زمان مشتق گرفته شود و $t = 1$ باشد $\frac{dq}{dt} = ab$ خواهد بود، در این حالت، پارامتر ab را می‌توان به عنوان سرعت رهاسازی اولیه فسفر در نظر گرفت (Dang et al., 1994) بنابراین در نظر گرفتن سرعت آزادسازی فسفر به صورت $a \times b$ مناسب‌تر هست (Raiesi and Hosseinpour, 2015). بررسی نتایج نشان داد که مقدار $a \times b$ در تیمار شاهد کمتر از $a \times b$ که در تیمار ورمی کمپوست اسیدی شده بود. میانگین ثابت سرعت تابع توانی ($a \times b$) در تیمارهای مورد مطالعه ۰/۲۲ بود. میانگین ثابت سرعت معادله الویج ساده در تیمارهای مورد مطالعه ۰/۴۲ بود. ثابت سرعت رهاسازی معادله الویج ساده شده از ۰/۴۷ - ۰/۲۶ متغیر می‌باشد. کمترین مقدار آن در تیمار شاهد و بیشترین مقدار آن در تیمار خاک فسفات اسیدی شده، ورمی کمپوست و ورمی کمپوست اسیدی شده می‌باشد.

معادله الویج یک معادله تجربی و نیمه لگاریتمی است و توضیحی در مورد یک سازوکار مشخص می‌دهد (Raiesi and Hosseinpour, 2015). لیکن در برخی از منابع گزارش شده است که معادله الویج قادر است تعدادی از فرآیندهای مختلف از قبیل پخشیدگی سطحی را توضیح دهد (Toor and Bahl, 1999) ثابت‌های معادله‌های الویج ساده شده می‌توانند برای مقایسه سرعت آزادسازی فسفر در خاک‌های مختلف استفاده شوند. با افزایش مقدار α و کاهش مقدار پارامتر β

جدول ۵- مقادیر ضریب تبیین (R^2) و خطای معیار تخمین (SE) برای معادلات سینتیکی مختلف در تیمارها

Table 5- The amounts of determination coefficient (R^2) and standard error of estimation (SE) for different Kinetic equations in treatments

تیمارها		شاهد	خاک فسفات	خاک فسفات اسیدی شده	ورمی کمپوست	ورمی کمپوست اسیدی شده
Treatments		Control	Rock Phosphate	Acidified Rock Phosphate	Vermicompost	Acidified Vermicompost
مرتبۀ صفر	R^2	0.7	0.63	0.4	0.46	0.37
Zero order	SE	0.03	0.06	0.19	0.12	0.22
مرتبۀ اول	R^2	0.66	0.61	0.37	0.48	0.34
First order	SE	0.05	0.16	0.62	0.34	0.69
مرتبۀ دوم	R^2	0.64	0.59	0.34	0.5	0.32
Second order	SE	0.08	0.45	2.03	0.96	2.24
پخشیدگی پارابولیکی	R^2	0.6	0.72	0.56	0.48	0.49
Parabolic diffusion	SE	0.44	0.59	0.82	0.89	0.88
تابع توانی	R^2	0.87	0.87	0.7	0.73	0.71
Two-constant rate	SE	0.57	0.83	1.04	1.09	1.09
الویج ساده شده	R^2	0.87	0.86	0.7	0.83	0.71
Elovich	SE	0.26	0.27	0.44	0.51	0.5

جدول ۶- ثابت‌های معادلات سینتیکی در تیمارهای مطالعه شده
 Table 6- Constants of kinetic equations in the studied treatments

تیمارها	شاهد	خاک فسفات	خاک فسفات اسیدی شده	ورمی کمپوست	ورمی کمپوست اسیدی شده
Treatments	Control	Rock Phosphate	Acidified Rock Phosphate	Vermicompost	Acidified Vermicompost
مرتبه صفر Zero order	K	0.005	0.009	0.008	0.007
مرتبه اول First order	K	0.006	0.007	0.005	0.003
مرتبه دوم Second order	K	-0.001	-0.001	-0.006	0.007
پخشیدگی پارابولیکی Parabolic diffusion	r	0.1	0.17	0.17	0.16
تابع توانی Two-constant rate	a	0.27	0.38	0.81	1.28
	b	0.41	0.46	0.35	0.26
الوویچ ساده شده Elovich	a	0.38	0.57	1.23	1.62
	β	0.26	0.44	0.47	0.47

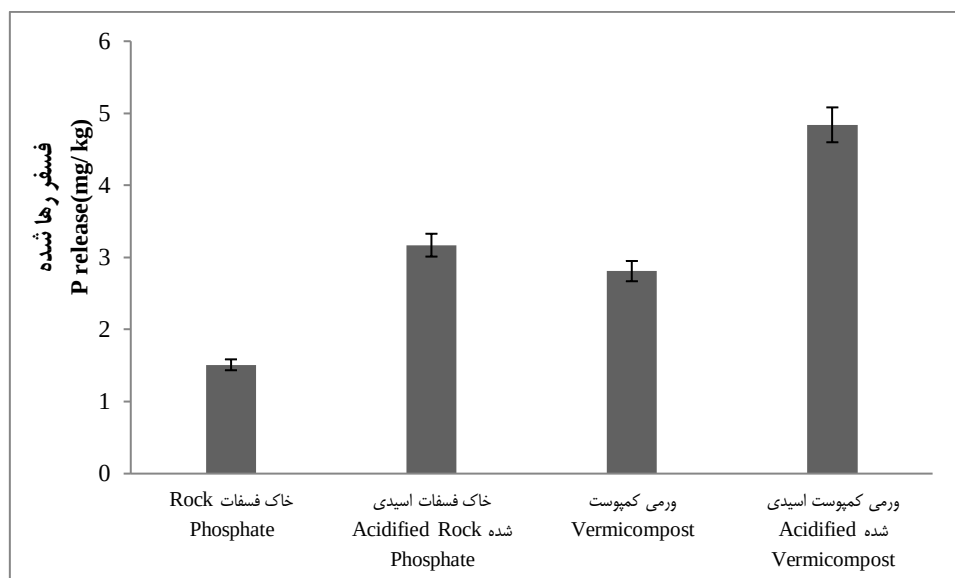
در خاک توسط ورمی کمپوست رخ داده باشد. از طرفی مواد آلی و اسیدهای آلی حاصل از تجزیه آنها، سطوح کربنات کلسیم را اشغال کرده و از تشکیل رسوب هیدروکسی آپاتیت جلوگیری می‌کند (Inskip and Silvertooth, 1998).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر کاربرد خاک فسفات، خاک فسفات اسیدی شده، ورمی کمپوست و ورمی کمپوست اسیدی شده بر سینتیک رهاسازی فسفر در خاک آهکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست باعث افزایش رهاسازی فسفر در خاک آهکی گردید. به‌طور کلی در کودآلی میزان فسفر آزاد شده بیشتری نسبت به تیمار کود شیمیایی اندازه‌گیری شد و کمترین مقدار فسفر آزاد شده در تیمار شاهد مشاهده گردید. از طرفی کاهش pH در خاک آهکی منجر به افزایش رهاسازی فسفر شد و از طرف دیگر ممکن است کمپلکس کردن عوامل تثبیت فسفر (یون کلسیم) در خاک توسط ورمی کمپوست رخ داده باشد.

به‌طور کلی اسیدی کردن ورمی کمپوست و خاک فسفات نسبت به ورمی کمپوست و خاک فسفات اسیدی نشده منجر به افزایش رهاسازی فسفر نسبت به شاهد گردید. با نتایج قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzadeh et al., 2009) که به منظور بررسی توان پودر استخوان در آزادسازی فسفر انجام دادند همخوانی دارد. اعتمادیان و همکاران (Etemadian et al., 2018) نیز گزارش نمودند که کاربرد اسیدهای آلی و معدنی در خاک باعث رهاسازی عناصر غذایی در محلول خاک می‌شود.

نتایج آزمایش همچنین نشان داد که با اسیدی کردن ورمی کمپوست، فسفر سریع‌تر از این منبع آلی رها می‌شود. کاهش pH (جدول ۴) و وابستگی رهاسازی فسفر در منابع آلی به عواملی مانند فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و شرایط رطوبتی و دما و اسیدیته خاک می‌تواند موجب کاهش تثبیت فسفر در تیمارهای حاوی مواد آلی نسبت به کود شیمیایی فسفر گردد (Ghorbanzadeh et al., 2009). به عبارت دیگر، فسفر خاک در این تیمارها برای مدت زمان طولانی‌تری به شکل قابل دسترس گیاه باقی می‌ماند. همچنین مواد آلی می‌توانند مانع تشکیل فسفات‌های کلسیم، اختلال در رشد بلورها (Oconner et al., 1980) و تشکیل اکثا کلسیم فسفات شوند (Moreno et al., 1960). ممکن است کمپلکس کردن عوامل تثبیت فسفر (یون کلسیم)



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر تیمارهای مختلف در رهاسازی فسفر نسبت به شاهد

Figure 3- Comparison of the average effect of different treatments on phosphorus release compared to the control

داشت. با این حال، میزان رهاسازی فسفر در همه تیمارها نسبت به شاهد افزایش پیدا کرد. از بین معادلات سینتیکی، معادلات الویچ ساده شده، تابع توانی به ترتیب بهترین توصیف را در رهاسازی فسفر داشتند. بر اساس نتایج به دست آمده از این مطالعه، توصیه می شود از غلظت های مختلف اسیدها و تیمارهای مورد مطالعه در حضور گیاه استفاده شود.

رهاسازی فسفر از تیمارها و شاهد در ابتدا سریع و سپس به آهستگی ادامه یافت. الگوی رهاسازی از تیمارهای مورد مطالعه نشان داد اسیدی کردن خاک فسفات و ورمی کمپوست باعث افزایش میزان و سرعت رهاسازی فسفر در خاک آهکی گردید. نتایج همچنین نشان داد که رهاسازی فسفر از تیمارهای مورد مطالعه روند مشابهی با شاهد

منابع

1. Akhtar, M., Yaqub, M., Naeem, A., Ashraf, M., & Hernandez, V.E. (2016). Improving phosphorus uptake and wheat productivity by phosphoric acid application in alkaline calcareous soils. *Journal Science Food Agriculture*, 96(11), 3701-3707. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7555>
2. Barrow, N.J. (1979). The desorption of phosphate from soil. *Journal Soil Science*, 30, 259-270.
3. Bertrand, I., McLaughlin, M. J., Holloway, R.E., Armstrong, R.D., & McBeath, T. (2006). Changes in P bioavailability induced by the application of liquid and powder sources of P, N and Zn fertilizers in alkaline soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 74(1), 27-40.
4. Biabanaki, F., & Hossenipoor, A. (2007). Phosphorus release kinetics and the correlation between kinetics models constants and in some soils of Hamadan. *Journal of Science and Tehnology of Agriculture and Natural Resources*, 42, 491-503. (In Persian with English abstract). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-804-fa.html>.
5. Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., & Clark, F.E. (1965). *Methods of Soil Analysis*. Part2. Agron. Monogr.9. American Society of Agronomy (ASA), Madison, WI.
6. Boroomand, N. (2009). *Kinetics of zinc desorption and the relations of its parameters with soil properties and uptake of zinc by plant in some soils of Iran*. Ph.D. Thesis, Tehran University, College of Agriculture and natural resources. (In Persian with English abstract)
7. Chapman, H.D., & Pratt, D.F. (1961). *Methods of analysis for soil, plant and water*. The University of California's Division of Agricultural Science. 62-66.
8. Dang, Y.P., Dala, R.C., Edwards, D.G., & Tiller, K.G. (1994). Kinetics of zinc desorption from vertisols. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, 58, 1392-1399.
9. Delgado, A., & Torrent, J. (2000). Phosphorus froms and desorption in heavily fertilized calcareous and limed soils. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, 64, 2031-2037.
10. Edwards, C.A. (1995). Historical overview of vermicoposting. *Bio Cycle*, 36, 50-58.
11. Eghball, B., Wienhoold, B., Woodbury, B.L., Eigenberg, R.A. (2005). Plant availability of phosphorus in swine slurry and cattle feed lot manure. *Agronomy Journal*, 97, 542-548.
12. Elkhatib, E.A., & Hrn, J.L. (1988). Kinetics of phosphorus desorption from appalachian soils. *Soil Science*, 145, 222-

- 229.
13. Etemadian, M., Hassani, A., Nourzadeh Haddad, M., & Hanifei, M. (2018). Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(5), 73-91. (In Persian with English abstract)
14. Fekri, M., Gorgin, N., & Sadegh, L. (2011). Phosphorus desorption kinetics in two calcareous soils amended with P fertilizer and organic matter. *Environmental Earth Sciences*, 64(3), 721-729.
15. Frišták, V., & Soja, G. (2015). Effect of wood-based biochar and sewage sludge amendments for soil phosphorus availability. *Nova Biotechnologica et Chimica*, 14(1), 104-115.
16. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). *Particle- size analysis*. In A. Klute (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part1. 2nd ed. Agron. Monogr.9. American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA), Madison, WI. In A. Klute (ed.). 338-409.
17. Ghorbanzadeh, N., Haghnia, G., Lakzian, A., & Fotovat, A. (2009). Phosphorus availability in a soil amended with Bone Meal. *Iranian Journal of Soil Research*, 23(1), 69-77. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2009.126657>
18. Hanssen, J.C., & Strawn, D.G. (2003). Kinetics of phosphate release from manure-amended alkaline soil. *Soil Science*, 168, 869-879.
19. Hejazi Mehrizi, M., Ayeeneheydari, M., & Abbaszadeh, F. (2016). An investigation of phosphorus dynamics in a calcareous Soil treated with different levels of poultry manure and chemical fertilizer. *Water and Soil*, 26(3.1), 293-303. (In Persian with English abstract)
20. Hossner, L.R. (1996). *Dissolution for total elemental analysis*. In: *Methods of soil analysis*. (Ed. D.L. Sparks). American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA). Madison, WI. 49-64.
21. Inskeep, W.P., & Silvertooth, J.C. (1998). Inhibition of hydroxy apatite precipitation in the presence of fulvic, humic and tannic acids. *Soil Science Society of American Journal*, 52, 941-946.
22. Jalali, M., Ahmadi, N., & Zinli, M. (2011). Kinetics of phosphorus release from calcareous soils under different land use in Iran. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174, 38-46.
23. Jalali, M., & Rnjbr, F. (2010). Aging effect on phosphorus Transformation rate soils. *Geoderma*, 155, 101-106.
24. Khorsandi, F. (1994). Sulfuric acid effects on iron and phosphorus availability in two calcareous soils. *Journal Plant Nutrition*, 17(9), 1611-1623.
25. Kuo, S., & Lotse, E.G. (1972). Kinetics of phosphate adsorption by calcium carbonate and Ca- kaolinite. *Soil Science Society of American (SSSA). Proc.* 36, 725-729.
26. Labbafzadeh, A. (2021). *Investigation of phosphorous release and fractionation in a calcareous soil treated by coffee waste biochar*. Iran. MS.c Thesis, Shahid Bahonar University of Kerman. Faculty of Agriculture. (In Persian with English abstract)
27. Lee, C.H., Park, C.Y., Do Park, K., Jeon, W.T., & Kim, P.J. (2004). Long-term effects of fertilization on the forms and availability of soil phosphorus in rice paddy. *Chemosphere*, 56(3), 299-304.
28. Lim, S.L., Wu, T.Y., Lim, P.N., & Sak, K.P.Y. (2015b). The use of vermicompost in organic farming: Overview, effects on soil and economics. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(6), 1143-1156.
29. Mahmoud Soltani, Sh., Davatgar, N., Kavooosi, M., & Darighoftar, F. (2011). Phosphorous fractionation of paddy fields and their relations with physical and chemical properties of soils (Case study: Some-e-Sara city, Guilan province). *Journal Water and Soil Conservation*, 18(2), 159-176. (In Persian with English abstract)
30. Maqhsoodi, M.R., Reyhanitabar, A., & Najafi, N. (2015). Kinetics of phosphorus release and correlation of its parameters with soil properties and corn growth in some calcareous soils of East Azerbaijan province. *Applied Soil Research (ASR)*, 2(2):119-134. (In Persian with English abstract)
31. Meissner, R., Leinweber, P., Rupp, H., Shenker, M., Litaor, M.I., Robinson, S., Schlichting, A., & Koehn, J. (2008). Mitigation of diffuse phosphorus pollution during rewetting of fen peat soils: a trans-European case study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 188(1-4), 111-126.
32. Mikkelsen, R.L., & Jarrell, W.M. (1987). Application of urea phosphate and urea sulfate to drip-rrigated tomatoes grown in calcareous. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, 51(2), 464-468.
33. Miyamoto, S., Ryan, J., & Stroehlein, J.L. (1975). Potentially beneficial uses of sulfuric acid in southwestern agriculture. *Journal of Environmental Quality*, 4(4), 431-437.
34. Moreno, E.C., Lindsay, W.L., & Osborn, G. (1960). Reactions of dicalcium phosphate dihydrate in soils. *Soil Science*, 90, 58-68.
35. Nelson, R.E. (1987). *Carbonate*. In: Black, C.A. (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part2. Agron . Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA), Madison, WI. P. 182-192.
36. Nafilu, A. (2009). Effects of soil properties on the kinetics of desorption of phosphate from Alfisol by anion exchange resins. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 175, 101-107.
37. Oconner, G.A., Knudsten, K.L., & Connell, G.A. (1986). Phosphorus solubility in sludgeamended calcareous soils. *Journal Environmental Quality*, 15, 308-312.
38. Olsen, S.R., & Khasawneh, F.E. (1980). *Use and limitations of physical- chemical criteria for assessing the status*

- of phosphorus in soils. American Society of Agronomy (ASA). Madison, WI. 361-410.
39. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). *Phosphorus*. In: A.L. Page (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA), Madison, WI. 403-431.
 40. Raiesi, T., & Hosseinpour, A.L. (2015). The influence of bean rhizosphere on phosphorus release kinetics in calcareous soils of Shahrekord plain. *Journal of Water and Soil*, 25(4.2), 67-80. (In Persian with English abstract)
 41. Rhoades, J.D. (1996). *Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids*. In: Black, C. A (ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agron. Monogr. 9. American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science of American (SSA), Madison, WI. 417- 435
 42. Rhoades, J.D. (1982). *Soluble Salts*. In- A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. American Society of Anesthesiologists (ASA) and Soil Science Society of American (SSSA), Madison, WI. 167-179.
 43. Rosa, M.C., Muchovej, J., & Muchovej Alvarez, V.H. (1989). Temporal relation of phosphorus fraction in an oxioil amended rock phosphate and Thiobacillus thiooxidans. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, 53, 1096-1100.
 44. Ryan, J., & Stroehlein, J.L. (1979). Sulfuric acid treatment of calcareous soils: Effects on phosphorus solubility. Inorganic phosphorus forms and plant growth. *Soil Science Society of American (SSSA) Journal*, 43(4), 731-735.
 45. Salim-pour, S., Khavazi, K., Nadian, H., & Besharati, H. (2010). Effect of rock phosphate along with sulfur and microorganisms on yield And chemical composition of Canola. *Iranian Journal of Soil Research*, 24(1), 9-19. (In Persian with English abstract)
 46. Shariatmadari, H., Shirvani, M., & Jafari, A. (2006). Phosphorus release kinetics and availability in calcareous soils of selected arid and semiarid Toposequence. *Geoderma*, 132, 261-272. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.05.011>
 47. Sharpley, A.N., McDowell, R.W., & Kleinman, P.J. (2004). Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 2048-2057.
 48. Sparks, D.L. (1999). *Kinetics of soil phenomena*. Future directions. In: P. M. Huang, D. L. Sparks and S. A. Boyd (ed.). *Future Prospects of soil chemistry*. Soil science society of America Spec. Pub. Soil science society of America. Madison, WI. 81-102.
 49. Spinks, J.W.T., & Barber, S.A. (1947). Study of fertilizer uptake using radioactive phosphorus. *Science Agronomy*, 27, 145-155.
 50. Stevenson, F.J. (1994). *Humus chemistry: Composition, reactions*. John Wiley & Sons.
 51. Thomas, G.W. (1996). *Soil pH and soil acidity*. In: Sparks DL (ed.), *Methods of Soil Analysis*. Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of American (SSSA), Madison, Wisconsin, USA. 475- 491.
 52. Tisdale, S.L., Nelson, W. L., Beaton, J.D., & Havlin, J.L. (1993). *Soil Fertility and Fertilizers*, 5th ed. Mcmillan Publishing Co., New York.
 53. Toor, G.S., & Bahl, G.S. (1999). Kinetics of. Phosphate desorption from different soils as influenced by application of poultry manure and fertilizer phosphorus and its uptake by soybean. *Bioresearch Technology*, 69, 117-121.
 54. Tunesi, S., Poggi, V., & Gessa, C. (1999). Phosphate adsorption and perception in calcareous soils: The role of calcium ions in solution and carbonate minerals. *Nutrition Cycl Agroecosystem*, 53, 219-227.
 55. Uygur, V., & Karabatak, I. (2009). The effect of organic amendments on mineral phosphate fractions in calcareous soils. *Journal Plant Nutrition Soil Science*, 172, 336-345.
 56. Van kauwenbergh, S.J. (2001). Mineralogy and characterization Of phosphate rock for direct application. International Meeting on Direct Application Rock Phosphate and Related Appropriate Technology-latest Development and Practical Experiences. Kuala Lumpur, Malaysia.
 57. Wang, L., Liang, T., Kleinman, P.J.A., & Cao, H. (2011). An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources. *Chemosphere Journal*, 85, 1075-1079.
 58. Wei, X.X., Xiong, J.F., Li, T., Wen, J., Zeng, X.B., & Yu, D.H. (2020). Effects of different organic amendments on soil organic carbon and its labile fractions in the paddy soil of a double rice cropping system. Ying Yong Sheng tai xue bao. *The Journal of Applied Ecology*, 31(7), 2373-2380.
 59. Wiedenfeld, B. (2011). Sulfur application effects on soil properties in a calcareous soil and on sugarcane growth and yield. *Journal of Plant Nutrition*, 34(7), 1003-1013.
 60. Zarinkolah, Z., Zarabi, M., & Mahdavi, Sh. (2019). *The kinetics of phosphorus release from two calcareous soils treated with different organic sources*. 16th Iranian Soil Science Congress. University of Zanjan, Iran, 27-29 August. (In Persian with English abstract)



Acid-modified Biochar Effect on Some Physiological Indicators and Micronutrient Availability of Quinoa (cv. Gizavan) in a Calcareous Soil

M. Bazi Abdoli¹, M. Barani Motlagh^{2*}, A. Bostani³, T. Nazari⁴

Received: 06-05-2023

Revised: 06-08-2023

Accepted: 19-09-2023

Available Online: 19-09-2023

How to cite this article:

Bazi Abdoli, M., Barani Motlagh, M., Bostani, A., & Nazari, T. (2023). Acid-modified biochar effect on some physiological indicators and micronutrient availability of quinoa (cv. Gizavan) in a calcareous soil. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 589-602. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22067/jsw.2023.82277.1281>

Introduction

Organic matter and alkaline pH are the main causes of nutrient deficiencies in calcareous soils of arid and semi-arid regions. The availability of some nutritional elements, including the micronutrients such as iron, zinc, copper, and manganese is very low in calcareous soils, although the total concentration of these elements may be relatively high. Burning crop residues results in substantial loss of nutrients, and may lead to air pollution and human health problems. An alternative approach is to apply crop residues to soil in the form of biochar. The biochar modification with acid may increase the solubility of nutrients (P, Fe, Zn, Cu, Mn) present in biochar, thereby significant improvement in mineral nutrition of plants grown in calcareous soils. Therefore, the object of this study is to investigate the effect of acid-modified biochar from rice residues on the amount of chlorophyll and the micronutrient concentration of quinoa plant (*Chenopodium quinoa*) in a calcareous soil.

Methods and Materials

The soil was air-dried and ground to pass through a 2-mm sieve then was analyzed to determine various soil physico-chemical properties using standard methods. To achieve the aim of this study the factorial experiment was carried out based on a completely randomized design in 4 replications. Factors include 3 types of biochar (unmodified, modified by pre-acidic method and modified by post-acidic method) and different levels of biochar (0, 2, and 5% by weight). Then 10 quinoa seeds were planted in each pot at 2-cm depth which after emergence, declined to 3 plants in each pot. The pots were randomly moved twice a week during the growth period to eliminate environmental effects. Irrigation and weeding operations were performed by hand. Determination of chlorophyll content (a, b, and ab) and carotenoids were measured precisely before harvesting in fresh plants using Arnon method. Plants were harvested at 187 days after planting, washed with distilled water and dry with tissue paper. The samples were air-dried and then oven dried at 65°C to a constant weight in a forced air-driven oven. Then the total micronutrient content of the plant was determined after dry ashing. The statistical results of the data were analyzed using SAS software (9.4) and LSD test (at 5% level) was used for comparing the mean values.

Results and Discussion

Based on the variance analysis, all attributes responded positively to different types and levels of biochar and modified biochar ($p < 0.01$). The comparison of the average effect of the studied treatments showed that with the increase in the levels of all three types of biochar, the amount of chlorophyll a, b, total, and carotenoid increased so the highest amount of chlorophyll a, b, total, and carotenoid respectively, with an average of 2.58 and 1.54, 4.13 and 1.36 mg g⁻¹ were obtained from the treatment of 5% post-acidic biochar. The results showed that the highest

1, 2 and 4- M.Sc. Graduated, Associate Professor and Ph.D. Student, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources, Gorgan, respectively.

(* - Corresponding Author Email: mbarani2002@yahoo.com)

3- Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahed University

DOI: [10.22067/jsw.2023.82277.1281](http://doi.org/10.22067/jsw.2023.82277.1281)

amount of Fe concentration in shoots with an average of $229.48 \text{ mg kg}^{-1}$ was obtained from the treatment of 5% post-acidic biochar, although there was no statistically significant difference with the treatment of 5% pre-acidic biochar with an average of $220.48 \text{ mg kg}^{-1}$ and its lowest value with an average of 95.95 mg kg^{-1} was related to unmodified biochar. The highest amount of Zn concentration in shoots with an average of 13.42 mg kg^{-1} was related to the treatment of 5% post-acidic biochar which showed an increase of 13.24 and 33.26% compared to the treatment of 5% pre-acidic and unmodified biochar, respectively. Also, the highest concentrations of Cu and Mn in shoots were obtained with an average of 3.85 and 23.37 mg kg^{-1} respectively, from the treatment of 5% post-acidic biochar.

Conclusion

Post-acidic biochar had better results in terms of physiological indices and the concentration of micronutrients (Fe, Zn, Cu, and Mn) than unmodified biochar in quinoa. The increase of nutrients in quinoa can be attributed to the dissolution of biochar nutrients after being modified with acid and the reduction of pH and the availability of these elements in the soil. Therefore, biochar modified with acid or biochar produced from sources that have acidic properties can be recommended as a suitable method for improving fertility and increasing micronutrients in calcareous soils affected by salt.

Keywords: Carotenoid, Chlorophyll, Post-acidic biochar



مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۵۸۹-۶۰۲

اثر زغال زیستی اصلاح شده اسیدی بر برخی شاخص‌های فیزیولوژیکی و فراهمی عناصر کم مصرف در گیاه کینوا (رقم گیزوان) در یک خاک آهکی

مهری بزی عبدلی^۱ - مجتبی بارانی مطلق^{۲*} - امیر بستانی^۳ - طالب نظری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

چکیده

یکی از راه‌های بهبود ویژگی شیمیایی و حاصلخیزی خاک‌های آهکی، کاربرد مواد آلی از جمله زغال زیستی تولید شده از ضایعات آلی است. اما زغال‌های زیستی عمدتاً دارای pH قلیایی بوده و کاربرد مقادیر زیاد آنها می‌تواند کمبود برخی عناصر غذایی را برای گیاه در خاک‌های آهکی تشدید کند. اصلاح زغال زیستی با اسیدها باعث افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی گیاهان در خاک‌های آهکی می‌شود. هدف از این پژوهش بررسی اثر زغال زیستی اصلاح شده با اسید از کاه برنج بر مقدار کلروفیل و غلظت عناصر کم مصرف گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa*) (رقم گیزوان) در یک خاک آهکی بود. به همین منظور آزمایشی در شرایط گلخانه‌ای به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۴ تکرار به صورت گلدانی اجرا شد. فاکتورها شامل ۳ نوع زغال زیستی (اصلاح نشده، اصلاح شده با روش پیش اسیدی و اصلاح شده با روش پس اسیدی) و مقادیر مختلف مصرف زغال زیستی (۰، ۲ و ۵ درصد وزنی) و در مجموع ۳۶ گلدان بودند. مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با افزایش مقدار مصرف هر سه نوع زغال زیستی مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید افزایش یافت به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به ترتیب با میانگین ۱/۵۴، ۲/۵۸ و ۴/۱۳ و ۱/۳۶ میلی گرم بر گرم وزن تازه گیاه از تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس اسیدی بدست آمد. همچنین بیشترین غلظت آهن، روی، مس و منگنز در اندام هوایی به ترتیب با میانگین ۲۲۹/۴۸، ۱۳/۴۲، ۳/۸۵ و ۲۳/۳۷ میلی گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس اسیدی بود که نسبت به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پیش اسیدی به ترتیب افزایشی معادل ۴/۰۸، ۱۳/۲۴، ۷/۴۴ و ۳۰/۷۶ درصد داشت. به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد زغال زیستی اسیدی (پس اسیدی) می‌تواند به عنوان روشی مناسب برای ارتقاء حاصلخیزی و فراهمی عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: زغال زیستی پس اسیدی، کارتنوئید، کلروفیل

مقدمه

موارد به دلیل اثرات متقابل عناصر موجود در خاک و عوامل محیطی بوده و به خصوصیات خاک‌ها بر می‌گردد. در برخی مناطق نیز کمبود یا سمیت عناصر کم مصرف ناشی از وضعیت مواد مادری خاک است (Nael et al., 2009). در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک، کمبود مواد آلی و pH قلیایی عامل اصلی کمبود اکثر عناصر غذایی برای گیاه است. در دسترس بودن برخی از عناصر غذایی از جمله

در ایران به دلیل شرایط آهکی خاک، وجود یون‌های کربنات و بی کربنات در آب آبیاری، مصرف بالای کودهای فسفره و عدم کاربرد مدیریت شده عناصر کم مصرف در سال‌های گذشته احتمال کمبود در اغلب مناطق کشور وجود دارد. کمبود عناصر کم مصرف در برخی

۱، ۲ و ۴- به ترتیب فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشیار و دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: mbarani2002@yahoo.com

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شاهد، ایران

قلیایی و آهکی ممکن است در دسترس بودن عناصر کم مصرف مانند آهن، روی، منگنز، را کاهش دهد. عدم در دسترس بودن عناصر به طور انحصاری عناصر کم مصرف آهن، روی، یک مشکل جدی در خاک‌های دارای pH بالا است که با کاهش محصول به پایان می‌رسد و در نهایت منجر به سوء تغذیه در انسان می‌شود (Ramzani et al., 2016). زغال زیستی یک ماده قلیایی است، اصلاح زغال زیستی با اسیدها باعث افزایش در دسترس بودن عناصر غذایی گیاهان در خاک‌های قلیایی می‌شود، و اثر مثبت زغال زیستی اصلاح‌شده اسیدی بر رشد گیاه را می‌توان ناشی از افزایش عناصر گیاه در زغال زیستی و همچنین خاک دانست (Shahin et al., 2017). اصلاح زغال زیستی با اسید فسفریک ممکن است باعث افزایش عناصر غذایی کلسیم، پتاسیم، فسفر، آهن، منیزیم، روی، منگنز، مس، شود و از این طریق سبب بهبود قابل توجه در تغذیه معدنی گیاهان رشد یافته در خاک‌های آهکی شود (Shahin et al., 2017). حسن پور و همکاران (Hasanpour et al., 2022) در بررسی بیوچارهای اسیدی بر برخی ویژگی‌های شیمیایی و قابلیت جذب عناصر غذایی خاک‌های آهکی گزارش کردند که کاربرد بیوچار اسیدی در خاک‌های قلیایی در مجموع: بنظر بهتر است نمک و شوری از عنوان مقاله و سایر جملات مرتبط در متن مقاله حذف شود برخی ویژگی‌های شیمیایی و حاصلخیزی خاک را بهبود ببخشد. گیاه کینوا یک محصول متحمل به شوری است. کینوا را می‌توان در بسیاری از محیط‌های حاشیه‌ای مبتلا به خشک‌سالی و یا تنش شوری که در حال حاضر دارای بهره‌وری بسیار پایین هستند کشت کرد (Jacobsen et al., 2002). کینوا یک گیاه بومی منطقه‌ای از خانواده‌ی تاج خروس (Amaranthaceae) است و هزاران سال به عنوان یک محصول غذایی اصلی مورد استفاده قرار گرفته است (Martinez et al., 2015). دانه کینوا منبع عالی از منگنز، آهن و پتاسیم، مس، روی و فسفر است و نیز حاوی ویتامین B از جمله ریبوفلاوین، تیامین است. کینوا مقدار پروتئین زیادتری نسبت به اکثر غلات داشته و کیفیت پروتئین آن بالاتر و از توازن اسید آمینه بیشتری برخوردار است حسن زاده و همکاران (Hassanzadeh et al., 2012). با توجه به این نکته که اکثر زغال زیستی تولید شده دارای pH قلیایی بوده و مناسب خاک‌های اسیدی هستند. تولید زغال زیستی اسیدی برای کاربرد در خاک‌های آهکی مناطق خشک و نیمه خشک مناسب است ولی مطالعات زیادی در این خصوص صورت نگرفته است. از این رو، هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر کاربرد زغال زیستی کاه برنج و زغال زیستی اصلاح شده آن با اسید (پیش اسیدی- پس اسیدی) بر مقدار انواع رنگدانه‌های فتوسنتزی به عنوان شاخص فیزیولوژیک و غلظت عناصر کم مصرف در گیاه کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) در یک خاک آهکی است.

عناصر کم مصرف (آهن، روی، مس و منگنز) در خاک‌های آهکی بسیار کم است، اگرچه غلظت کل این عناصر ممکن است به نسبت زیاد باشد (Ding et al., 2019). کمبود آهن منجر به بروز عارضه زرد برگی، کاهش فتوسنتز و غلظت کلروفیل و کاهش وزن خشک بخش‌های هوایی و ریشه می‌شود (Mahmoudi et al., 2005). روی در بسیاری از سیستم‌های آنزیمی گیاه مانند کربنیک انهیدراز و الکل دهیدروژناز نقش کاتالیزوری، فعال کنندگی و یا ساختمانی دارد. روی همچنین در ساخته شدن پروتئین‌ها دخالت دارد. کمبود مس و منگنز مشابه سایر عناصر کم مصرف بیشتر در خاک‌هایی بروز می‌کند که pH قلیایی دارند و علائم کمبود منگنز به صورت زردشدن مزوفیل و ایجاد لکه‌های رنگ پریده و سبز کم رنگ روی سطح برگ نمایان می‌شود (Allahwardi et al., 2014). تحقیقات نیز نشان داده که کودهای آلی یکی از مهمترین کودها در کشاورزی می‌باشند که باعث بهبود حاصلخیزی خاک و کاهش اتلاف کود شده، اثر مثبت و معنی داری بر افزایش عملکرد محصولات زراعی دارند (Ming-gang, et al., 2016; Yazdan Panah and Metalebi., 2008). اغلب کشاورزان کاه برنج را در مزارع می‌سوزانند که باعث آلودگی محیط زیست و کاهش باروری زمین و انتشار میزان زیادی دی اکسیدکربن (گاز گلخانه‌ای) می‌شود. این پوسته بسیار مقرون به صرفه برای کشاورزی، خوراک دام و سوخت کارخانه‌ها است. پوسته برنج به عنوان یک محصول فرعی با ارزش است که بیشتر به عنوان جاذب به خصوص برای جذب فلزهای سنگین به جای روش‌های گران قیمت استفاده می‌شود (Lahiji et al., 2016). تبدیل بقایای کشاورزی به زغال زیستی از طریق حرارت‌دهی مزایای بیشتری از روش‌های معمول دفع دارد، از جمله کاهش حجم زباله‌ها از طریق گرماکافت، حذف خطر پاتوژن‌ها، آلاینده‌های آلی و حذف عناصر سنگین می‌باشد (Lehmann et al., 2006). زغال زیستی نه تنها غنی از کربن است بلکه سرشار از عناصر غذایی گیاهی می‌باشد (Ippolito et al., 2006). یکی از مهمترین جنبه‌های استفاده زغال زیستی توانایی آن در تأمین عناصر غذایی برای گیاهان دچار کمبود عنصر غذایی و در خاک‌های کم بارور و تخریب شده می‌باشند (Novak et al., 2009; Woolf et al., 2010). زغال زیستی ماده‌ای متخلخل با سطح ویژه بالاست که می‌تواند اثرات معنی‌داری بر رطوبت خاک و پویایی عناصر غذایی داشته باشد (Lehmann et al., 2003). از دیگر اثرات سودمند کاربرد زغال زیستی در خاک‌های کشاورزی به افزایش ماده آلی خاک، بهبود نگهداری آب در خاک، افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و تعامل با چرخه مواد غذایی خاک از طریق تعدیل pH خاک، افزایش حاصلخیزی خاک و کاهش آبشویی عناصر غذایی می‌توان اشاره کرد (Glaser et al., 2002). تاثیرات زغال زیستی در خاک‌های قلیایی و اسیدی متفاوت است (Farrel et al., 2014). استفاده از زغال زیستی pH خاک را افزایش می‌دهد (Chan et al., 2007). افزایش pH خاک در خاک‌های

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های خاک: در این پژوهش، تاثیر کاربرد زغال زیستی و زغال زیستی اصلاح شده با اسید (پیش اسیدی- پس اسیدی) بر مقدار برخی شاخص‌های فیزیولوژیک و غلظت عناصر کم مصرف در گیاه کینوا رقم گیزاوان در یک خاک آهکی مورد بررسی قرار گرفت. خاک مورد استفاده از عمق ۰-۳۰ سانتی متری منطقه آق قلا استان گلستان برداشته شد. پس از هوا خشک شدن، از الک ۲ میلی متری عبور داده شده و برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به روش هیدرومتری (Day, 1995)، pH و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره گل اشباع (Roades, 1996)، کربن آلی (Walkey and Black., 1934)، ظرفیت تبادل کاتیونی، نیتروژن کل به روش کج‌لدال (Benton and Cas, 1990)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1954)، پتاسیم قابل استفاده با استفاده از عصاره گیری با اسات آمونیوم (Page et al., 1982) و آهن، روی، منگنز و مس به وسیله دستگاه جذب اتمی (مدل 919A، ساخت Unicam انگلستان) بعد از عصاره گیری خاک با DTPA به روش لیندزی و نورول (Lindsay and Norvell, 1978) اندازه گیری شدند (جدول ۱).

تولید زغال زیستی: کاه گیاه برنج مورد استفاده در تهیه زغال زیستی از مزارع برنج استان گلستان جمع‌آوری شدند. بقایای جمع‌آوری شده پس از هوا خشک شدن، آسیاب شده و برای اطمینان از یکنواختی نمونه‌ها در طی گرماکافت از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. مقدار کافی از هر نمونه به وسیله ورقه‌های آلومینیمی پوشانده شد تا شرایط دسترسی اکسیژن محدود ایجاد گردد (Shahin et al., 2017; Taskin et al., 2019). سپس گرماکافت نمونه‌ها در کوره الکتریکی در دمای ۴۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت با آهنگ افزایش دمای کوره ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه انجام گرفت (Komkiene and Baltreinaite, 2016). یک شبانه روز به نمونه‌ها اجازه داده شد تا به دمای محیط برسند و سپس وزن نهایی آنها اندازه‌گیری شد. درصد کاهش وزن بقایا بر اثر گرماکافت و تبدیل به زغال زیستی (عملکرد زغال زیستی) و محتوای خاکستر نیز به ترتیب از فرمول ۱ و ۲ محاسبه گردید (Song and Guo, 2012). همچنین مقادیر pH، قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۲۰، پتاسیم و سدیم، کلسیم، منیزیم، کلر محلول، نیز با استفاده از روش‌های مرسوم اندازه‌گیری شد (Song and Guo, 2012).

$$(۱) \quad \frac{(g) \text{ وزن زیستی زغال}}{(g) \text{ وزن خشک آون ماده آلی خام}} \times 100 = \text{راندمان تولید زغال زیستی (درصد)}$$

$$(۲) \quad \frac{(g) \text{ وزن خاکستر}}{(g) \text{ وزن خشک زیستی زغال}} \times 100 = \text{درصد محتوای خاکستر}$$

اصلاح زغال زیستی با اسید با دو روش زیر انجام خواهد گرفت (Shahin et al., 2017). در روش اول، پس از گرماکافت و تهیه زغال زیستی روش پس‌اسیدی^۱؛ نمونه زغال زیستی با افزودن اسید کلریدریک (غلظت یک مولار، نسبت ۱:۵۰؛ هم زدن با همزن مغناطیسی به مدت ۳ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) اصلاح شدند. پس از سرد شدن، بخش جامد با فیلتر جداسازی شده و در آون در دمای ۶۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۴ ساعت خشک و آنگاه در ظروف سربسته نگهداری شد (Shahin et al., 2017; Peiris et al., 2019). در روش دوم از روش اصلاح پیش اسیدی^۲ استفاده شد. بدین منظور، اسید کلریدریک (غلظت یک مولار، نسبت ۱:۵۰؛ هم زدن با همزن مغناطیسی به مدت ۳ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس) به کاه برنج اضافه شد و سپس مانند تهیه زغال زیستی گرماکافت شدند (Shahin et al., 2017).

آزمایش گلخانه‌ای: آزمایش گلدانی به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در چهار تکرار در گلخانه دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۴۰۰ به اجرا در آمد. فاکتورها شامل سه نوع زغال زیستی (اصلاح نشده، اصلاح شده با روش پیش‌اسیدی و اصلاح شده با روش پس‌اسیدی) و سطوح مختلف زغال زیستی (۰، ۲ و ۵ درصد وزنی) در مجموع ۳۶ گلدان بودند. ۵ کیلوگرم خاک هوا خشک و عبور داده شده از سرنده به همراه اعمال تیمار زغال زیستی اصلاح نشده و زغال زیستی اصلاح شده به روش پیش و پس اسیدی داخل گلدان‌های پلاستیکی ۵ کیلویی ریخته شد. به هر گلدان بر اساس آزمون خاک اوره، سولفات پتاسیم، سوپر فسفات تریپل به عنوان منابع تامین کننده نیتروژن، پتاسیم، فسفر، قبل از کاشت اضافه شد. لازم به ذکر است که هیچ گونه کود کم مصرفی استفاده نشده است. گلدان‌ها به رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) رسانیده شده و سه روز بعد از آن نسبت به کاشت بذر اقدام گردید. تعداد ۱۰ عدد بذر کینوا در هر گلدان در عمق ۲ سانتی متری خاک کاشته و پس از سبز شدن و استقرار کامل، تعداد بوته‌ها به ۳ عدد در هر گلدان تقلیل یافت. به منظور حذف اثرات محیطی در داخل گلخانه، در طول دوره رشد جای گلدان‌ها دو بار در هفته به صورت تصادفی تغییر داده شد. علاوه بر ازت اضافه شده قبل از کشت، کود اوره یک بار یک ماه پس از کشت و بار دیگر در زمان وارد شدن به فاز زایشی به صورت سرک به خاک گلدان‌ها اضافه شد. عملیات آبیاری و وجین علف‌های هرز با دست انجام گرفت. رطوبت خاک گلدان‌ها در طول دوره رشد گیاه در حدود ظرفیت مزرعه به روش وزنی تامین شد. پس از پایان دوره رشد (۱۸۷ روز) گیاهان برداشت شدند، گیاهان به صورت کفبر برداشت و ابتدا با آب شهری سپس با آب مقطر شسته و روی تورهای پلاستیکی پخش شدند تا آب اضافی موجود در سطح آنها حذف شود. سپس نمونه‌ها در دمای ۷۰ درجه

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های مهم زغال زیستی و زغال زیستی اصلاح شده با اسید (پیش‌اسیدی - پس‌اسیدی) در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مقدار هدایت الکتریکی عصاره ۲۰:۱ زغال زیستی اصلاح نشده برابر با ۴/۴۰ دسی‌زیمنس بر متر و مقدار آن برای زغال زیستی پس‌اسیدی و پیش‌اسیدی به ترتیب ۹/۵۰ و ۶/۴۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. همچنین pH عصاره ۲۰:۱ زغال زیستی اصلاح نشده برابر با ۸/۱۵ است این در حالی است که مقدار pH زغال زیستی پیش‌اسیدی و پس‌اسیدی به ترتیب برابر ۳/۸۰ و ۲/۳۴ بود. افزایش مقدار هدایت الکتریکی و کاهش pH در زغال زیستی اصلاح شده با اسید در این پژوهش با نتایج (Sahin et al., 2017) مطابقت داشت. لازم به ذکر است که کاهش مقدار pH زغال زیستی اصلاح شده با اسید ممکن است به طور بالقوه برای استفاده در خاک‌های قلیایی مفید باشد (Sahin et al., 2017). در اثر اصلاح زغال زیستی به زغال زیستی اسیدی مقدار کربن آلی کاهش یافت که این کاهش مقدار کربن می‌تواند به علت تجزیه مواد آلی در اثر واکنش با اسید باشد. همچنین نتایج ارائه شده جدول ۲ نشان می‌دهد که زغال زیستی پس‌اسیدی در مقایسه با زغال زیستی پیش‌اسیدی و زغال زیستی اصلاح نشده دارای مقدار سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و کلر بیشتری بود. این افزایش سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و کلر در نتیجه اصلاح زغال زیستی با اسید توسط پژوهشگران دیگر مانند ساهین و همکاران (Sahain et al., 2017) نیز گزارش شده است. احتمالاً دلیل بیشتر بودن این کاتیون‌ها در زغال زیستی پس‌اسیدی نسبت به زغال زیستی پیش‌اسیدی و اصلاح نشده می‌تواند ناشی از افزایش غلظت این کاتیون‌ها در اثر تبدیل بقایای کشاورزی به زغال زیستی باشد که سپس در اثر واکنش با اسید به صورت محلول درآمده است (Song and Go, 2012). کوهکن و همکاران (Kookana et al., 2011) نیز افزایش نسبی فلزات قلیایی در زغال زی‌طلدطل ستی را در اثر گرماکافت مواد خام گزارش کردند.

سلسیوس تا رسیدن به وزن ثابت قرار گرفتند و بعد از آن وزن خشک آن‌ها اندازه‌گیری گردید. هضم نمونه‌های گیاهی با روش خشک سوزانی انجام گرفت (Jones and Case 1990). غلظت آهن، روی، مس و منگنز در نمونه‌ها با دستگاه جذب اتمی (AAS-Unicam-919) تعیین شد و میزان کلروفیل a، کلروفیل b، کلروفیل کل و کارتنوئید برگ‌ها با استفاده از روش آرنون (Arnon, 1949) اندازه‌گیری شدند. بدین منظور، ۰/۲ گرم برگ در استون ۸۰ درصد هموژن گردید. پس از سانتریفیوژ، محلول روئی برداشت و جذب آن در ۶۴۵، ۶۶۳، ۴۸۰ و ۵۱۰ نانومتر با استفاده از روش اسپکتروفتومتری اندازه‌گیری شد. آنگاه، توسط فرمول‌های زیر (رابطه ۳ تا ۶) مقادیر کلروفیل برحسب میلی‌گرم در گرم وزن تر برگ محاسبه شد (Arnon, 1949). در این روابط، A بیانگر جذب طول موج بر حسب نانومتر، V حجم نهایی کلروفیل در استون و W وزن تر بافت برحسب گرم می‌باشد.

$$(3) \quad 12.7(663A) - 2.69(645A) * V/W * 1000 = \text{غلظت کلروفیل a}$$

$$(4) \quad 22.9(645A) - 4.68(663A) * V/W * 1000 = \text{غلظت کلروفیل b}$$

$$(5) \quad 20.9(645A) - 8.02(663A) * V/W * 1000 = \text{غلظت کلروفیل کل}$$

$$(6) \quad 7.6(480A) - 1.49(510A) * V/W * 1000 = \text{غلظت کارتنوئید}$$

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

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش
Table 1- Some physico-chemical properties of soil used in the experiment

CEC	بافت خاک	شن	سیلت	رس	مس	منگنز	روی	آهن	پتاسیم	فسفر	نیتروژن	کربن	درصد	قابلیت هدایت
cmol ⁺ kg ⁻¹	Soil texture	Sand	Silt	Clay	Cu	Mn	Zn	Fe	قابل جذب	قابل جذب	کل	آلی	آهک	الکتریکی
									K avail	P avail	N (%)	OC (%)	EC (dS m ⁻¹)	pH
8.16	سیلتی لوم	48	41.4	10.6	1.42	7.8	2.24	3.95	330	7.73	0.09	1.1	20.6	5.10

نتايج ارائه شده در **جدول ۲** همچنين نشان مى دهد مقدار محتوى خاکستر و راندمان توليد زغال زيستى در زغال زيستى پس اسيدى بيشتر از زغال زيستى پيش اسيدى و زغال زيستى معمولى مى باشد. بنابر گزارش ساهين و همكاران (Shain et al., 2017) در بررسى بيوچار تهيه شده از كود مرغى معمولى و بيوچار اصلاح شده با اسيد فسفريك و اسيد نيتريك با pH ۴/۴۶ و $Ec = 31/90$ گزارش كردند كه مقادير آهن، روى، منگنز و مس در بيوچار معمولى بيشتر از بيوچار اصلاح شده است كه با نتايج اين پژوهش مطابقت دارد (**جدول ۲**).

نتايج تجزيه واريانس داده ها حاكي از آن است كه نوع و مقدار مصرف زغال زيستى و اثر متقابل آنها بر مقادير كلروفيل (a, b و كل) و كارتنوئيد در سطح احتمال يك درصد ($p < 0/01$) معنى دار شد (**جدول ۳**). مقايسه ميانگين هاى اثر تيمارهاى مورد بررسى نشان داد با افزايش سطوح مصرف هر سه نوع زغال زيستى مقدار كلروفيل a افزايش يافت (**جدول ۴**). بيشترين مقدار كلروفيل a با ميانگين $2/85$ ميلى گرم بر گرم

تازه گياه از تيمار ۵ درصد زغال زيستى پس اسيدى بدست آمد هر چند با تيمار ۵ درصد زغال زيستى پيش اسيدى با ميانگين $2/35$ ميلى گرم بر گرم تازه گياه از لحاظ آمارى اختلاف معنى دار نداشت (**جدول ۴**). همچنين جدول مقايسه ميانگين هاى تيمارها نشان مى دهد بيشترين مقدار كلروفيل b با ميانگين $1/54$ ميلى گرم بر گرم تازه گياه مربوط به تيمار ۵ درصد زغال زيستى پس اسيدى بود كه نسبت به زغال زيستى پس اسيدى در سطح ۲ درصد، افزايشى معادل $22/22$ درصد داشت (**جدول ۴**). غلظت كلروفيل برگ، شاخص مستقيم سلامتى گياه و وضعيت رشد آن است و مى تواند شاخصى از فعاليت فتوسنتزى گياه باشد (Boostani et al., 2017). افزايش محتوى كلروفيل به عنوان عامل مهم در دستگاه فتوسنتزى گياه موجب افزايش رشد آن مى شود. نتايج اين پژوهش نشان مى دهد كه هر سه نوع بيوچار بر روند رشد و مقدار كلروفيل گياه كينوا در خاک آهكى و شور اثر مثبت داشته و آن را افزايش داده است.

جدول ۲- برخى مشخصات شيميايى بيوچار اصلاح شده با اسيد و بيوچار معمولى

Table 2- Some chemical properties of modified with acid and unmodified biochar

پارامترهاى اندازه گيرى شده Measured parameter	بيوچار معمولى Unmodified biochar	بيوچار پس اسيدى Post -acid biochar	بيوچار پيش اسيدى Pre-acid biochar
هدايت الكتريكي $1:20$ $EC_{1:20}$ (dS/m)	4.40	9.50	6.45
پ هاش pH	8.15	2.34	3.80
راندمان توليد بيوچار Biochar yield (%)	40	80	45
محتواى خاکستر Ash content (%)	22	38	25
كربن آلى درصد OC (%)	52.65	21.45	36.07
سديم محلول $1:20$ $Na_{1:20}$ (meq/L)	108.41	133.85	122.11
پتاسيم محلول $1:20$ $K_{1:20}$ (meq/L)	46.68	53.37	47.32
كلسيم محلول $1:20$ $Ca_{1:20}$ (meq/L)	3.2	5.2	4
منيزيم محلول $1:20$ $Mg_{1:20}$ (meq/L)	2	4	3.2
كلر محلول $1:20$ Cl (meq/L)	5	31	17
آهن $Fe(mg\ kg^{-1})$	254.1	2132.55	3680.25
رؤى $Zn(mg\ kg^{-1})$	9.45	30.45	27.3
منگنز $Mn(mg\ kg^{-1})$	112.35	217.35	212.1
مس $Cu(mg\ kg^{-1})$	1.05	46.2	18.9

ران و همکاران (Ran et al., 2020) در بررسی اثر زغال زیستی بر گیاه برنج در یک خاک شور گزارش کردند که استفاده از زغال زیستی تأثیر قابل توجهی بر افزایش وضعیت آب برگ، ارتفاع گیاه و شاخص محتوای کلروفیل با کاهش نشت الکترولیت برگ داشت. آدجومو و همکاران (Adejumo et al., 2016) با کاربرد دو نوع زغال زیستی حاصل از بقایای آفتابگردان و سبوس برنج تهیه شده در دمای (۳۰۰ درجه سلسیوس) با pH اسیدی و در سه سطح مختلف (۵، ۱۰ و ۱۵ تن در هکتار) در یک آزمایش مزرعه‌ای در کشت ذرت بیان کردند که کاربرد هر دو نوع زغال زیستی سبب افزایش معنی مقدار کلروفیل برگ ذرت نسبت به تیمار عدم کاربرد بیوجار شد. تسکین و همکاران (Taskin et al., 2019) گزارش کردند که اصلاح زغال زیستی با اسید محتوای کلروفیل را نسبت به شاهد افزایش داد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که زغال زیستی اصلاح شده با اسید که دارای pH ۴/۲۱ و Ec ۳۰ دسی‌زیمنس، میزان کلروفیل گیاه ذرت را نسبت به تیمار شاهد در یک خاک شور ۷۰ درصد افزایش داد. در همین راستا عباسی و همکاران (Aabbasi et al., 2015) گزارش کردند که افزایش فتوسنتز و بهبود رشد گیاه کینوا ناشی از زغال زیستی کاه گندم اسیدی شده است که این افزایش فتوسنتز با نتایج این پژوهش مطابقت دارد. رضائی و همکاران (Ramzani et al., 2017) گزارش کردند که اصلاح زغال زیستی با اسید سرعت فتوسنتز و محتوای کلروفیل گیاه کینوا را در یک خاک شور افزایش داد. آنها همچنین گزارش کردند زغال زیستی اسیدی

محتوای کلروفیل گیاه کینوا را به میزان ۶۱ درصد نسبت به تیمار شاهد افزایش داد که این افزایش محتوای کلروفیل گیاه کینوا را به حل شدن عناصر غذایی زغال زیستی پس از اسیدی شدن نسبت دادند. نتایج آزمون مقایسه میانگین‌ها نشان داد که با افزایش سطح هر سه نوع زغال زیستی مقادیر کلروفیل کل و کارتنوئید افزایش یافت به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل کل با میانگین ۴/۱۳ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه گیاه مربوط به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس‌اسیدی بود که نسبت به زغال زیستی پس‌اسیدی در سطح مصرف ۲ درصد، افزایشی معادل ۲۰/۴۰ درصد داشت (جدول ۴). همچنین بیشترین مقدار کارتنوئید با میانگین ۱/۳۶ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه از تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس‌اسیدی بدست آمد هر چند با تیمار ۵ درصد زغال زیستی پیش‌اسیدی با میانگین ۱/۰۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تازه از لحاظ آماری اختلاف معنی‌دار نداشت.

نقش اصلی کارتنوئید جلوگیری از آسیب اکسیداتیو می‌باشد، در واقع کارتنوئیدها از طریق فروکش کردن سریع وضعیت برانگیخته کلروفیل، حفاظت نوری را انجام می‌دهند. در شرایط تنش مقدار کارتنوئید کاهش یافته و نمی‌تواند نقش حفاظتی خود را انجام دهد، ولی کاهش آن‌ها نسبت به کلروفیل‌ها کمتر است. کاهش محتوای کارتنوئید به دلیل اکسید شدن توسط اکسیژن فعال و تخریب ساختار آن‌ها است (Wang et al., 2010).

جدول ۳- تجزیه واریانس اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا

Table 3- Analysis of variance of the effect of different types and levels of biochar application on the physiological traits of quinoa

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square			
		کلروفیل a Chlorophyll a	کلروفیل b Chlorophyll b	کلروفیل کل Total Chlorophyll	کارتنوئید Carotenoid
نوع زغال زیستی Biochar(B)	2	5.04**	1.33**	11.70**	0.65**
سطوح مختلف Different levels (DL)	2	8.50**	2.23**	19.62**	1.56**
زغال زیستی * سطوح B*DL	4	1.27**	0.28**	2.79**	0.18**
اشتباه آزمایشی Error	27	0.002	0.003	0.01	0.006
ضریب تغییرات C.V (%)		4.03	7.42	6.06	13.18

** تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد

** Significant at 1% probability level

(جدول ۶).

کمبود عناصر کم مصرف، به ویژه آهن و روی باعث تغییرات فیزیولوژیکی در مورفولوژی برگ می‌شود (Eichert et al., 2010)، که می‌تواند منجر به رشد ضعیف گیاه شود فراهمی زیستی عناصر غذایی منحصراً عناصر کم مصرف (آهن، روی) یک مشکل جدی در خاک‌های با pH بالا است که منجر به کاهش عملکرد محصولات می‌شود و در نهایت می‌تواند منجر به سوء تغذیه در انسان شود (Ramzani et al., 2016b). میزان مواد آلی در کلیه مناطق استان گلستان از حد متوسط جهانی (دو درصد کربن آلی) و همچنین حد بحرانی آن در خاک (بیش از یک درصد) کمتر بوده و در این شرایط به دلیل pH بالای خاک، عدم قابلیت جذب عناصر غذایی کم مصرف آهن، روی، مس، منگنز از مهمترین عوامل محدودکننده رشد گیاه و تولید محصول بشمار می‌رود (Sharifian et al., 2022). همچنین حضور کربنات و بی‌کربنات در محلول خاک‌های آهکی نیز مشکل را دوچندان نموده و از طرق مختلف جذب عناصر کم مصرف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. زغال زیستی یک ماده قلیایی است، اصلاح زغال زیستی با اسیدها به علت کاهش مقدار pH زغال زیستی اصلاح شده با اسید می‌تواند دسترسی به عناصر غذایی گیاه را در خاک‌های قلیایی افزایش دهد (Sahin et al., 2017). اینال و همکاران (Inal et al., 2015) اثر زغال زیستی اسیدی بر رشد گیاه لوبیا را در یک خاک آهکی بررسی کردند آن‌ها گزارش کردند زغال زیستی اسیدی غلظت، آهن، روی، مس و منگنز به ترتیب ۵، ۱۷، ۴۰، ۲۵، ۲۲ درصد در نسب به شاهد در گیاه لوبیا (*Phaseolus vulgaris*) افزایش داد. آنها همچنین بیان کردند تأثیر زغال زیستی اسیدی بر غلظت روی برای گیاه لوبیا بیشتر از زغال زیستی اصلاح نشده و شاهد بود.

نمک‌ها در فعالیت‌های اسمزی بالا با محدود کردن جذب آب توسط ریشه‌ها بر رشد گیاه تأثیر می‌گذارند، شوری می‌تواند بر رشد گیاه تأثیر بگذارد زیرا غلظت بالای نمک در محلول خاک باعث اختلال در جذب یون‌های تغذیه‌ای ضروری توسط گیاهان می‌شود (Abdel et al., 2018). زغال زیستی اصلاح شده با اسید می‌تواند یک انتخاب سازگار با محیط زیست، و مؤثر در کاهش تنش‌های غیرزیستی در خاک شورسیدیک در نظر گرفته شود و بر بهره‌وری ذرت و گندم تأثیر مثبت بگذارد (El-Sharkawy et al., 2022). برآیند کلی این مکانیسم‌ها در نهایت منجر به افزایش غلظت برخی عناصر و شاخص‌ها از قبیل محتوای کلروفیل خواهد شد (He et al., 2014).

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها برای بررسی اثر تیمارها بر غلظت عناصر کم مصرف در گیاه، اثر نوع و مقدار زغال زیستی و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت آهن و روی در اندام هوایی کینوا در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌های اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد که با افزایش سطوح مصرف هر سه نوع زغال زیستی، غلظت آهن و روی در اندام هوایی افزایش یافت (جدول ۵). بیشترین غلظت آهن در اندام‌هوایی با میانگین ۲۲۹/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم از تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس‌اسیدی به دست آمد هرچند با تیمار ۵ درصد زغال زیستی پیش‌اسیدی با میانگین ۲۲۰/۴۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری نداشت و کمترین مقدار آن با میانگین ۹۵/۹۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به شاهد بود (جدول ۶). همچنین بیشترین مقدار غلظت روی در اندام هوایی با میانگین ۱۳/۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵ درصد بیوچار پس‌اسیدی بود که نسبت به تیمار ۵ درصد بیوچار پیش‌اسیدی و معمولی به ترتیب افزایشی معادل با ۱۳/۲۴ و ۳۳/۲۶ درصد داشت

جدول ۴- نتایج مقایسه میانگین‌های اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر صفات فیزیولوژیک گیاه کینوا
Table 4- Means comparison of the effect of different types and levels of biochar on the physiological traits of quinoa

نوع زغال زیستی The kind of biochar	مقدار مصرف	a کلروفیل Chlorophyll a (mg g ⁻¹)	b کلروفیل Chlorophyll b (mg g ⁻¹)	کلروفیل کل Total Chlorophyll (mg g ⁻¹)	کارتنوئید Carotenoid (mg g ⁻¹)
زغال زیستی معمولی Unmodified biochar	0%	0.33 ^e	0.29 ^g	0.62 ^e	0.22 ^f
	2%	0.37 ^e	0.42 ^f	0.79 ^e	0.42 ^e
	5%	0.88 ^d	0.57 ^e	1.45 ^d	0.49 ^e
زغال زیستی پس اسیدی Post -acid modified biochar	0%	0.33 ^e	0.36 ^{fg}	0.69 ^e	0.26 ^f
	2%	2.17 ^c	1.26 ^c	3.43 ^c	0.91 ^c
	5%	2.58 ^a	1.54 ^a	4.13 ^a	1.36 ^a
زغال زیستی پیش اسیدی Pre-acid modified biochar	0%	0.32 ^e	0.32 ^g	0.64 ^e	0.25 ^f
	2%	2.12 ^c	1.13 ^d	3.34 ^c	0.69 ^d
	5%	2.35 ^b	1.36 ^b	3.71 ^b	1.04 ^b

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

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

رضائی و همکاران (Ramzani et al., 2017) در بررسی بهبود رشد کینوا در دو خاک تحت تنش، تنش شوری و تنش خشکی با استفاده از زغال زیستی اسیدی و کمپوست اسیدی بیان کردند که زغال زیستی اسیدی غلظت آهن در دانه کینوا را در خاک تحت تنش شوری ۲۳ درصد و در خاک تحت تنش خشکی ۲۸ درصد نسبت به شاهد افزایش داد. آنها همچنین گزارش کردند که هر دو اصلاح اسیدی (زغال زیستی اسیدی و کمپوست اسیدی) فراهمی عناصر ضروری و متابولیسم آنتی اکسیدانی گیاه را افزایش می‌دهد نتایج حاصل از پژوهش آنها نیز نشان می‌دهد که زغال زیستی اسیدی برای بهبود رشد، عملکرد و ارزش غذایی کینوا در مقایسه با کمپوست اسیدی ارزشمندتر است. ساهین و همکاران (Sahin et al., 2017) گزارش کردند که اصلاح زغال زیستی با اسید فسفریک و اسید نیتریک با pH ۴/۴۶ و Ec ۳۱/۹۰ باعث افزایش غلظت روی در گیاه ذرت در یک خاک آهکی شد که این افزایش روی در گیاه توسط زغال زیستی اصلاح شده با اسید نیتریک بیشتر از زغال زیستی اصلاح شده با اسید فسفریک بود. آنها همچنین دریافتند که غلظت آهن در تیمار زغال زیستی پس‌اسیدی (اسید نیتریک) نسبت به زغال زیستی پیش‌اسیدی و شاهد افزایش یافت. جذب عناصر کم مصرف و تغذیه گیاهانی که در خاک آهکی رشد می‌کنند یک چالش است، اما اصلاح زغال زیستی راهی برای رفع این مشکل است. زغال زیستی نمی‌تواند بسیاری از عناصر ضروری را حداقل در کوتاه مدت به گیاه برساند. با این حال، اصلاح با اسید نیتریک یا با ترکیبی از اسید نیتریک و اسید سولفوریک ممکن است خلالت فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، مس و منگنز و دسترسی

گیاه به این عناصر در خاک افزایش دهد، و در نتیجه، تغذیه معدنی گیاهان رشد یافته در خاک‌های آهکی را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. در همین راستا تسکین و همکاران (Taskin et al., 2019) در بررسی تاثیر زغال زیستی اصلاح شده با اسید دارای pH ۴/۲۱ و Ec ۳۰ بر رشد و محتوایی عناصر ضروری و غیر ضروری در لوبیا، نخود، سویا و ذرت در خاک‌های آهکی گزارش کردند زغال زیستی اصلاح شده با اسید مقدار روی را در گیاه لوبیا، سویا و ذرت نسبت به زغال زیستی معمولی به ترتیب ۵/۳۹، ۶۳/۷۹ و ۵۱/۹۰ درصد افزایش دادند این در حالی است که زغال زیستی و زغال زیستی اصلاح شده با اسید بر روی گیاه نخود تاثیر معنی‌داری نداشت.

جدول ۵ همچنین حاکی از آن است که نوع و مقادیر مختلف زغال زیستی و اثر متقابل آن‌ها بر غلظت مس و منگنز در اندام‌هوایی کینوا در سطح احتمال یک درصد ($P < 0.01$) معنی‌دار شده است. نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۶) نشان می‌دهد که بیشترین غلظت منگنز در اندام-هوایی با میانگین ۲۳/۳۷ میلی گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس‌اسیدی بود که نسبت به زغال زیستی پس‌اسیدی ۲ درصد افزایشی معادل ۶/۴۶ درصد داشت. سافی و همکاران (Safi et al., 2012) گزارش کردند که شوری، غلظت منگنز اندام‌هوایی را در گیاه کلزا کاهش داد. شوهد توماس و همکاران (Thomas et al., 2013) نشان می‌دهد که تاثیر زغال زیستی بر رشد گیاهان در خاک های شور وابسته به گونه گیاهی است، کاربرد زغال زیستی به طور قابل توجهی رشد گیاه را بهبود بخشید.

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف زغال زیستی بر غلظت عناصر کم مصرف در اندام‌هوایی کینوا
Table 5- Analysis of variance of the effect of the application of different types and levels of biochar on the concentration of micronutrient elements in the aerial organs of quinoa

منابع تغییرات Source of variance	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean Square			
		غلظت آهن اندام هوایی Fe	غلظت روی اندام هوایی Zn	غلظت منگنز اندام هوایی Mn	غلظت مس اندام هوایی Cu
نوع زغال زیستی Biochar(B)	2	15203.91**	16.80**	58.91**	6.53**
سطوح مختلف Different levels (DL)	2	24874.93**	50.39**	290.95**	9.17**
زغال زیستی * سطوح B*DL	4	3128.90**	2.63**	32.64**	1.11**
اشتباه آزمایشی Error	27	130.88	0.02	0.22	0.009
ضریب تغییرات CV (%)		7.46	1.57	2.81	4.88

** تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد
** Significant at 1% probability level

مگنيز را در گياه لوبيا، نخود، سويا و ذرت نسبت به زغال زيستى معمولى به ترتيب ۷۶/۴۰، ۴۰/۸۳، ۸۵/۸۹ و ۱۷/۳۴ درصد افزايش داد. همچنين مقايسه ميانگين اثر تيمارهاى مورد بررسى نشان مى‌دهد كه افزايش سطوح در هر سه نوع زغال زيستى غلظت مس را در اندام‌هوايى گياه كينوا افزايش مى‌دهد به نحوى كه بيشترين غلظت مس در اندام‌هوايى با ميانگين ۳/۸۵ ميلي گرم بر كيلوگرم از تيمار ۵ درصد زغال زيستى پس اسيدى به دست آمد هرچند با تيمار ۵ درصد بيوچار پيش اسيدى با ميانگين ۲/۶۲ ميلي گرم بر كيلوگرم از لحاظ آمارى اختلاف معنى دارى نداشت (جدول ۶). رشد گياه كينوا در اثر تيمار اصلاح شده ي زغال زيستى توسط اسيد (اسيد كلردريك) بيشتر از تيمار زغال زيستى اصلاح نشده است كه اين افزايش رشد كينوا تحت تيمار پس اسيدى ممكن است به دليل افزايش در دسترس بودن عناصر غذايى براى گياه ميزبان باشد كه معمولاً از طريق کاهش pH خاك باعث دفع عناصر غذايى از سطوح كلوئيدي زغال زيستى و خاك مى‌شود (Sliber et al., 2010; Sahin et al., 2017). اينال و همكاران (Inal et al., 2015) در بررسى اثر بيوچار بر رشد گياه ذرت و لوبيا را در خاك آهكي گزارش كردند زغال زيستى غلظت مس و مگنيز را در گياه لوبيا افزايش داد. اصلاح زغال زيستى با اسيدهاى قوى ممكن است حلاليت در آب عناصر غذايى گياه در زغال زيستى و دسترسى گياه به عناصر غذايى در خاك را افزايش دهد تا تغذيه معدنى گياهان رشد يافته در خاك‌هاى آهكي بهبود يابد. حسن پور و همكاران (Hasanpour et al., 2022) در بررسى تأثير زغال زيستى اسيدى بر برخى ويژگي‌هاى شيميايى و قابليت جذب عناصر غذايى در خاك‌هاى آهكي گزارش كردند كه تركيب زغال زيستى توليد شده داراى pH اسيدى، سطوح داخلى و سطح ويژه زياد بوده همچنين غنى از عناصر غذايى هستند كه کاربرد آن در خاك قليايى مى‌تواند pH خاك را تعديل بخشد و مقادير مگنيز، آهن، روى و مس در اكثر تيمارها نسبت به شاهد افزايش دهد. طبق نتايج تسكين و همكاران (Taskin et al., 2019) زغال زيستى اصلاح شده با اسيد (اسيد نيتريك) با pH ۴/۲۱ در يك خاك آهكي (۵۷/۷ درصد آهك) مقدار مس را در گياه ذرت نسبت به تيمار زغال زيستى و شاهد به ترتيب ۲۴/۹۲ و ۲۴/۳۶ درصد افزايش دهد. كه با نتايج اين پژوهش مطابقت دارد. درواقع با توجه به جدول ۶ زغال زيستى پس اسيدى نتايج بهتري از نظر غلظت عناصر كم مصرف (آهن، روى، مس و مگنيز) در گياه كينوا نسبت به زغال زيستى اصلاح نشده داشت كه اين افزايش عناصر غذايى را مى‌توان به حل شدن عناصر غذايى زغال زيستى بعد از اسيدى شدن و pH اسيدى قوى اين بيوچار و قدرت آن در کاهش pH خاك و فراهمى اين عناصر نسبت داد.

كاربرد زغال زيستى در خاك با بهبود حفظ آب، كربن آلى خاك و در دسترس بودن عناصر از طريق افزايش تراكم ريشه، رشد گياه را افزايش مى‌دهد (Kappler et al., 2014; Ramzani et al., 2016). گزارش‌هاى زيادى وجود دارد كه زغال زيستى يك ماده آهكي بالقوه براى خاك اسيدى است (Lehmann, and Zech 2002; Yuan and Xu, 2011). زغال زيستى به صورت ذاتى داراى مقدار pH و هدايت الكتريكي بيشترى نسبت به محيط خاك است. از طرفى، اين افزودنى حاوى مواد قليايى (از قبيل خاكستر چوب)، برخوردار از بار منفى كربوكسيل و داراى عملکرد فنوليكي است كه مى‌تواند منجر به قليايى شدن خاك شود (Jin et al., 2019). بنابراين استفاده از زغال زيستى مى‌تواند pH خاك را افزايش دهد (Chan et al., 2007). و افزايش pH خاك در خاك‌هاى قليايى آهكي ممكن است دسترسى به فسفر و عناصر كم مصرف مانند آهن، روى، مس و مگنيز را کاهش دهد. به طور كلى، اثرات زغال زيستى بر بارورى خاك‌هاى قليايى آهكي به خوبى درك نشده است. اصلاح شيميايى زغال زيستى با اسيدها مى‌تواند راندمان جذب و سطح جذب آنرا افزايش دهد (Mayer et al., 2014). اصلاح زغال زيستى با اسيد سبب افزايش سطح ويژه به دليل افزايش ميكروپورها در زغال زيستى مى‌گردد. در همين راستا ويتانژ و همكاران (Vithanage et al., 2015) گزارش كردند كه اصلاح كردن زغال زيستى با اسيد سولفوريك سطح ويژه آن را افزايش مى‌دهد. زغال زيستى اسيدى، در دسترس بودن عناصر را با حل كردن عناصر غذايى و تجمع آن‌ها در گياه، افزايش مى‌دهد (Taskin et al., 2019). زغال زيستى مى‌تواند چگالى ظاهرى خاك را کاهش دهد كه منجر به افزايش رشد و نفوذ ريشه در خاك و جذب عناصر غذايى را از محلول خاك افزايش مى‌دهد (Lehmann and Joseph, 2015). ماده آلى به خصوص زغال زيستى كه در شرايط اسيدى توليد شده در طى تجزيه، تعدادى اسيدهاى آلى آزاد مى‌كند كه باعث کاهش pH خاك و افزايش دسترسى عناصر كم مصرف به ويژه مگنيز مى‌شود (Fu et al., 2012). ناروئى و همكاران (Naroi et al., 2022) در بررسى تأثير زغال زيستى برگ خرما و زغال زيستى ضايعات پسته بر غلظت فلزات سنگين در گياه ذرت گزارش كردند كه کاربرد ۱ درصد زغال زيستى خرما موجب افزايش ۲۱ درصدى جذب مگنيز توسط گياه ذرت شد. ساهين و همكاران (Sahin et al., 2017) گزارش كردند كه زغال زيستى پس اسيدى شده با (اسيد نيتريك + اسيد فسفريك) و (اسيد نيتريك) باعث افزايش غلظت مگنيز در گياه ذرت نسبت به تيمار پيش اسيدى و شاهد در يك خاك آهكي شد. در همين رابطه تسكين و همكاران (Taskin et al., 2019) طى بررسى زغال زيستى اصلاح شده اسيدى كه داراى pH ۴/۲۱ و EC ۳۰ است بر رشد و محتوای عناصر گياهان لوبيا، نخود، سويا و ذرت در يك خاك آهكي (۵۷/۷ درصد آهك) دريافتند كه کاربرد زغال زيستى اصلاح شده با اسيد مقدار

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر کاربرد نوع و سطوح مختلف زغال زیستی و زغال زیستی اصلاح شده بر غلظت عناصر کم مصرف در اندام هوایی کینوا

Table 6- Comparison of the average effect of different types and levels of biochar and modified biochar on the concentration of micronutrient elements in quinoa aerial organs

غلظت مس اندام هوایی	غلظت منگنز اندام هوایی	غلظت روی اندام هوایی	غلظت آهن اندام هوایی	تیمار
Cu (mg kg ⁻¹)	Mn (mg kg ⁻¹)	Zn (mg kg ⁻¹)	Fe (mg kg ⁻¹)	Treatment
0.95 ^h	12.50 ^f	7.62 ^h	95.95 ^f	زغال زیستی معمولی
1.35 ^f	13.75 ^e	9.12 ^f	118.38 ^{de}	Unmodified
1.75 ^e	16.82 ^d	10.07 ^e	122.80 ^d	5%
1.20 ^g	10.62 ^g	8.17 ^g	102.08 ^{ef}	زغال زیستی پس اسیدی
3.40 ^b	21.95 ^b	12.27 ^b	200.00 ^b	2%
3.85 ^a	23.37 ^a	13.42 ^a	229.48 ^a	Post-acid modified
1.01 ^h	10.67 ^g	7.85 ^h	110.00 ^{def}	زغال زیستی پیش اسیدی
2.20 ^d	19.95 ^c	11.37 ^d	180.40 ^c	2%
2.60 ^c	21.75 ^b	11.85 ^c	220.48 ^a	Pre-acid modified
				5%

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

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

نتیجه‌گیری

بود که نسبت به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پیش اسیدی به‌ترتیب افزایشی معادل ۴/۰۸، ۱۳/۲۴، ۷/۴۴ و ۳۰/۷۶ درصد داشت. زغال زیستی پس‌اسیدی نتایج بهتری از نظر صفات فیزیولوژیک و غلظت عناصر کم مصرف (آهن، روی، مس و منگنز) نسبت به زغال زیستی اصلاح نشده در گیاه کینوا داشت که این افزایش عناصر غذایی را می‌توان به حل شدن عناصر غذایی زغال زیستی بعد از اسیدی شدن و کاهش pH خاک و فراهمی این عناصر نسبت داد. بنابراین زغال زیستی اصلاح شده با اسید یا زغال زیستی تولیدی از منابعی که دارای خاصیت اسیدی هستند را می‌توان به‌عنوان ابزاری مناسب برای بهبود حاصلخیزی و افزایش عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی توصیه کرد.

به طور کلی کاربرد زغال زیستی می‌تواند صفات فیزیولوژیک و فراهمی عناصر غذایی کم مصرف (آهن، روی، مس و منگنز) را افزایش دهد. نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد بررسی نشان داد با افزایش سطوح هر سه نوع زغال زیستی صفات فیزیولوژیک و فراهمی عناصر غذایی کم مصرف بهبود یافت به نحوی که بیشترین مقدار کلروفیل a، b، کل و کارتنوئید به ترتیب با میانگین ۲/۵۸، ۱/۵۴، ۴/۱۳ و ۱/۳۶ میلی‌گرم بر گرم تازه گیاه از تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس اسیدی بدست آمد. همچنین بیشترین غلظت آهن، روی، مس و منگنز در اندام‌هوایی به ترتیب با میانگین ۲۲۹/۴۸، ۱۳/۴۲، ۳/۸۵ و ۲۳/۳۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به تیمار ۵ درصد زغال زیستی پس‌اسیدی

منابع

- Abbasi, G.H., Akhtar, J., Anwar-ul-Haq, M., Malik, W., Ali, S., Chen, Z.H., & Zhang, G. (2015). Morpho-physiological and micrographic characterization of maize hybrids under NaCl and Cd stress. *Plant Growth Regulation*, 75, 115-122. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-9936-6>
- Abdel-Fattah, M.K. (2019). Reclamation of saline-sodic soils for sustainable agriculture in Egypt. *Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: Part II: Soil-Water-Plant Nexus*, 69-92. https://doi.org/10.1007/698_2018_310
- Adejumo, S.A., Owolabi, M.O., & Odesola, I.F. (2016). Agro-physiologic effects of compost and biochar produced at different temperatures on growth, photosynthetic pigment and micronutrients uptake of maize crop. *African Journal of Agricultural Research*, 11(8), 661-673.
- Allah Vardi Markdeh and longevity. (2014). Investigating the effect of copper and manganese on the amount of secondary compounds of lemongrass medicinal plant (*Mellisa officinalis*), international conference on applied research in agriculture. (In Persian)
- Arnon, D.I. (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. *Plant Physiology*, 24(1), 1.
- Benton Jones, J.R., & Case, V.W. (1990). Sampling, handling and analyzing plant tissue sample. *Soil Testing and Plant Analysis*, SSSA, (3).
- Boostani, H.R., Zarei, M., & Barati, V. (2017). Effects of application of biochar and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and chemical composition of corn (*Zea mays* L. 704) in a calcareous soil. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 7(2), 1-23. (In Persian with English abstract)
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007). Agronomic values of greenwaste

- biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634.
9. Day, P.R. (1965). Particle fractionation and particle size analysis. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9, 545-567.
10. Ding, W., Clode, P.L., & Lambers, H. (2019). Is pH the key reason why some *Lupinus* species are sensitive to calcareous soil?. *Plant and Soil*, 434, 185-201.
11. Eichert, T., Peguero-Pina, J.J., Gil Pelegrín, E., Heredia, A., & Fernández, V. (2010). Effects of iron chlorosis and iron resupply on leaf xylem architecture, water relations, gas exchange and stomatal performance of field grown peach (*Prunus persica*). *Physiologia Plantarum*, 138(1), 48-59.
12. El-Sharkawy, M., El-Naggar, A.H., AL-Huqail, A.A., & Ghoneim, A.M. (2022). Acid-modified biochar impacts on soil properties and biochemical characteristics of crops grown in saline-sodic soils. *Sustainability*, 14(13), 8190.
13. Farrell, M., Macdonald, L.M., Butler, G., Chirino-Valle, I., & Condon, L.M. (2014). Biochar and fertiliser applications influence phosphorus fractionation and wheat yield. *Biology and Fertility of Soils*, 50, 169-178.
14. Fu, P., Hu, S., Xiang, J., Yi, W., Bai, X., Sun, L., & Su, S. (2012). Evolution of char structure during steam gasification of the chars produced from rapid pyrolysis of rice husk. *Bioresource Technology*, 114, 691-697.
15. Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35, 219-230.
16. Hasanpour, I., Shirvani, M., Hajabbasi, M.A., & Majidi, M.M. (2022). Effect of acidic biochars on some chemical properties and nutrient availabilities of calcareous soils. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 26(2), 39-59. (In Persian)
17. He, Z., He, C., Zhang, Z., Zou, Z., & Wang, H. (2007). Changes of antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by arbuscular mycorrhizae under NaCl stress. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 59(2), 128-133.
18. Inal, A., Gunes, A.Y.D.I.N., Sahin, O.Z.G.E., Taskin, M.B., & Kaya, E.C. (2015). Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management*, 31(1), 106-113.
19. Jacobsen, S.E., Hollington, P.A., & Hussain, Z. (2002). Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), a potential new crop for Pakistan. *Prospects for Saline Agriculture*, 247-249.
20. Jin, Z., Chen, C., Chen, X., Hopkins, I., Zhang, X., Han, Z., & Billy, G. (2019). The crucial factors of soil fertility and rapeseed yield-A five year field trial with biochar addition in upland red soil, China. *Science of the Total Environment*, 649, 1467-1480.
21. Jones Jr, J.B., & Case, V.W. (1990). Sampling, handling, and analyzing plant tissue samples. *Soil Testing and Plant Analysis*, 3, 389-427.
22. Kappler, A., Wuestner, M. L., Ruecker, A., Harter, J., Halama, M., & Behrens, S. (2014). Biochar as an electron shuttle between bacteria and Fe (III) minerals. *Environmental Science & Technology Letters*, 1(8), 339-344.
23. Komkiene, J., & Baltrenaite, E. (2016). Biochar as adsorbent for removal of heavy metal ions [Cadmium (II), Copper (II), Lead (II), Zinc (II)] from aqueous phase. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13, 471-482.
24. Lahiji, F.A.S., Ziarati, P., & Jafarpour, A. (2016). Potential of rice husk biosorption in reduction of heavy metals from *Oryza sativa* rice. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13, 2231-2237.
25. Lahiji, F.A.S., Ziarati, P., & Jafarpour, A. (2016). Potential of rice Husk biosorption in reduction of heavy metals from *Oryza sativa* rice. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 13(4), 2231-2237.
26. Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics. *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, 113(517), e530.
27. Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249, 343-357.
28. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
29. Mahmoudi, H., Ksouri, R., Gharsalli, M., & Lachaâl, M. (2005). Differences in responses to iron deficiency between two legumes: lentil (*Lens culinaris*) and chickpea (*Cicer arietinum*). *Journal of Plant Physiology*, 162(11), 1237-1245.
30. Martínez, E.A., Fuentes, F.F., & Bazile, D. (2015). History of quinoa: its origin, domestication, diversification, and cultivation with particular reference to the Chilean context. *Quinoa: Improvement and Sustainable Production*, 19-24.
31. Mayer, Z.A., Eltom, Y., Stennett, D., Schröder, E., Apfelbacher, A., & Hornu, A. (2014). Characterization of engineered biochar for soil management. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33, 490-96. <https://doi.org/10.1002/ep.11788>
32. Ming-gang, X.U., Dong-chu, L.I., Ju-mei, L.I., Dao-zhu, Q.I.N., Yagi, K., & Hosen, Y. (2008). Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of Southern China.

- Agricultural Sciences in China*, 7(10), 1245-1252.
33. Nael, M., Khademi, H., Jalalian, A., Schulin, R., Kalbasi, M., & Sotohian, F. (2009). Effect of geo-pedological conditions on the distribution and chemical speciation of selected trace elements in forest soils of western Alborz, Iran. *Geoderma*, 152(1-2), 157-170.
 34. Naroi, A., Zamani, J., Kohestani, Sh., & Abbaszadeh Afshar, F. (2022). The effect of date leaf biochar and pistachio harvest waste biochar on corn growth and heavy metal concentration. *Agricultural Engineering*, 4, 44. 399-411. (In Persian)
 35. Novak, J.M., Busscher, W.J., Laird, D.L., Ahmedna, M., Watts, D.W., & Niandou, M.A. (2009). Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174(2), 105-112.
 36. Olsen, S.R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate* (No. 939). US Department of Agriculture.
 37. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of soil analysis: chemical and microbiological properties*, 2nd edn. American Society of Agronomy Inc, Madison.
 38. Peiris, C., Nayanathara, O., Navarathna, C. M., Jayawardhana, Y., Nawalage, S., Burk, G., ... & Gunatilake, S.R. (2019). The influence of three acid modifications on the physicochemical characteristics of tea-waste biochar pyrolyzed at different temperatures: a comparative study. *RSC Advances*, 9(31), 17612-17622.
 39. Ramzani, P.M.A., Khan, W.U.D., Iqbal, M., Kausar, S., Ali, S., Rizwan, M., & Virk, Z.A. (2016). Effect of different amendments on rice (*Oryza sativa* L.) growth, yield, nutrient uptake and grain quality in Ni-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 18585-18595.
 40. Ramzani, P.M.A., Shan, L., Anjum, S., Ronggui, H., Iqbal, M., Virk, Z.A., & Kausar, S. (2017). Improved quinoa growth, physiological response, and seed nutritional quality in three soils having different stresses by the application of acidified biochar and compost. *Plant Physiology and Biochemistry*, 116, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.05.003>
 41. Ran, C., Gulaqa, A., Zhu, J., Wang, X., Zhang, S., Geng, Y., ... & Shao, X. (2020). Benefits of biochar for improving ion contents, cell membrane permeability, leaf water status and yield of rice under saline-sodic paddy field condition. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(1), 370-377.
 42. Safi, D., Alikhani, H., & Motsharazadeh, B. (2012). The effect of plant growth promoting rhizobial bacteria on improving the nutritional conditions of rapeseed (*Barssica napus* L.) under salt stress. *Science of Water and Soil*, 23(4): 159-175. (In Persian)
 43. Sahin, O., Taskin, M.B., Kaya, E.C., Atakol, O.R.H.A.N., Emir, E., Inal, A., & Gunes, A.Y.D.I.N. (2017). Effect of acid modification of biochar on nutrient availability and maize growth in a calcareous soil. *Soil Use and Manaqement*, 33(3), 447-456.
 44. Sharifian Bahraman, A., Sepehry, A., & Barani, H. (2022). Soil physiochemical characteristics of Lycium depressum Stocks. habitat in saline and alkaline rangelands in north of Golestan Province, Iran. *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 9(19), 47-62. (In Persian)
 45. Silber, A., Levkovitch, I., & Graber, E.R. (2010). pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. *Environmental Science & Technology*, 44(24), 9318-9323.
 46. Song, W., & Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 138-145.
 47. Taskin, M. B., Kadioglu, Y. K., Sahin, O., Inal, A., & Gunes, A. (2019). Effect of acid modified biochar on the growth and essential and non-essential element content of bean, chickpea, soybean, and maize grown in calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 50(13), 1604-1613.
 48. Thomas, S.C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., ... & Winsborough, C. (2013). Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Manaqement*, 129, 62-68.
 49. Vithanage, M., Rajapaksha, A.U., Zhang, M., Thiele-Bruhn, S., Lee, S.S., & Ok, Y.S. (2015). Acid-activated biochar increased sulfamethazine retention in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 2175-2186. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3434-2>
 50. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
 51. Wong, V.N., Greene, R.S.B., Dalal, R.C., & Murphy, B.W. (2010). Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: a review. *Soil Use and Management*, 26(1), 2-11.
 52. Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 56.
 53. Yazdanpanah, A., & Motallebifard, R. (2017). The effects of chicken manure and potassium fertilizer on Yield and Nitrogen, Phosphorus, Potassium, Zinc and Copper Uptake of Potato. *Applied Soil Research*, 4(2), 60-71. (In Persian)
 54. Yuan, J.H., & Xu, R.K. (2011). The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol. *Soil Use and Management*, 27(1), 110-115.



Comparing Soil Taxonomy and WRB Efficiency for the Classification of Gypsiferous-Calcareous Soils in the West of Kohgiluyeh-Boyerahmad Province

H.R. Owliaie ^{1*}

Received: 19-08-2023

Revised: 13-09-2023

Accepted: 19-09-2023

Available Online: 18-09-2023

How to cite this article:

Owliaie, H.R. (2023). Comparing soil taxonomy and WRB for the classification of gypsiferous-calcareous soils in Kohgiluyeh-Boyerahmad province. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 603-620. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84009.1326>

Introduction

Soil classification is the systematic categorization of soils based on distinguishing soil characteristics, aiding in the comprehension of soil properties through soil surveys, and establishing suitable strategies for effective soil utilization and management. One of the main reasons for creating soil classification systems is to identify the differences in important soil characteristics for management purposes. Globally, Soil Taxonomy (ST) and the World Reference Base for soil resources (WRB) are widely used for soil classification. However, these two classification systems have varying criteria which can pose difficulties when exchanging classification results. After years of intensive worldwide testing and data collection, new versions of the ST and WRB systems have been released. In its current state, ST has a strong hierarchy with six categorical levels: order, suborder, great group, subgroup, family, and series (Soil Survey Staff, 2022), while the WRB has a flat hierarchy with only two categorical levels: reference soil groups and soil units (IUSS Working Group WRB, 2022). Several scientists have endeavored to evaluate the merits and demerits of these soil classification systems and offer recommendations for their enhancement. The arid and semi-arid regions located in the western and southwestern parts of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province, distinguished by their considerable diversity in parent materials, topography, climate, and land use, present an excellent opportunity for scrutinizing and contrasting the effectiveness of soil classification systems. Remarkably, no prior research has delved into this subject in this specific geographical area. Consequently, this research aims to compare the effectiveness of the ST and WRB systems in characterizing soil attributes. Furthermore, it seeks to analyze the alterations that these two systems have undergone during an eight-year period, spanning from 2014 to 2022.

Materials and Methods

This study was conducted in the western and southwestern regions of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province, specifically in the divisions of Gachsaran, Basht, Choram and Kohgiluyeh. A total of 26 soil profiles were excavated, described, and sampled based on aerial photos, satellite images, topographical and geological maps, as well as field observations. These profiles were selected following the soil description guide provided by the Department of Soil Conservation of the US Department of Agriculture. Subsequently, after reviewing the preliminary results and aligning with the research objectives, 12 representative soil profiles were chosen for further analysis. Soil samples were collected from all genetic horizons and transferred to the laboratory. After air-drying, the samples were passed through a two-millimeter sieve and the routine physical and chemical analyses were conducted, including soil texture, pH, electrical conductivity (EC), calcium carbonate equivalent (CCE), organic carbon, cation exchange capacity (CEC), and gypsum analyses. For mineralogical studies, soil clay minerals were separated and identified using standard methods. Additionally, soil thin sections were prepared from intact soil samples of selected soil horizons and examined under a polarizing microscope. Finally, the soil profiles were classified based on the criteria outlined in Soil Taxonomy (2022) and WRB (2022).

1- Associate Professor, Department of Soil Science, Yasouj University, Yasouj, Iran

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

DOI: [10.22067/jsw.2023.84009.1326](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.84009.1326)

Results and Discussion

Soil Taxonomy and WRB, as the two most popular classification systems, aim to encompass as many soil characteristics as possible. According to the ST classification, the soils were classified into four orders: Entisols, Inceptisols, Alfisols, and Mollisols. In the WRB system, they were grouped into seven reference soil groups: Regosols, Fluvisols, Luvisols, Cambisols, Kastanosems, Gypsisols and Glycols. The results revealed that WRB was significantly more effective in describing the characteristics of the studied soils. One of the key advantages of this two-level system is its flexibility, allowing for the inclusion of additional principal and supplementary qualifiers to cover all essential soil characteristics. Moreover, in many cases, WRB exhibits better prioritization compared to ST. For example, the presence of gypsic, combic, calcic horizons, as well as fluvic and gley properties, can allocate the soil to the reference groups of Gypsisols, Cambisols, Calsisols, Fluvisols, and Gleysols, respectively. However, a limitation of the WRB system is the absence of mineralogical information in soil classification. Enhancing this classification system's quality and making it more appealing to planners could be achieved by incorporating suitable mineralogical attributes for the reference groups or criteria that express soil fertility conditions with relatively straightforward measurements. In addition, it is proposed to add three subgroups to ST: Gypsic Haplustalfs, Fluventic Gypsiustepts and Cambic Haplustolls. Similarly, following the WRB model, it is recommended to introduce a qualifier in ST to indicate the presence of lithological discontinuity. Regarding the WRB system, suggestions include adding qualifiers such as "Cutanic" to gypsisols with clay films, "hypercalcic" to reference groups of Kastanozems and Luvisols with a calcic horizon comprising more than 50% of calcium carbonate, and "aridic" for better expression of soil characteristics with Aridic-Ustic moisture regimes.

Conclusion

The results of this research demonstrated that WRB is more effective in describing the conditions and characteristics of the studied soils. The WRB system, through its diverse set of qualifiers, is capable of representing field conditions more efficiently. However, it is suggested that the surveyors have the freedom to select an appropriate qualifier from the list provided by WRB without limitation, which can enhance its success in practical applications. Furthermore, it is recommended that both classification systems be used to categorize soils, not only to evaluate their efficiency for the soils in other regions but also to gain a comprehensive understanding of their suitability for different contexts.

Keywords: Arid and semi-arid regions, Classification system, Clay mineralogy, Soil



مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۶۲۰-۶۰۳

مقایسه کارایی سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی (ST) و جهانی (WRB) در گروه‌بندی خاک‌های گچی - آهکی غرب استان کهگیلویه و بویراحمد

حمیدرضا اولیایی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷

چکیده

طبقه‌بندی خاک، فرایند گروه‌بندی واحدهای خاک به کلاس‌های کم و بیش یکنواخت، با در نظر گرفتن اهدافی مشخص می‌باشد. یکی از دلایل اصلی ایجاد سامانه‌های طبقه‌بندی خاک، شناسایی تفاوت ویژگی‌های مهم خاک‌ها برای اهداف مدیریتی است. از میان سامانه‌های رده‌بندی در دنیا و ایران، دو سامانه رده‌بندی آمریکایی (ST) و جهانی (WRB) بیشترین کاربرد را دارند. این مطالعه به منظور مقایسه کارایی سامانه‌های رده‌بندی آمریکایی و جهانی در گروه‌بندی و بیان ویژگی‌های خاک‌های گچی - آهکی غرب استان کهگیلویه و بویراحمد انجام گرفت. دوازه خاک‌رخ شاهد در بخش‌های مختلف منطقه مطالعاتی، حفر، تشریح و نمونه‌برداری گردیدند و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی آنها در آزمایشگاه تعیین شدند. تمامی خاک‌رخ‌ها بر اساس دو سامانه مذکور رده‌بندی شدند. خاک‌ها بر اساس رده‌بندی آمریکایی، در چهار رده انتی‌سولز، اینسپتی‌سولز، آلفی‌سولز و مالی‌سولز و بر اساس طبقه‌بندی جهانی در هفت گروه مرجع رگوسولز، فلاوی‌سولز، لووی‌سولز، کمبی‌سولز، کاستانوزمز، جیپسی‌سولز و گلی‌سولز قرار گرفتند. با توجه به مطالعه انجام‌شده، سه زیرگروه Gypsic Haplustalfs، Fluventic Gypsiustepts و Cambic Haplustolls برای افزوده شدن به سامانه آمریکایی (ST) پیشنهاد می‌شوند. همچنین افزودن مشخصه‌ای به سامانه آمریکایی برای بیان ویژگی انقطاع سنگی همچون WRB پیشنهاد می‌شود. در ارتباط با سامانه جهانی، افزودن صفت Cutanic به جیپسی‌سول‌های دارای پوسته رسی، صفت hypercalcic به گروه‌های کاستانوزمز و لووی‌سولز دارای افق کلسیک با بیش از ۵۰ درصد کربنات و افزودن صفت aridic به منظور بیان بهتر ویژگی خاک‌های با رژیم‌های اریدیک-یوستیک پیشنهاد می‌گردند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که سامانه طبقه‌بندی جهانی (WRB) در بیان شرایط و ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه از کارایی بیشتری برخوردار بوده است. توصیه می‌شود در سایر مناطق با شرایط متفاوت، طبقه‌بندی خاک‌ها توسط هر دو سامانه رده‌بندی انجام شود تا نقاط ضعف و قوت آنها برای خاک‌های مناطق مختلف تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: سامانه رده‌بندی، کانی‌شناسی رس، مناطق خشک و نیمه‌خشک، همبستگی خاک

مقدمه

و مطالعه و شناسایی آن از ملزومات اجرای برنامه‌های مدیریت پایدار اکوسیستم است (Toomanian, 2006). بر این اساس، رده‌بندی خاک به عنوان یک روش تکنیکی با ارزش برای انتقال مفید و پربازده از مجموعه داده‌های خام، راهکاری ضروری در پهنه‌بندی ویژگی‌های

خاک به عنوان زمینه تعامل مهم‌ترین اجزای ساختارهای موجود در سطح زمین، شاخصی مناسب از چگونگی کیفیت زیست‌بوم بوده

۱- دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران
(Email: owliaie@gmail.com)

(*) - نویسنده مسئول:

البته ذکر این نکته لازم است که هر دو سامانه دارای معایبی بوده که از آن جمله نادیده گرفتن پویایی خاک و پیش‌بینی نکردن رفتار خاک در آینده می‌باشد (Schoeneberger et al., 2012). تأکید بیشتر سامانه جهانی بر مورفولوژی خاک و تلاش آن در راستای مختصر نمودن استفاده از تجزیه‌های آزمایشگاهی برای طبقه‌بندی خاک‌ها (Roca and Pazos, 2002)، کاربرد سامانه طبقه‌بندی جهانی را برای مناطقی که از امکانات نسبتاً کمتری برخوردار می‌باشند؛ مناسب‌تر ساخته است. برخلاف این‌که سامانه جهانی ابتدا برای نقشه‌برداری خاک، در نظر گرفته نشده بود، ولی در برخی از کشورها از آن به‌منظور پهنه‌بندی خاک‌ها استفاده شده است (IUSS Working Group WRB, 2022). برخی معتقدند که سامانه طبقه‌بندی جهانی می‌تواند با به‌کارگیری اطلاعات آزمایشگاهی کمتر نسبت به سامانه رده‌بندی آمریکایی، برای نقشه‌برداری خاک استفاده شود؛ زیرا تعیین فامیل و سری خاک، نیازمند هزینه و وقت زیادتری می‌باشد (Schad and Micheli, 2010).

پژوهش‌های زیادی (Toomanian et al., 2003; Sarshogh et al., 2012; Esfandiarpour Boroujeni et al., 2013; Sarmast et al., 2016; Esfandiarpour Boroujeni et al., 2018) سازگاری کم بین این سامانه‌های طبقه‌بندی خاک را اعلام کردند. اسفندیارپور بروجنی و همکاران (Esfandiarpour-Boroujeni et al., 2018) به‌طور خلاصه، تفاوت در سطوح طبقه‌بندی و تعداد گروه‌های خاک در بالاترین سطح، تفاوت در تعریف افق‌ها یا ویژگی‌هایی با مشخصات یکسان و تأکید بیشتر بر رژیم‌های دمایی و رطوبتی خاک در ST در مقایسه با WRB را از جمله دلایل کم بودن همبستگی بین این دو سامانه برشمردند.

بهمنی و همکاران (Bahmani et al., 2014) در پژوهشی به‌منظور مقایسه این دو سامانه در برخی خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران مرکزی به این نتیجه رسیدند که سامانه طبقه‌بندی جهانی در توصیف ویژگی‌های خاک‌ها تا حدی گویاتر است. هرچند در پژوهش آنها هیچ‌کدام از سامانه‌ها نتوانستند وجود گچ در افق‌های پایینی خاک را نشان دهند. سرشوق و همکاران (Sarshogh et al., 2012) در پژوهشی به‌منظور مقایسه رده‌بندی خاک به دو روش آمریکایی و جهانی در وضعیت‌های مختلف دو جهت شیب در استان چهارمحال و بختیاری نشان دادند که رده‌بندی آمریکایی برای نشان دادن ویژگی‌های بارز خاک‌های کم‌عمق در مناطق نیمه‌خشک، گویاتر از طبقه‌بندی جهانی است. لی و همکاران (Lee et al., 2023) در بررسی خاک‌های متأثر از فعالیت انسانی در کشور کره جنوبی، سامانه طبقه‌بندی جهانی را به‌دلیل اختصاص دو گروه مرجع آنتروپوسول و تکنوسول، دارای کارایی بهتری نسبت به سامانه آمریکایی اعلام و پیشنهاد تجدید نظر در رده‌بندی این خاک‌ها در کشور کره را نمودند. اسفندیارپور بروجنی و همکاران (Esfandiarpour Boroujeni

خاک و مدیریت پایدار آن محسوب می‌گردد. طبقه‌بندی خاک، فرایند گروه‌بندی واحدهای خاک (خاکفردها) به کلاس‌های کم و بیش یکنواخت و با در نظر گرفتن اهدافی مشخص می‌باشد که به موجب آن، اختلاف‌های آشکاری در ویژگی‌ها و وظایف خاک بین کلاس‌ها آشکار می‌شود (Cline, 1967). رده‌بندی خاک یکی از زیرشاخه‌های اصلی دانش خاک‌شناسی است که هدف از آن، تعیین یک روش ساختارمحور جهانی، به‌منظور دسترسی سریع به ویژگی‌های پدوژنیک خاک و شناخت منابع خاک است. بر این اساس، مدیریت پایدار منابع خاک، تعیین کاربری خاک و نقشه‌برداری از واحدهای خاک، به شکل قابل قبولی انجام می‌شود. سامانه‌های رده‌بندی مختلف خاک به‌منظور پوشش پیوسته‌ای از خاک معرفی شدند و رده‌های نسبتاً یکنواختی را پیشنهاد کردند که اختلاف‌های ساختاری در ویژگی‌های خاک قابل تشخیص بود (Cline, 1967).

سامانه‌های رده‌بندی مختلفی برای گروه‌بندی خاک‌ها پیشنهاد شده‌اند و کشورهای متفاوت، سامانه‌هایی را پذیرفته‌اند که با خاک‌ها و روش‌های مطالعه آنها، هماهنگی و همخوانی بیشتری داشته‌اند (Eswaran et al., 2002). اساس سامانه‌های رده‌بندی، مشابه بوده و مبنای آن بر رده‌بندی خاک‌ها در طبقاتی با مشابهت و همگونی قابل قبول است (Gerasimova, 2010). بر خلاف این اصل، هر سامانه دارای ویژگی‌های منحصر به فرد در طبقه‌بندی است که موجب ضعف یا قوت آن در اجرای اهداف کاربردی و یا تحقیقاتی می‌گردد (Eswaran et al., 2002).

سامانه‌های طبقه‌بندی خاک آمریکایی (ST) و پایگاه مرجع جهانی منابع خاک (WRB) از جمله متداول‌ترین سامانه‌های طبقه‌بندی خاک در جهان هستند. برای طبقه‌بندی خاک به روش آمریکایی، سیزده کلید تاکسونومی (از ۱۹۷۵ تا ۲۰۲۲) و برای طبقه‌بندی به روش سامانه جهانی، چهار نسخه (از ۱۹۸۸ تا ۲۰۲۲) برای توصیف بهتر ویژگی‌های خاک منتشر شده‌اند. عمده تفاوت‌های ساختاری این دو سامانه، شامل سطوح طبقه‌بندی نامساوی (۳۲ گروه خاک مرجع WRB در مقایسه با ۱۲ رده در ST)، عدم نیاز به اطلاعات اقلیمی در سامانه WRB، سطوح نامساوی سلسله مراتب (دو سطح در WRB در مقایسه با شش سطح در ST)، اختلاف در تعداد افق‌ها، ویژگی‌ها و مواد مشخصه بین دو سامانه و یکنواخت نبودن دو سامانه در تعریف افق‌های انتخابی مشابه خاک، همگی منجر به انجام پژوهش‌های مختلف در سراسر جهان (به‌ویژه ایران) به‌منظور بررسی و مقایسه کارایی این دو سامانه گردید (Brevik et al., 2016; Sarmast et al., 2016; Esfandiarpour Boroujeni et al., 2018; Lee et al., 2013; Rasooli et al., 2021; Lee et al., 2023; Sanjari et al., 2021).

هر چند دو سامانه آمریکایی و جهانی در نقشه‌برداری خاک از قابلیت خوبی برای مباحث نقشه‌برداری برخوردار هستند، ولی سامانه جهانی در طبقه‌بندی خاک، دارای توان بیشتری می‌باشد.

تسلط بر آنها خواهد شد. ایشان هم‌چنین معتقدند که این دو سامانه طبقه‌بندی، دارای ساختار متفاوتی هستند و در نتیجه دارای نقاط ضعف و قوت مختلفی می‌باشند. از نظر آنها سامانه جهانی در طبقه‌بندی و سامانه آمریکایی در نقشه‌برداری خاک‌ها قوی‌تر هستند.

مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری غرب و جنوب غرب استان کهگیلویه و بویر احمد، با تنوع زیاد از نظر مواد مادری به‌ویژه رسوبات تبخیری، پستی و بلندی، تنوع نسبی اقلیمی و کاربری، موقعیت خوبی برای بررسی و مقایسه کارایی سامانه‌های طبقه‌بندی فراهم آورده است. تا کنون پژوهشی در این منطقه در ارتباط با این هدف انجام نشده است. بنابراین این پژوهش با هدف مقایسه نتایج طبقه‌بندی خاک حاصل از دو سامانه رده‌بندی آمریکایی و جهانی و بررسی میزان کارایی دو سامانه مذکور در توصیف ویژگی‌های خاک و همچنین بررسی تغییرات ایجاد شده در دو سامانه مذکور در یک بازه هشت ساله (۲۰۲۲-۲۰۱۴)، صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و مطالعات صحرایی انجام‌شده در آن

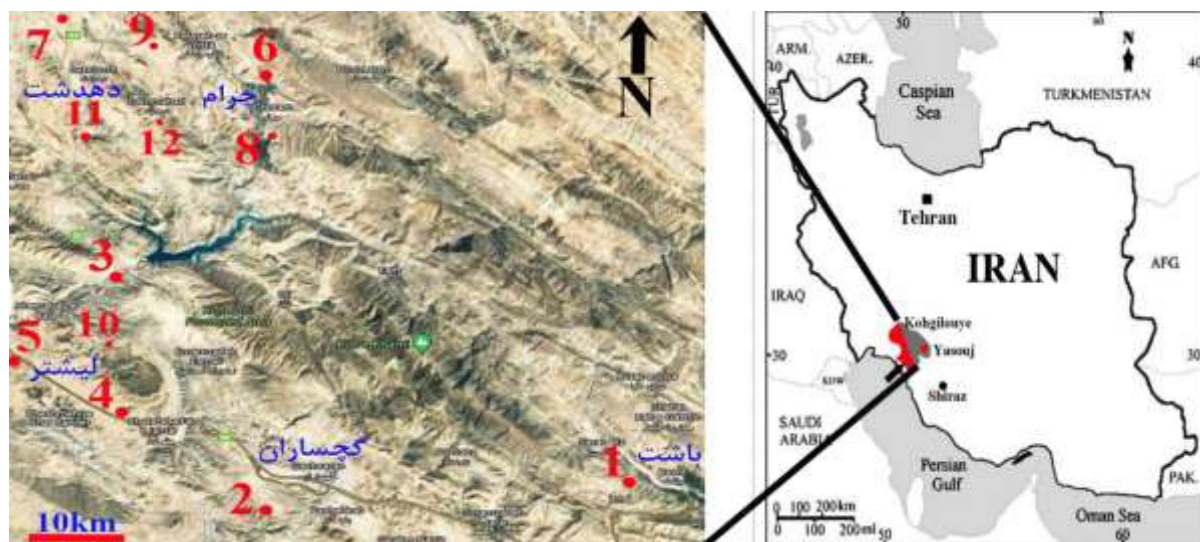
این پژوهش در منطقه غرب و جنوب غرب استان کهگیلویه و بویراحمد در شهرستان‌های گچساران، باشت، چرام و کهگیلویه با وسعت تقریبی ۳۸۰ هزار هکتار صورت گرفت (شکل ۱). رژیم حرارتی خاک‌های مطالعه‌شده همگی هاپرترمیک (میانگین دمای سالیانه خاک بیش از ۲۲ درجه سلسیوس) و رژیم رطوبتی آنها شامل اریدیک-یوستیک (بخش‌های جنوب‌غربی در مجاورت استان بوشهر با ارتفاع کمتر) و یوستیک (بخش‌های غربی تا شمال غربی با ارتفاع بیشتر) می‌باشد؛ به‌جز خاک‌رخ ۳ که دارای رژیم رطوبتی اکوییک است (Banaie, 1998). ارتفاع خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه ۳۹۰ تا ۱۳۹۰ متر از سطح دریا بوده است. خاک‌های مطالعه‌شده در فیزیوگرافی‌های دشت دامنه‌ای، دشت رسوبی رودخانه‌ای، دشت مرتفع و واریزه‌های رسوبی قرار داشته‌اند. مواد مادری خاک‌های مطالعه‌شده در بخش‌های جنوب غربی شامل مناطق لیشر و گچساران عمدتاً شامل سازندهای گچی (از جمله سازندهای گچساران، آغاچاری، رازک و میشان) و در بقیه مناطق عمدتاً سازندهای آهکی (از جمله سازندهای آسماری، جهرم، پابده-گورپی، سروک، ایلام، بختیاری و رسوبات کواترنری) می‌باشد. کاربری خاک‌های مطالعه‌شده شامل اراضی مرتعی (با تراکم کم تا زیاد) و اراضی زراعی بوده است.

با توجه به عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی و بازدیدهای صحرایی، ۲۶ خاک‌رخ حفر، تشریح و نمونه‌برداری شدند (Soil Survey Staff, 2014).

(et al., 2011) اظهار داشتند که استفاده از سامانه جهانی برای جداسازی خاک‌های شور مناطق خشک، به‌دلیل استفاده از توصیف‌کننده‌های بیشتر و انعطاف‌پذیری بالاتر در بیان ویژگی‌های مؤثر در طبقه‌بندی خاک‌ها، بهتر می‌تواند واقعیات اراضی را در ابعاد افقی و عمودی خاک نشان دهد. در مطالعه‌ای که اخیراً در کشور چین به‌منظور مقایسه کارایی دو سامانه مزبور در خاک‌های شنی انجام گرفت، سامانه جهانی (WRB) به‌دلیل بررسی جامع‌تر ویژگی‌هایی از خاک مانند ضخامت لایه‌های خاک، افق فریک، رنگ خاک، تغییرات بافت و کرنات، دارای کارایی بهتر تشخیص داده شد (Meng et al., 2023). مطالعه‌ای توسط صالحی (Salehi, 2018) به‌منظور تبیین تفاوت‌ها و شباهت‌های بین این دو سامانه در چهار پدون شاهد در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران صورت گرفت. نتایج نشان داد که WRB می‌تواند وضعیت خاک‌های آلوده به فلزات سنگین را از طریق صفت toxic و زیرشاخه‌های آن نشان دهد. از سوی دیگر، ST توانایی نشان دادن وضعیت خاک‌های کم‌عمق را دارد، اما به‌دلیل تفاوت معیارهای افق سالیک با WRB، قادر به نشان دادن شرایط Gleyic و وجود افق سالیک نبود. وی پیشنهاد کرد که تلاش ویژه‌ای برای تعیین کمیت فعالیت‌های مرتبط با انسان در نسخه‌های آینده هر دو سامانه طبقه‌بندی صورت گیرد.

هوایی و همکاران (Havaee et al., 2019) سامانه‌های طبقه‌بندی جهانی و آمریکایی را برای طبقه‌بندی خاک‌های دارای افق تجمع رس مقایسه کردند و اظهار داشتند که سامانه طبقه‌بندی جهانی مزایایی چون توصیف‌کننده‌های Clayic, Cutanic, Ochric, Ruptic و Endocalcaric، نیاز به داده‌های آزمایشگاهی کم‌تر برای توصیف ویژگی‌های خاک، بسیار موفق‌تر بوده، اما همچنان توانایی نمایش تفاوت در توالی افق‌های مشخصه تمامی خاک‌رخ‌های موجود در مطالعات نیمه‌تفضیلی را نداشته است. آنها نتیجه گرفتند که میزان کارایی هر یک از سامانه‌های طبقه‌بندی جهانی و آمریکایی، بسته به نوع هدف و مقیاس مطالعه، متفاوت خواهد بود.

سرمست و همکاران (Sarmast et al., 2016) در پژوهشی به‌منظور مقایسه این دو سامانه در توصیف خاک‌های آهکی و گچی منطقه مرکزی ایران به این نتیجه رسیدند که سامانه جهانی خاک به‌دلیل دارا بودن توصیف‌کننده‌ها و تمایزدهنده‌های مکمل به‌خصوص برای خاک‌های شور، نسبت به سامانه آمریکایی کارآمدتر می‌باشد. به عقیده چاد و میشل (Schad and Micheli, 2010) کم بودن سطوح طبقه‌بندی در سامانه جهانی دو مزیت اصلی دارد: ۱- تعداد توصیف‌کننده‌های هر پدون خاک این اطمینان را حاصل می‌کند که همه ویژگی‌های آن پدون در نام آن منعکس شده است و ۲- تعریف کردن توصیف‌کننده‌ها در یک لیست مشترک، باعث آسانی



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی در استان کهگیلویه و بویراحمد به همراه موقعیت خاک‌های مطالعه شده
Figure 1- Location of the study area is in Kohgiluyeh and Boyer Ahmad province along with the location of the studied profiles

(1975) و کیتریک و هوپ (Kittrick and Hope, 1963)، بخش رس موجود در نمونه‌های خاک با استفاده از سانتیفریژ جدا و چهار تیمار مختلف شامل اشباع با منیزیم، اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول، اشباع با پتاسیم و اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس تهیه شد. نمونه‌های آماده شده به وسیله دستگاه پراش پرتو ایکس مدل Bruker در زاویه ۲۰ بین صفر تا ۴۰ درجه در ولتاژ ۴۰ کیلوولت و شدت جریان ۳۰ میلی آمپر بررسی و نمودارهای پراش پرتو ایکس مربوطه حاصل شد. در نهایت، مقادیر نیمه کمی کانی‌های رسی بر اساس روش جونز و همکاران (Johns et al., 1954) برآورد شد.

مطالعات میکرومورفولوژی

به منظور انجام مطالعات میکرومورفولوژی خاک، در زمان تشریح خاک‌رخ‌ها، بسته به میزان پایداری واحدهای ساختمانی خاک، کلوخه های دست نخورده با دست و یا جعبه‌های کوئینا از افق‌های مورد نظر تهیه گردید. مقاطع نازک تهیه شده (Murphy, 1986) با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مدل Lite مورد مطالعه و تشریح (Stoops, 2003) قرار گرفتند و در دو حالت نور پولاریزه صفحه‌ای (PPL) و متقاطع (XPL) مورد مطالعه و از قسمت‌های مورد نظر، به وسیله دوربین دیجیتالی عکسبرداری گردید.

با توجه به نتایج اولیه به دست آمده، در نهایت ۱۲ خاک‌رخ که تفاوت‌های بارزتری با سایر خاک‌رخ‌ها از نظر ویژگی‌های افق‌ها، رده بندی و تکامل داشتند، برای اهداف مرتبط با این پژوهش انتخاب شدند (شکل ۱). خاک‌رخ‌ها بر مبنای راهنمای تشریح خاک‌رخ اداره حفاظت خاک وزارت کشاورزی آمریکا (Soil Science Division Staff, 2017) تشریح شدند. از تمامی افق‌های ژنتیکی، نمونه‌برداری صورت گرفت و به آزمایشگاه منتقل شد.

مطالعات آزمایشگاهی

نمونه‌ها پس از هواخشک کردن از الک دو میلیمتری عبور داده شده و آزمایش‌های مورد نظر بر روی آنها انجام گرفت. بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Bauder, 1986) اندازه گیری شد. پهاش در خمیر اشباع خاک و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره خمیر اشباع (Rhoades, 1996) تعیین شدند. کربنات کلسیم معادل پس از تیمار نمونه‌ها با HCl و تیتراسیون توسط NaOH محاسبه شد (Nelson, 1982). کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Page et al., 1982; Nelson and Sommers, 1982) و ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم نرمال اندازه‌گیری شد (Chapman, 1965). گچ نیز به روش رسوب توسط استون اندازه‌گیری گردید (Salinity Laboratory Staff, 1954).

مطالعات کانی‌شناسی رس

پس از طی مراحل آماده‌سازی به روش جکسون (Jackson,

جدول ۱- مشخصات کلی مناطق و رده‌بندی خاک‌های مطالعه شده
Table 1- General characteristics of the regions and classification of the studied soils

خاک‌برخ Profile No.	موقعیت Location	ارتفاع Elevation (m)	فیزیوگرافی Physiography	کاربری Land use	رطوبت و حرارتی خاک Soil Moisture & Temperature	سامانه آمریکایی (۲۰۱۴) Soil taxonomy (2014)	سامانه آمریکایی (۲۰۲۲) Soil taxonomy (2022)	سامانه جهانی (۲۰۱۴) WRB (2014)	سامانه جهانی (۲۰۲۲) WRB (2022)
1	Basht	845	Piedmont Plain	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Loamy-skeletal, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustorthents	Loamy-skeletal, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustorthents	Calcic Skeletic Regosols (Loamic, Humic)	Calcic Skeletic Regosols (Loamic, Humic)
2	Gachsaran	450	River Alluvial Plain	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustifluvents	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustifluvents	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)
3	Kheyrahad	390	River Alluvial Plain	Rice farm	Ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Fluvaquentic Epiaquolls	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Fluvaquentic Epiaquolls	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)
4	Gachsaran	510	Plateau	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)
5	Gachsaran	530	Alluvial fan	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Fluventic Haplustepts	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Fluventic Haplustepts	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)	Calcic Fluvisols (Loamic, Humic)
6	Choram	740	Piedmont Plain	Farm	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Haplustepts	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Haplustepts	Calcic Cambisols (Loamic, Ochric)	Calcic Cambisols (Loamic, Ochric)
7	Dishmuk	1065	Alluvial fan	Pasture	Ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Petrocalcic Calcustepts	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Petrocalcic Calcustepts	Petric Cambic Calcisols (Loamic, Fluvis, hypercalcic, Ochric)	Petric Cambic Calcisols (Loamic, Fluvis, hypercalcic, Ochric)
8	Fashian	700	Piedmont Plain	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calcustepts	Fine, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calcustepts	Calcic Kastanozems (Clayic)	Calcic Cambic Kastanozems (Clayic)
9	Charusa	1350	Alluvial fan	Pasture	Ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Typic Haplustolls	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Typic Haplustolls	Haplic Kastanozems (Clayic, Cambic, Hyperhumic)	Cambic Kastanozems (Clayic)
10	Lisher	530	Plateau	Pasture	Aridic-ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Loamic, Aridic, Cutanic, Ochric)	Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Ochric)
11	Manjegan	690	Plateau	Pasture	Ustic, Hyperthermic	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvis, Ochric)	Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvis, Ochric)
12	Dehdasht	790	Plateau	Fallow	Ustic, Hyperthermic	Fine, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Fine, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Clayic, Cutanic, Fluvis, Ochric)	Calcic Luvisols (Clayic, Cutanic, Fluvis, Ochric)

جدول ۲ - برخی ویژگی‌های مورفولوژیکی خاک‌های مورد مطالعه

خاک‌رخ	افق	عمق	مرز افق	Consistency ² پایداری ² ساختمان			میزان جویش	پوشش‌ها و تجمعات
				خشک	مرطوب	خشک		
Pedon	Horizon	Depth (cm)	Boundary ¹	Dry	Moist	Structure ³	Effervescence ⁴	Coatings and Concentrations ⁵
1	A	0-20	A, S	7.5YR 5/3	7.5YR 4/3	sg	VS	-
	C1	20-30	G, S	7.5YR 6/5	7.5YR 6/4	FR	ST	-
	C2	50-100	-	7.5YR 7/3	7.5YR 6/5	FR	ST	-
2	A	0-25	A, S	10YR 5/3	10YR 4/3	sg	ST	-
	C1	25-65	G, S	10YR 7/2	10YR 5/2	FR	ST	-
	C2	65-130	-	10YR 7/2	10YR 5/2	FR	VE	-
3	Ap	0-30	A, S	10YR 4/3	10YR 3/3	sg	ST	-
	Cg1	30-55	G, W	5Y 5/2	5Y 5/2	VFI	ST	-
	Cg2	55-100	-	5Y 5/2	5Y 5/2	VFI	ST	-
4	A	0-25	A, S	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	sg	ST	F, 2, GYX
	Bby	25-50	G, S	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	1 f shk	ST	m, 2, GYX, FCFF
	Bbyk	50-85	G, S	7.5YR 6/3	7.5YR 4/3	1 f shk	VS	m, 3, CAN, GYX, BRF
5	A	0-25	A, S	10YR 5/3	10YR 4/3	sg	ST	m, 3, GYX, BRF
	By	25-75	C, W	10YR 6/4	10YR 5/4	1 f shk	ST	-
	2By	75-125	-	10YR 6/4	10YR 5/4	FR	ST	m, 2, GYX, GYM
6	Ap	0-25	A, S	7.5YR 5/3	7.5YR 4/3	sg	ST	-
	Bw	25-60	G, S	10YR 6/4	10YR 4/4	FR	ST	-
	Bkm	60-120	-	10YR 6/4	10YR 5/4	VFR	VE	M, 2, CAN
7	A	0-30	A, S	10YR 5/3	10YR 4/3	sg	VS	-
	Bw1	30-75	G, S	10YR 5/4	10YR 4/4	FR	ST	-
	Bkm	75-135	-	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	SH	ST	-
8	A	0-30	A, S	10YR 4/3	10YR 3/3	sg	ST	-
	AB	30-55	G, S	10YR 6/3	10YR 4/3	SH	ST	-
	Bw	55-80	G, S	10YR 6/4	10YR 4/4	FI	ST	-
9	A	0-30	A, S	7.5YR 3/3	7.5YR 3/2	sg	VS	m, 3, CAN, MAT
	Bw	30-80	C, W	7.5YR 5/3	7.5YR 4/2	FR	ST	-
	C	80-125	-	10YR 7/2	10YR 5/2	FR	ST	-
10	A	0-30	A, S	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	sg	ST	-
	Bkk	30-75	C, S	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	FR	ST	fi, 1, CAN, CCFF
	Bkk	75-130	-	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	FR	ST	fi, 2, CAN, MAT
11	A	0-25	A, S	10YR 5/3	10YR 4/3	sg	VS	-
	Bkk	30-75	G, S	7.5YR 5/4	7.5YR 4/4	FR	ST	fi, 1, CAN, CCFF
	Bkk	75-125	-	7.5YR 6/4	7.5YR 4/4	FR	VE	fi, 2, CAN, MAT
12	Ap	0-30	A, S	10YR 5/3	10YR 4/2	sg	ST	-
	Bk	30-55	C, S	10YR 6/2	10YR 5/2	FR	ST	fi, 1, CAN, MAT, CCFF
	Bkk1	55-85	G, S	10YR 7/2	10YR 5/2	FR	ST	fi, 2, CAN, MAT
	Bkk2	85-120	-	10YR 6/2	10YR 5/2	FR	ST	m, 3, CAN, CAM, MAT

¹Boundary: distinctness (A: abrupt, C: clear, G: gradual); topography (S: smooth, W: wavy); ²Consistency: dry (L: loose, S: soft, SH: slightly hard, MH: moderately hard, HA: hard, EM: extremely hard); moist (L: loose, VFR: very friable, FR: friable, FI: firm, VFI: very firm); ³Structure: grade (1: weak, 2: moderate); size (f: fine, m: medium); type (abk: angular blocky, sbk: subangular blocky, gr: granular, sg: single grain, m: massive); ⁴Effervescence: class (VS: very slightly effervescent, ST: strongly effervescent, VE: Violently Effervescent); chemical agent (H2: normal hydrochloric acid); ⁵Concentrations: quantity (c: common, m: many); size (1: fine, 2: medium, 4: very coarse); kind (FDC: finely disseminated carbonates, CAM: carbonate masses, GYM: gypsum masses, CAN: carbonate nodules, FCFF: few clay film on ped, CCFF: common clay film on ped); location (MAT: in the matrix), BRF - on bottom of rock fragments).

جدول ۳- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

خاک‌ریخ	افق	عمق	شن	سیلت	رسی	کلاس بافتی	SP (%)	pH	EC (dSm ⁻¹)	قابلیت هدایت الکتریکی	کربنات کلسیم معادل	کربنات کلسیم معادل	گچ	OC (%)	کربن آلی	CEC (cmolkg ⁻¹)
Pedon	Horizon	Depth (cm)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Textural class	SP (%)	pH	EC (dSm ⁻¹)	EC	CCE (%)	CCE	Gypsum (%)	OC (%)	OC	CEC
1	A	0-20	39.0	33.6	27.4	CL	48.5	8.0	0.6	0.6	35.2	35.2	0.4	1.56	1.56	22.6
	C1	20-50	36.3	30.3	33.4	CL	36.2	8.1	0.4	0.3	43.3	39.2	ng	0.98	0.98	19.2
	C2	50-100	60.0	16.6	23.4	SCL	33.1	8.1	0.3	0.3	64.6	64.6	0.6	0.47	0.47	12.4
2	A	0-25	41.0	41.6	17.4	L	37.8	7.7	0.7	0.7	52.1	52.1	0.5	1.16	1.16	9.3
	C1	25-65	41.0	27.6	31.4	CL	42.5	8.0	0.8	0.8	50.3	50.3	0.3	0.95	0.95	10.1
	C2	65-130	40.0	35.3	24.7	L	39.0	8.1	0.7	0.7	65.7	65.7	0.6	0.72	0.72	8.8
3	Ap	0-30	18.3	46.3	35.4	SiCL	56.8	7.4	2.3	2.3	61.1	61.1	0.4	1.45	1.45	11.6
	Cg1	30-55	36.0	34.3	29.7	CL	54.2	7.7	1.5	1.5	67.3	67.3	ng	0.71	0.71	10.2
	Cg2	55-100	32.0	36.3	31.7	CL	57.2	7.8	1.4	1.4	69.4	69.4	ng	1.06	1.06	9.5
4	A	0-25	36.9	40.7	22.4	L	37.6	7.4	1.5	1.5	56.2	56.2	1.9	0.54	0.54	11.2
	By	25-50	22.0	32.3	45.7	C	48.7	7.6	1.9	1.9	58.7	58.7	8.9	0.44	0.44	9.6
	Byyk	50-85	53.3	16.3	30.4	SCL	44.6	7.7	1.7	1.7	29.6	29.6	51.4	0.48	0.48	6.2
5	Byym	85-125	32.0	44.3	23.7	L	62.3	7.6	1.9	1.9	33.3	33.3	56.5	0.25	0.25	11.9
	A	0-25	37.3	44.3	18.4	L	34.2	7.5	2.2	2.2	65.3	65.3	0.5	0.85	0.85	7.8
	By	25-75	29.3	34.3	36.4	CL	48.3	7.7	0.5	0.5	58.8	58.8	6.9	0.92	0.92	9.6
6	2By	75-125	72.0	18.3	9.7	SL	42.0	7.8	3.8	3.8	69.1	69.1	16.8	0.56	0.56	7.1
	Ap	0-30	36.0	28.3	35.7	CL	41.3	7.9	0.6	0.6	71.1	71.1	0.4	1.32	1.32	15.2
	Bw1	30-75	53.3	11.0	35.7	SC	40.1	8.1	0.3	0.3	68.5	68.5	0.6	0.65	0.65	12.3
7	Bw2	75-120	47.3	24.3	28.4	SCL	37.1	8.4	0.3	0.3	82.0	82.0	0.3	0.22	0.22	7.9
	A	0-25	31.3	41.0	27.7	CL	44.1	7.7	0.5	0.5	48.6	48.6	0.6	1.02	1.02	16.2
	Bw	25-60	43.3	29.0	27.7	CL	40.2	7.8	0.4	0.4	52.2	52.2	0.4	0.75	0.75	12.1
8	Bkkm	60-120	28.3	32.3	39.4	CL	46.6	7.9	0.4	0.4	67.2	67.2	0.5	0.96	0.96	20.0
	A	0-30	18.0	40.3	41.7	C	55.2	8.1	0.5	0.5	36.3	36.3	ng	1.96	1.96	22.3
	AB	30-55	26.0	31.6	42.4	C	52.4	7.8	1.2	1.2	51.5	51.5	ng	0.72	0.72	17.2
9	Bw	55-80	25.3	35.3	38.4	CL	56.3	8.1	0.4	0.4	50.2	50.2	0.4	0.35	0.35	12.9
	Bk	80-125	28.0	35.6	36.4	CL	50.1	8.4	0.2	0.2	59.2	59.2	ng	0.17	0.17	12.5
	A	0-30	37.3	36.4	26.3	CL	71.3	7.4	0.3	0.3	36.6	36.6	ng	5.12	5.12	32.1
10	Bw	30-80	37.3	33.0	29.7	CL	46.8	7.9	0.3	0.3	55.1	55.1	ng	1.88	1.88	22.1
	C	80-125	34.0	38.3	27.7	CL	41.2	8.0	0.2	0.2	68.2	68.2	ng	0.65	0.65	10.8
	A	0-30	38.0	35.6	26.4	CL	71.5	7.5	2.0	2.0	35.2	35.2	0.6	1.1	1.1	8.9
11	Btkk	30-75	34.0	30.3	35.7	CL	48.2	7.8	2.5	2.5	51.3	51.3	0.5	0.75	0.75	9.5
	Bkk	75-130	29.3	48.3	22.4	L	45.2	7.9	0.5	0.5	66.2	66.2	1.4	0.53	0.53	6.3
	A	0-25	45.3	36.3	18.4	L	36.2	8.2	0.5	0.5	64.3	64.3	0.4	0.82	0.82	10.5
12	Btkk	30-75	23.3	40.3	36.4	CL	52.1	7.9	1.2	1.2	66.2	66.2	0.5	0.66	0.66	11.9
	Bkk	75-125	56.0	17.6	26.4	SCL	41.2	8.2	0.6	0.6	68.2	68.2	0.5	0.45	0.45	9.5
	Ap	0-30	17.3	46.3	36.4	SiCL	46.2	7.5	0.2	0.2	42.1	42.1	ng	1.54	1.54	16.8
12	Bk	30-55	15.3	33.0	51.7	C	48.6	7.7	0.7	0.7	48.3	48.3	ng	0.85	0.85	14.6
	Bkk1	55-85	11.3	39.0	49.7	C	44.4	8.0	1.2	1.2	55.5	55.5	ng	0.62	0.62	16.1
	Bkk2	85-120	22.9	28.6	48.5	C	41.9	7.8	2.1	2.1	58.2	58.2	ng	0.61	0.61	11.0

به منظور بررسی رده بندی خاک ها، آنها را بر اساس رده بندی آمريکايي در چهار بخش بررسي مي نماييم:

الف) رده انتي سولز (خاکرخی های ۱ و ۲)

خاکرخی ۱: اين خاک در منطقه باشت قرار داشته و دارای رژیم رطوبتي اريديک-يوستيک مي باشد. اين خاک در سامانه رده بندي آمريکايي به صورت Loamy-skeletal, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustorthents و در سامانه طبقه بندي جهاني به صورت Calcaric Skeletic Regosols (Loamic, Humic) رده بندي شد. در هر دو سامانه تغييری در رده بندي بين نسخه های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۲ در اين خاک مشاهده نشد. البته صفت skeletal در نسخه ۲۰۰۶ سامانه طبقه بندي جهاني به صورت صفت فرعی به کار می رفت که در نسخه های بعدی نظر به اهميت ميزان بالای سنگريزه در مدیریت و کاربری خاک به صفت اصلی تبديل شد. صفت humic طبقه بندي جهاني برای خاک هایی که ميزان کربن آلی آنها در ۵۰ سانتی متر سطح خاک بيش از یک درصد است، به کار می رود که اطلاعات بيشتری از اين خاک را نسبت به سامانه آمريکايي نشان می دهد. در حالی که رده بندي آمريکايي، ویژگی اريديک را در سطح زیرگروه بيان می کند. نسخه ۲۰۱۴ طبقه بندي جهاني، ویژگی اريديک را به صورت صفت فرعی بيان نموده در حالی که اين صفت در نسخه ۲۰۲۲ حذف شده است. ویژگی اريديک، خصوصياتی مانند ميزان کربن آلی، رنگ خاک، درصد اشباع بازی و شواهدی از فرسایش بادی را در بر می گرفت که با اين توجه که شامل ترکیبی غيرسيستماتیک از ویژگی های مختلف بود، از نسخه ۲۰۲۲ طبقه بندي جهاني حذف شد، گرچه مفهوم اريديک در رده بندي آمريکايي مرتبط با مقدار رطوبت در مقطع کنترل رطوبتي خاک بوده است. همانگونه که قبلاً ذکر شد سامانه جهاني غير وابسته به رژیم های اقليمي بوده و از جمله موارد مهمی است که با سامانه آمريکايي متمایز است. در پژوهش اخير وجود صفت اريديک می توانست به تفکيک بهتر خاک های مورد مطالعه کمک نماید. هوائی و همکاران (Havaee et al., 2019) اشاره نمودند که سامانه آمريکايي بر خلاف سامانه جهاني، با بهره گيري از رژیم های رطوبتي و حرارتي خاک، توصيف بهتری از شرایط محيطی ارايه می نماید. **جدول ۵** خلاصه مقايسه کارايی دو سامانه رده بندي مزبور و موارد پیشنهاد شده در ارتباط با خاکرخی های مطالعه شده را نشان می دهد.

خاکرخی ۲: اين خاک در منطقه گچساران قرار داشته و دارای رژیم رطوبتي اريديک-يوستيک مي باشد. اين خاک در سامانه رده بندي آمريکايي به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustifluvents و در سامانه طبقه بندي جهاني به صورت Calcaric Fluvisols (Loamic, Humic) رده بندي شد. تغييری در

پس از انجام آزمایش های فیزیکی، شیمیایی، میکرومورفولوژیکی و کانی شناسی رس، خاکرخی های منطقه مطالعاتی توسط سامانه رده بندي آمريکايي (Soil Survey Staff, 2014; Soil Survey Staff, 2022) و طبقه بندي جهاني (IUSS Working Group WRB, 2014; IUSS Working Group WRB, 2022) رده بندي شدند.

نتایج و بحث

جدول ۱ مشخصات کلی مناطق و رده بندي خاک های مطالعه شده را نشان می دهد. **جدول ۲** برخی ویژگی های مورفولوژیکی خاکرخی های مورد مطالعه از جمله مرز افق ها، رنگ، ساختمان، پایداری، ميزان جوشش با اسيد و نوع و مقدار تجمعات را نشان می دهد. تجمعات در خاک های با تکامل متوسط تا زياد عمدتاً شامل تجمعات آهکی، گچی به شکل های رشته ای (ميسليوم)، تجمعات نرم، سخت دانه و آویزه های گچی و همچنین در خاک های با افق آرچيلیک، پوشش های رسی بر روی واحدهای خاکدانه مشاهده شد. در مناطق با پوشش متراکم مرتعی و به صورت موضعی (خاکرخی های ۳، ۸ و ۹) ابي پدون مالیک در سطح خاک تشکیل شده و خاک های مالی سولز یا کاستانوزمز را ايجاد نموده است. بر اساس رده بندي آمريکايي، خاک ها در چهار رده انتي سولز، اينسپتي سولز، آلفی سولز و مالی سولز و بر اساس طبقه بندي جهاني در هفت گروه مرجع رگوسولز، فلاوی سولز، لووی سولز، کمبی سولز، کاستانوزمز، جیسی سولز و گلی سولز قرار گرفتند.

جدول ۳ برخی ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاکرخی های مورد مطالعه را نشان می دهد. قابلیت هدایت الکتریکی خاک ها در دامنه ۰/۲ تا ۳/۸ دسی زیمنس بر متر و پهاش آنها در دامنه ۷/۴ تا ۸/۴ بوده است. مقدار رس در دامنه ۹ تا ۵۱ درصد و مقادیر گچ و کربنات کلسیم معادل به ترتیب در دامنه های صفر تا ۵۶ و ۲۹ تا ۸۲ درصد بوده است. ظرفیت تبادل کاتيوني خاک ها نیز در دامنه ۶/۲ تا ۳۲ سانتی مول بر کیلوگرم خاک بوده است.

جدول ۴ فراوانی نسبی کانی های رسی در خاک های مطالعه شده را نشان می دهد. بر اساس نتایج به دست آمده، کانی های پالیکوسکيت، اسمکتيت، ايليت و کلريت به عنوان کانی های غالب و در مقادير کمتر ورمیکوليت، کائولینيت و مخلوط لایه ها حضور دارند (شکل ۲). براساس مطالعات صورت گرفته در ارتباط با کانی شناسی خاک های اين منطقه، منشاء اصلی کانی پالیکورسکيت در درجه اول پدوژنيک (نوتشکيلي در رسوبات تبخيري حاوی گچ و آهک)، سپس تغيير شکل از اسمکتيت و در مقادير کمتر، منشاء توارثی برای آن در نظر گرفته شده است (Owliaie et al., 2018a). منشاء اسمکتيت در خاک ها نیز تغيير شکل از کانی های میکايی و به ارث رسيدن از سنگ های مادر (به ویژه سازندهای مارنی میوسن) اعلام شده است (Owliaie et al., 2018b).

گروه‌های مرجعی مانند چرنوزم، کلسی‌سولز و جیپسی‌سولز را ارایه نمودند. **شکل‌های (۳ الف) و (۳ د)** بلورهای عدسی‌شکل گچ مشاهده شده در افق‌های جیپسیک و پتروجیپسیک این خاک را در مقاطع نازک تهیه‌شده نشان می‌دهد. صالحی (Salehi, 2018) افزودن گروه بزرگ Gypsicacids به سامانه رده‌بندی آمریکایی را برای خاک‌های با افق‌های جیپسیک در عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر به دلیل امکان اثرگذاری این افق بر گیاهان با ریشه عمیق و یا درختان پیشنهاد نموده است. در مورد گروه مرجع کلسی‌سولز نیز پیشنهاد افزودن صفت "Bathygypsic" برای خاک‌های با افق جیپسیک در حد فاصل عمق ۱۰۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر از سطح خاک، داده شده است.

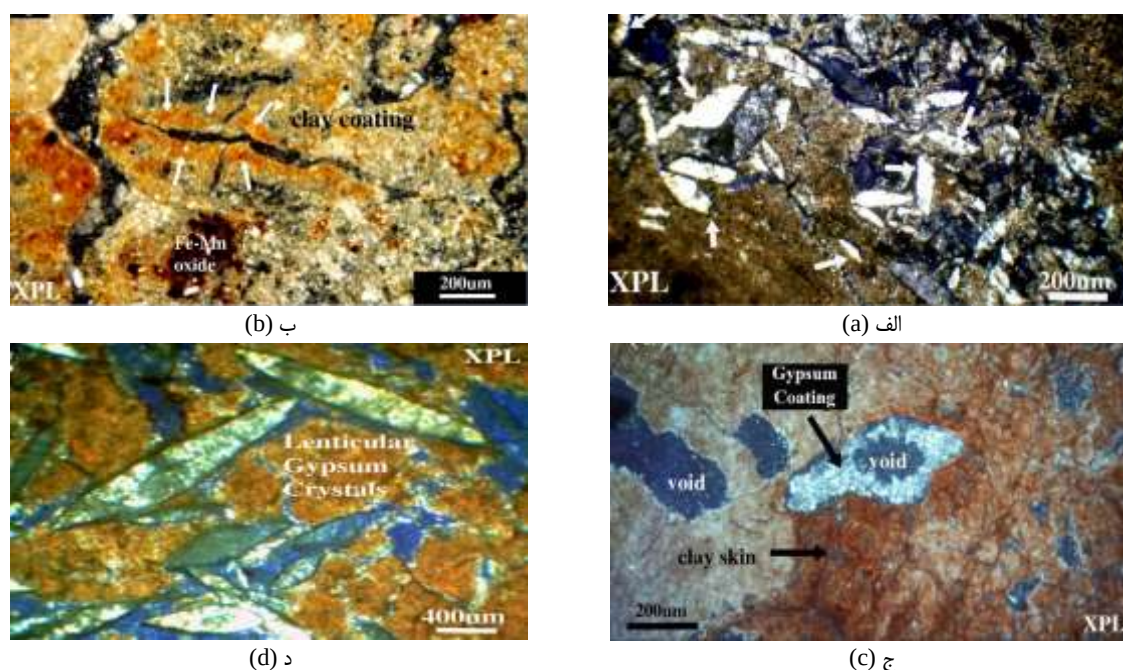
خاک‌رخ ۶: این خاک دارای رژیم رطوبتی اریدیک-یوستیک و افق کمبیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calcaric Cambisols و در سامانه جهانی به صورت (Loamic, Ochric) می‌باشد. نسخه ۲۰۱۴ طبقه‌بندی جهانی ویژگی اریدیک را به صورت صفت فرعی برای این خاک بیان نموده، در حالی که این صفت در نسخه ۲۰۲۲ حذف شده است. رده‌بندی این خاک در نسخه‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۲۲ سامانه آمریکایی تغییری نداشته است.

خاک‌رخ ۷: این خاک در منطقه چرام قرار داشته و دارای رژیم رطوبتی یوستیک و افق‌های کمبیک و پتروکلسیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Petrocalcic Calcustepts به صورت (Loamic, Fluvi, hypercalcic, Ochric) می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های توأم کمبیک، پتروکلسیک و فلوویک در این خاک در سامانه جهانی (WRB)، تقدم ابتدا برای کلسی‌سولز و سپس برای فلووی‌سولز می‌باشد و ویژگی‌های کمبیک و فلوویک به ترتیب به عنوان صفت‌های اصلی و فرعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقایسه دو سامانه، این بار نیز سامانه جهانی توصیف بهتر و کاملتری از این خاک داشته و ویژگی‌هایی چون فلوویک، کمبیک و اکریک در خود جای داده است. صفت فرعی hypercalcic در طبقه‌بندی جهانی فقط برای خاک‌های کلسی‌سولز با افق کلسیک که دارای کربنات کلسیم معادل بیش از ۵۰ درصد است به کار می‌رود؛ در حالی که پیشنهاد می‌گردد که برای سایر خاک‌ها از جمله لووی‌سولز و کاستانوزم که دارای افق کلسیک با کربنات کلسیم معادل بیش از ۵۰ درصد می‌باشند (خاک‌رخ‌های ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)، به عنوان یک صفت فرعی به کار روند (جدول ۵).

رده‌بندی این خاک در دو نسخه ۲۰۱۴ و ۲۰۲۲ رده‌بندی‌های جهانی و آمریکایی به وجود نیامده است. در این خاک، ویژگی فلوویک در رده بندی آمریکایی در سطح زیررده، حال آنکه این ویژگی در طبقه‌بندی جهانی، در سطحی بالاتر (گروه مرجع) آمده است. صفت فرعی هیومیک نیز در طبقه‌بندی جهانی اطلاعات بیشتری از این خاک را نسبت به سامانه آمریکایی بیان می‌کند. مشابه با خاک‌رخ قبل، در این خاک‌رخ نیز ویژگی اریدیک در سامانه آمریکایی در سطح زیرگروه آمده در حالی که این ویژگی در نسخه ۲۰۲۲ سامانه جهانی با دلایلی که ذکر شد، حذف شده است (جدول ۵).

ب) رده اینسیتی‌سولز (خاک‌رخ‌های ۵، ۶ و ۷)

خاک‌رخ ۵: این خاک دارای رژیم رطوبتی اریدیک-یوستیک و افق جیپسیک و ویژگی فلوویک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Calcaric Fluventic Haplustepts و در سامانه جهانی به صورت (Loamic, Ochric, Raptic, Fluvi) می‌باشد. صفت اصلی calcaric در نسخه ۲۰۲۲ سامانه جهانی برای جیپسی‌سول‌ها افزوده شده است. در سامانه آمریکایی (نسخه ۲۰۲۲ و ۲۰۱۴)، در شرایطی که ویژگی فلوویک و افق جیپسیک توأم وجود داشته باشند، تقدم بر ویژگی فلوویک است و بنابراین زیرگروه Fluventic با گروه بزرگ Haplustepts همراه می‌شود. در حالی که در سامانه جهانی، وجود افق جیپسیک بر ویژگی فلوویک اولویت داشته و خاک در گروه مرجع Gypsisols رده‌بندی و ویژگی Fluvi به عنوان صفت فرعی افزوده می‌شود. نظر به اثرگذاری بیشتر حضور گچ بر ویژگی‌های کاربردی و مدیریتی خاک در ارتباط با این خاک، رده‌بندی سامانه جهانی نسبت به سامانه آمریکایی منطقی‌تر می‌باشد و پیشنهاد افزودن زیرگروه Fluventic Gypsiustepts برای خاک‌های با رژیم رطوبتی یوستیک، افق جیپسیک و شرایط فلوونتیک داده می‌شود. صفت Raptic بیانگر وجود انقطاع سنگی در ۱۰۰ سانتی‌متر سطح خاک می‌باشد که به صورت یک صفت فرعی به نام خاک افزوده می‌شود. این ویژگی در رده‌بندی سامانه آمریکایی وجود ندارد و فقط تغییر ناگهانی بافت^۱ برای خاک‌های دارای افق تجمع رس مانند آرچلیک، ناتریک و کندیک در نظر گرفته شده است. پیشنهاد می‌گردد در سامانه آمریکایی ویژگی انقطاع سنگی مانند سامانه جهانی در نظر گرفته شود. اسفندیارپور بروجنی و همکاران (Esfandiarpour-Borujeni et al., 2018) در مطالعه مقایسه دو سامانه رده‌بندی مزبور در ارتباط با دو ویژگی انقطاع سنگی و تغییر ناگهانی بافت در خاک‌های اصلی ایران اظهار داشتند که هر دو رده‌بندی در ارتباط با این دو ویژگی کمبود زیادی داشته و پیشنهاد افزودن ویژگی Raptic به تمام زیرگروه‌ها در سامانه آمریکایی و صفت Abruptic به



شکل ۳- مقاطع نازک (الف) افق By خاکرخ ۵، (ب) افق Btkk خاکرخ ۱۱، (ج) افق Bty خاکرخ ۴، (د) افق 2By خاکرخ ۵
Figure 3- Thin sections of (a) By horizon, pedon 5 (b) Btk1 horizon, pedon 11 (c) Bty horizon, pedon 4 (d) 2By horizon 5

ج) رده مالی سولز (خاکرخ‌های ۳، ۸ و ۹)

خاکرخ ۳: این خاک در منطقه خیرآباد چرام قرار داشته و دارای رژیم رطوبتی اکوییک و اپی‌پدون مالیک و ویژگی فلوویک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calciustolls و در سامانه جهانی به صورت carbonatic, hyperthermic, Fluvaquentic Epiaquolls Calcaric Fluvic Mollic Gleysols (Loamic, Humic) می‌باشد. تغییراتی در رده‌بندی این خاک در دو نسخه ۲۰۱۴ و ۲۰۲۲ رده‌بندی‌های جهانی و آمریکایی به وجود نیامده است. در سامانه جهانی، ویژگی اکوییک در سطح بالاتر در گروه مرجع آمده و نسبت به مالی سولز (کاستانوزمز) تقدم دارد، حال آنکه در سامانه آمریکایی ویژگی مالیک در سطح رده و ویژگی اکوییک در سطح زیر رده بیان می‌شود که اهمیت کمتری دارد. صفت اصلی calcaric در سامانه جهانی و مینرالوژی carbonatic در سامانه آمریکایی هر دو بیان مشابهی از آهکی بودن این خاکرخ هستند. با توجه به محدودیت بیشتر شرایط اکوییک نسبت به وجود اپی‌پدون مالیک، سامانه جهانی این خاک را به نحو مطلوب‌تری معرفی می‌نماید. مطالعاتی مرتبط با رده‌بندی خاک‌های شالیزاری (Paddy soils) در کره جنوبی انجام شد که در آن پیشنهادهایی بر مبنای درجه زهکشی خاک برای طبقه‌بندی تخصصی این خاک‌ها ارائه شد که اطلاعات بهتری از خاک به کشاورزان به منظور مدیریت پایدار خاک ارائه دهد (Lee et al., 2022).

خاکرخ ۸: این خاک در منطقه فشیان قرار داشته و دارای رژیم

رطوبتی اریدیک-یوستیک، اپی‌پدون مالیک و افق‌های کلسیک و کمبیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calciustolls و در سامانه جهانی به صورت Calcaric Cambic Kastanozems (Clayic) می‌باشد. حضور افق کمبیک در سامانه جهانی به صورت اصلی نشان داده شده است، در حالی که در سامانه آمریکایی نمودی ندارد. با توجه به رژیم رطوبتی این خاک، صفت اریدیک در نسخه ۲۰۲۲ سامانه جهانی وجود ندارد.

خاکرخ ۹: این خاک در منطقه چاروسا قرار داشته و دارای رژیم رطوبتی یوستیک، اپی‌پدون مالیک و افق کمبیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Typic Haplustolls و در سامانه جهانی به صورت Cambic Kastanozems (Clayic) می‌باشد. زیرگروه Haplustolls برای خاک‌های با اپی‌پدون مالیک و رژیم رطوبتی یوستیک و یک افق کمبیک پیشنهاد می‌شود تا از خاک‌های دارای افق مالیک بدون تکامل خاکرخ متمایز شوند. در نسخه ۲۰۲۲ سامانه جهانی، صفت cambic به صورت صفت اصلی و در نسخه ۲۰۱۴ به صورت صفت فرعی آمده بود. همچنین صفت hyperhumic در نسخه ۲۰۱۴ برای خاک‌هایی با کربن آلی بیش از ۵ درصد در سطح به کار برده می‌شد، که در نسخه ۲۰۲۲ حذف شده است.

غالب پالیگورسکیت، عنوانی مشخص نشده است که پیشنهاد افزودن عنوان palygorskitic به این بخش پیشنهاد می‌شود. با توجه به وقت گیر و هزینه‌بر بودن آزمایش‌های کانی‌شناسی رس، در نظر گرفتن معیارهایی که با اندازه‌گیری نسبتاً آسان به‌نحوی وضعیت حاصلخیزی خاک را بیان کنند، موجب ارتقای کیفیت سامانه‌های رده‌بندی و افزایش علاقه‌مندی کاربران و برنامه‌ریزان از آنها خواهد شد (Bahmani et al., 2014).

در نسخه ۲۰۲۲ سامانه آمریکایی، زمانی که ویژگی افق آرچلیک، کلسیک و جیپسیک در رژیم یوستیک-اریدیک وجود داشته باشد، خاک در زیررده Ustalfs طبقه‌بندی شده و بین ویژگی‌های کلسیدیک و اریدیک تقدم با کلسیدیک بوده و ویژگی مهم جیپسیک لحاظ نمی‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که زیرگروه Gypsic Haplustalfs به این سامانه رده‌بندی افزوده شود؛ اگرچه این ویژگی در نام فامیلی و در بخش کانی‌شناسی خاک می‌تواند لحاظ شود، اما حضور افق گچی در مدیریت خاک باید در سطوح بالاتر رده‌بندی نشان داده شود (جدول ۵).

د) رده آلفی‌سولز (خاک‌رخ‌های ۴، ۱۰، ۱۱ و ۱۲)

خاک‌رخ ۴: این خاک در منطقه گچساران و بر روی مواد مادری شدیداً گچی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی آن اریدیک-یوستیک و افق‌های جیپسیک، پتروجیپسیک، کلسیک و آرچلیک می‌باشد. رده بندی این خاک در سامانه آمریکایی به‌صورت Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs به‌صورت Calcic Luvic Calcic Gypsisols (Loamic, Ochric, Hypergypsic) می‌باشد. مشاهدات صحرایی افق‌های این خاک، پوشش رسی را در مقدار متوسط بر روی واحدهای خاکدانه در افق Bty نشان داد (جدول ۲). مقاطع نازک تهیه‌شده از نمونه‌های دست‌نخورده این افق پوشش رسی را در زمینه و اطراف حفرات به همراه بلورهای کلسیت و جیپسوم نشان می‌دهد (شکل ۳ج). کانی‌شناسی رس این خاک‌رخ نیز کانی سوزنی‌شکل پالیگورسکیت را به‌عنوان کانی غالب این خاک نشان داد (جدول ۴). در حالی که در بخش مینرالوژی فامیلی خاک‌ها در سامانه آمریکایی خاک‌های با کانی غالب کایولینیت، اسمکتیت، ایلیت و وریکولیت متمایز شده‌اند برای خاک‌هایی با رس

جدول ۴- فراوانی نسبی کانی‌های رسی در خاک‌های مطالعه‌شده

Table 4- Relative abundance of clay minerals^a (<2 μm)

Pedon/Horizon	خاک‌رخ/افق	اسمکتیت Sm.	ایلیت Il.	کلریت Chl.	ورمیکولیت Ve.	کایولینیت Ka.	پالیگورسکیت Pa.	مخلوط لایه Is.
1- A		++	+++	++	-	-	+++	-
1- C1		++	++	++	-	-	++++	-
2- A		++	++	++	+	++	+	+
2- C1		++	+++	++	+	++	++	+
3- Ap		+++	++	++	-	+	++	-
3- Cg1		++	++	++	-	+	+++	-
4- A		+	++	++	-	-	++++	-
4- By2		+	+	++	-	+	+++++	-
5- A		+	+++	+	-	-	+++	-
5- By		+	++	++	-	-	++++	-
6- Ap		+++	+	-	++	+	+	-
6- Bw		++	++	+++	+	-	++	-
7- A		+++	+	-	++	+	+	-
7- Bw1		+++	+	-	++	+	++	-
8- A		+++	++	++	+	+	++	++
8- Bk		+++	+	++	-	+	++	+
9- A		+++	++	++	+	++	-	-
9- Bw		+++	++	++	-	++	-	-
10- A		+++	++	++	+	++	++	++
10- Btk		++++	+	+	-	-	+	+
11- A		+++	++	++	-	+	+++	-
11- Btk		+++	++	-	-	+	+++	-
12- Ap		+++	++	++	+	+	++	-
12- Btk		+++	+	++	-	+	++	-

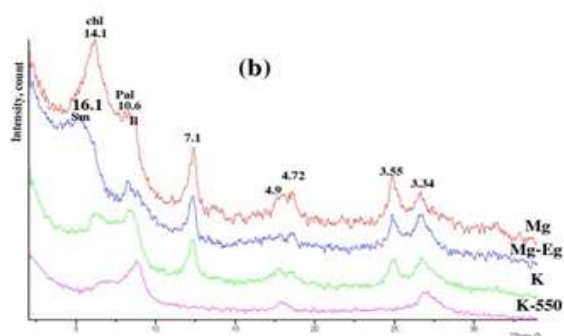
+: Relative abundance of minerals

^aCh, chlorite; Il, illite; Sm, smectite; Pa, palygorskite; Ka, kaolinite; Qr, quartz; Ve, vermiculite; Is, Interstratified minerals.

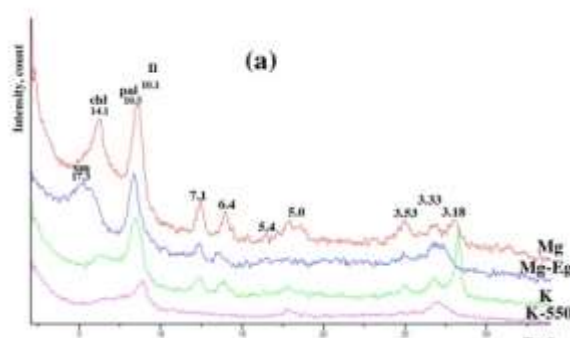
آهکی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی آن اریدیک-یوستیک و دارای افق‌های کلسیک و آرچیلیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic و در سامانه جهانی به صورت Calcidic Haplustalfs و در سامانه جهانی Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvic, Ochric) می‌باشد. در این خاک نیز سامانه جهانی اطلاعات بیشتری به صورت صفت فرعی (اکریک و فلوویک) ارائه می‌دهد (جدول ۵).

در سامانه طبقه‌بندی جهانی (۲۰۲۲) زمانی که افق‌های جیپسیک، کلسیک و آرچیلیک همزمان در خاک حضور دارند اولویت با افق جیپسیک بوده و خاک در گروه مرجع جیپسی سولز رده‌بندی می‌شود و ویژگی‌های دیگر به صورت صفات اصلی Calcic و Luvic افزوده می‌شوند. همچنین پیشنهاد افزودن صفت پسوندی Cutanic در گروه جیپسی سولز برای خاک‌های گچی با افق آرچیلیک دارای پوشش رسی داده می‌شود. همچنین صفت فرعی hypergypsic برای افق‌های جیپسیک با میزان گچ بیش از ۵۰ درصد به کار رفته است.

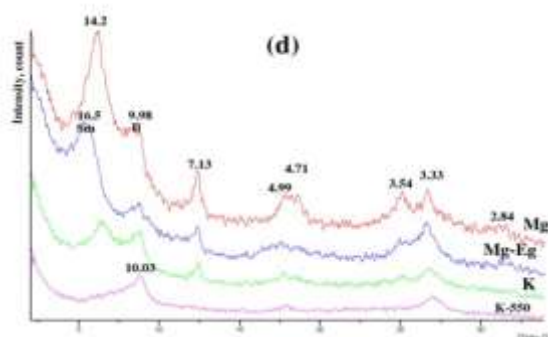
خاک رخ ۱۰: این خاک رخ در منطقه لیشر و بر روی مواد مادری



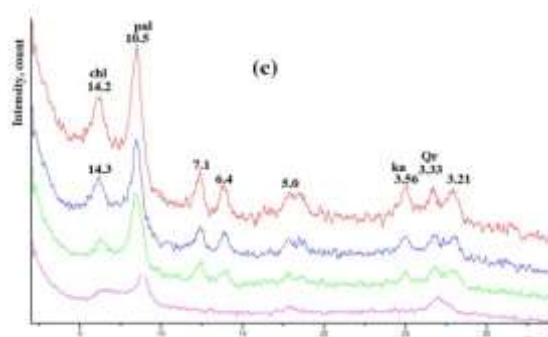
(ب) ب



(الف) ا



(د) د



(ج) ج

شکل ۲- پراش‌نگارهای پرتو ایکس نمونه‌های رس خاک

الف) افق Bw خاک رخ ۶ ب) افق Bk خاک رخ ۸ ج) افق By2 خاک رخ ۴ و د) افق Btk خاک رخ ۱۰. تیمارهای اشباع با منیزیم (Mg)، منیزیم و اتیلن گلیکول (Mg-Eg)، اشباع با پتاسیم (K) و پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس (K-550).

Figure 2- X-Ray diffractograms of the clay fraction

a) Bw horizon of pedon 6, b) Bk horizon of pedon 8, c) By2 horizon of pedon 4, d) Btk horizon of pedon 10, Sm: Smectite, I: Illite, Pa: Palygorskite, Ch: Chlorite, Ka: Kaolinite. Mg=Mg saturated; Mg-Eg=Mg saturated with Ethylene glycol; K=K saturated; K-550=K saturated and heated to 550 °C.

جدول ۵- خلاصه مقایسه کارایی دو سامانه رده‌بندی و موارد پیشنهاد شده

Table 5- Summary of the comparison of the efficiency of the two classification systems and the suggested items.

Pedon	سامانه آمریکایی (۲۰۲۲) Soil taxonomy (2022)	سامانه جهانی (۲۰۲۲) WRB (2022)	مقایسه دو سامانه رده‌بندی Comparison of two classification systems
Pedon 1	Loamy-skeletal, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustorthents	Calcaric Skeletic Regosols (Loamic, Humic)	تفاوت نه چندان زیاد بین دو سامانه. وجود صفت humic در طبقه‌بندی جهانی. حذف صفت اریدیک از سامانه جهانی (۲۰۲۲). Not much difference between the two systems. The presence of the humic qualifier in WRB. Removal of Aridic qualifier from WRB (2022). کارایی بهتر سامانه جهانی در توصیف این خاک. اولویت دادن به ویژگی فلوویک به‌عنوان گروه مرجع، همچنین وجود صفت هیومیک.
Pedon 2	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Ustifluvents	Calcaric Fluvisols (Loamic, Humic)	Better efficiency of WRB in describing this soil. Prioritizing the fluvic qualifier as the reference group, as well as the presence of the humic qualifier کارایی بهتر سامانه جهانی در توصیف این خاک به‌دلیل اولویت دادن به ویژگی اکویک نسبت به حضور ای‌پدون مالیک.
Pedon 3	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Fluvaquentic Epiaquolls	Calcaric Fluvisols (Loamic, Humic)	Better efficiency of WRB in describing this soil due to prioritizing the aquic property over the presence of Mollic Epipedon. کارایی بهتر سامانه جهانی به‌دلیل قرار دادن آن در گروه gypsisols، عدم حضور ویژگی جیپسیک تا سطح زیرگروه در سامانه آمریکایی. پیشنهاد افزودن زیرگروه Gypsic Haplustalfs به سامانه آمریکایی، پیشنهاد افزودن صفت پسوندی Cutanic به گروه جیپسی‌سولز در سامانه جهانی.
Pedon 4	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Loamic, Ochric, Hypergypsic)	Better efficiency of WRB, due to its inclusion in Gypsisols, Absence of gypsic property at subgroup level in Taxonomy. Suggestion for inclusion of "Gypsic Haplustalfs" subgroup to Taxonomy. کارایی بهتر سامانه جهانی به‌دلیل افزودن صفات کلکریک، رپتیک و اکریک. کارایی ضعیف سامانه آمریکایی به‌دلیل عدم حضور ویژگی حضور افق گچی تا سطح زیر رده و عدم توانایی در نشان دادن ویژگی انقطاع سنگی. پیشنهاد افزودن زیر گروه Fluventic Gypsiustepts به سامانه آمریکایی
Pedon 5	Fine-loamy, gypsic, hyperthermic, Fluventic Haplustepts	Calcaric Gypsisols (Loamic, Raptic, Ochric, Fluvisols)	Better efficiency of WRB due to the addition of "calcaric, reptic, and ochric" qualifiers. Poor efficiency of Taxonomy, due to the absence of gypsic horizon at sub-order category, as well as its disability in expressing of lithological discontinuity. Suggestion for inclusion of "Fluventic Gypsiustepts" subgroup to Taxonomy. به‌جز وجود صفت کمبیک در سامانه جهانی تفاوت زیادی در کارایی دو سامانه وجود ندارد.
Pedon 6	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Aridic Haplustepts	Calcaric Cambisols (Loamic, Ochric)	Except for cambic qualifier in WRB, there is no great difference in the efficiency of the two systems کارایی بیشتر سامانه جهانی به‌دلیل ارایه ویژگی‌هایی چون فلوویک، کمبیک و اکریک به نام خاک.
Pedon 7	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Petrocalcic Calciustepts	Petric Cambic Calcisols (Loamic, Fluvisols, hypercalcic, Ochric)	Better efficiency of WRB due to the addition of "fluvisols, cambic, and ochric" qualifiers. کارایی بیشتر سامانه جهانی به‌دلیل حضور ویژگی کمبیک به‌صورت صفت اصلی. حذف صفت اریدیک در سامانه جهانی (۲۰۲۲). پیشنهاد افزودن صفت فرعی hypercalcic به گروه کاستانوزمز در طبقه‌بندی جهانی
Pedon 8	Fine, carbonatic, hyperthermic, Aridic Calciustolls	Calcic Cambic Kastanozems (Clayic)	Better efficiency of WRB due to the presence of cambic property as principle qualifier. Removal of Aridic qualifier in WRB (2022). Suggestion for inclusion of "hypercalcic" qualifier to reference group of "Kastanozems" in WRB. کارایی بیشتر سامانه جهانی به‌دلیل حضور ویژگی کمبیک به‌صورت صفت اصلی. پیشنهاد افزودن زیرگروه Cambic Haplustolls به سامانه آمریکایی.
Pedon 9	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Typic Haplustolls	Cambic Kastanozems (Clayic)	Better efficiency of WRB due to the presence of cambic property as principle qualifier. Suggestion for inclusion of "Cambic Haplustolls" subgroup to Taxonomy. سامانه جهانی اطلاعات بیشتری به‌صورت صفت‌های فرعی اکریک و فلوویک ارایه می‌دهد. پیشنهاد افزودن صفت فرعی hypercalcic به گروه لووی‌سولز در طبقه‌بندی جهانی.
Pedon 10	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Ochric)	WRB, provides more information as supplementary qualifiers of ochric and fluvic. Suggestion for inclusion of supplementary qualifier of "hypercalcic" to Luvisols in WRB. سامانه جهانی اطلاعات بیشتری به‌صورت صفت‌های فرعی اکریک و فلوویک ارایه می‌دهد. پیشنهاد افزودن صفت فرعی hypercalcic به گروه لووی‌سولز در طبقه‌بندی جهانی.
Pedon 11	Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvisols, Ochric)	WRB, provides more information as supplementary qualifiers of ochric and fluvic. Suggestion for inclusion of supplementary qualifier of hypercalcic to Luvisols in WRB. سامانه جهانی اطلاعات بیشتری به‌صورت صفت‌های فرعی اکریک و فلوویک ارایه می‌دهد. پیشنهاد افزودن صفت فرعی hypercalcic به گروه لووی‌سولز در طبقه‌بندی جهانی.
Pedon 12	Fine, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs	Calcic Luvisols (Clayic, Cutanic, Fluvisols, Ochric)	WRB, provides more information as supplementary qualifiers of ochric and fluvic. Suggestion for inclusion of supplementary qualifier of hypercalcic to Luvisols in WRB.

خاک رخ ۱۱: این خاک رخ در منطقه منجگان و بر روی مواد مادری آهکی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی آن یوستیک و دارای افق‌های کلسیک و آرچیلیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine-loamy, carbonatic, hyperthermic, Calcic Haplustalfs و در سامانه جهانی به صورت Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvisols, Ochric) می‌باشد. در حالی که سامانه جهانی برای خاک‌های لوویسولز صفت فرعی فلوویک وجود دارد، سامانه آمریکایی فاقد این ویژگی برای خاک‌های آلفی‌سول می‌باشد. **شکل ۳** مقطع نازک افق Btk این خاک رخ را نشان می‌دهد. پوسته‌های رسی، بلورهای کلسیت و تجمعات اکسید آهن و منگنز از عوارض پدوژنیک مشاهده شده در این افق بوده است. دلایل حضور توأم پوسته‌های رسی و عوارض آهکی در افق‌های Btk توسط پژوهشگران مختلف بررسی شده است (Owliaie, 2014; Khademi and Mermut, 2003; Khormali et al., 2006).

خاک رخ ۱۲: این خاک رخ در منطقه دهدشت و بر روی مواد مادری آهکی تشکیل شده است. رژیم رطوبتی آن یوستیک و دارای افق‌های کلسیک و آرچیلیک می‌باشد. رده‌بندی این خاک در سامانه آمریکایی به صورت Fine, carbonatic, hyperthermic, Calcic Luvisols و در سامانه جهانی به صورت Calcic Luvisols (Loamic, Cutanic, Fluvisols, Ochric) می‌باشد. این خاک رخ و دو خاک رخ قبلی دارای کربنات کلسیم بیش از ۵۰ درصد بوده و پیشنهاد افزودن صفت فرعی هایپرکلسیک برای لوویسول‌هایی با این ویژگی، همچون کلسی‌سول‌ها داده می‌شود. منتخبی کلجایی و همکاران (Montakhabi Kalajahi et al., 2018) در پژوهشی در توصیف ویژگی‌های خاک‌های شور و گچی استان آذربایجان شرقی اشاره نمودند که سامانه رده‌بندی مرجع جهانی به صورت ساده‌تر با استفاده از دو سطح مختلف (گروه مرجع و استفاده از توصیف‌کننده‌های متنوع) برای رده‌بندی خاک، آسان‌تر، دقیق‌تر و کم‌هزینه‌تر از سامانه آمریکایی به نظر می‌رسد. در سامانه آمریکایی با وجود ویژگی‌های جزئی‌تر در سطح فامیلی و استفاده از رژیم‌های رطوبتی و حرارتی در رده‌بندی خاک، باز کاستی‌هایی در نمایش ویژگی‌های اصلی خاک و برخی از افق‌های مشخصه که همزمان در یک خاک رخ اتفاق می‌افتد، وجود دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد که سامانه طبقه‌بندی جهانی (WRB) در مجموع کارایی بسیار بهتری در توصیف ویژگی‌های خاک‌های منطقه داشته است. بزرگترین مزیت این سامانه دو سطحی، امکان افزودن صفت‌های اصلی و فرعی با تعدادی بیشتر به منظور پوشش تمامی ویژگی‌های مهم خاک می‌باشد. همچنین در بسیاری موارد اولویت‌بندی

بهتری در سامانه جهانی نسبت به سامانه آمریکایی وجود دارد از جمله برتری دادن به ویژگی‌هایی که خاک واجد آن ویژگی را به یک گروه مرجع تبدیل می‌کند؛ در حالی که آن ویژگی در سامانه آمریکایی در سطوح پایین‌تر (مانند زیرگروه و فامیلی) نشان داده می‌شود؛ از جمله افق جیپسیک (گروه مرجع Gypsisols)، شرایط فلوویک (گروه مرجع Fluvisols)، شرایط احیایی (گروه مرجع Gleysols)، وجود افق کمبیک (گروه مرجع Cambisols) و وجود افق کلسیک (گروه مرجع Calsisols). یکی از کمبودهای سامانه جهانی، نبود اطلاعات کافی شناسی در رده‌بندی خاک می‌باشد. انتخاب صفت‌های مناسب کافی‌شناسی برای گروه‌های مرجع و یا معیارهایی که با اندازه‌گیری نسبتاً آسان، شرایط حاصلخیزی خاک را بیان کند، موجب بهبود کیفیت سامانه‌های این رده‌بندی و افزایش علاقه‌مندی کاربران و برنامه‌ریزان از آن خواهد شد. همچنین با توجه به نتایج و بررسی‌های صورت‌گرفته، زیرگروه‌های زیر به منظور افزودن به سامانه آمریکایی پیشنهاد می‌شوند:

۱- زیرگروه Gypsic Haplustalfs برای خاک‌های آلفی‌سول با رژیم رطوبتی یوستیک که دارای افق جیپسیک در ۱۰۰ سانتی‌متری از سطح خاک باشند.

۲- زیرگروه Fluventic Gypsiustepts برای خاک‌های با رژیم رطوبتی یوستیک و افق جیپسیک که دارای ویژگی فلوونیتیک باشند.

۳- زیرگروه Cambic Haplustolls برای خاک‌های با رژیم رطوبتی یوستیک و افق مالیک که دارای افق کمبیک باشند.

۴- سامانه رده‌بندی آمریکایی فاقد مشخصه‌ای است که ویژگی انقطاع سنگی را به مانند سامانه جهانی بیان کند. پیشنهاد می‌شود در سطح زیرگروه این ویژگی نشان داده شود.

همچنین موارد زیر در ارتباط با سامانه طبقه‌بندی جهانی پیشنهاد می‌گردند:

۱- پیشنهاد افزودن صفت فرعی Cutanic به گروه مرجع جیپسی-سولز برای خاک‌های دارای پوسته رسی در افق آرچیک.

۲- پیشنهاد افزودن صفت فرعی hypercalcic به گروه‌های مرجع کاستانوزم و لووی‌سولز که دارای افق کلسیک با میزان کربنات کلسیم معادل بیش از ۵۰ درصد هستند.

۳- افزودن مجدد صفت اریدیک به منظور بیان بهتر ویژگی خاک‌های با رژیم اریدیک-یوستیک.

هنوز مطالعات مرتبط با مقایسه کارایی این دو سامانه در بسیاری از مناطق کشور انجام نشده است. توصیه می‌شود در مطالعات آینده، طبقه بندی خاک‌ها توسط هر دو سامانه رده‌بندی انجام شود تا نقاط ضعف و قوت آنها برای خاک‌های مناطق مختلف تعیین گردد و با توجه به آن موارد، تدوین سامانه رده‌بندی ملی خاک برای کشور انجام شود.

منابع

1. Bahmani, M., Salehi, M.H., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2014). Comparison of American soil taxonomy and WRB classification systems in describing the properties of some soils in arid and semi-arid regions of central Iran. *Journal of Agricultural and Natural Resources Sciences and Technology*, 67, 11–21. (In Persian with English abstract)
2. Banaie, M.H. (1998). Soil moisture and temperature regimes map of Iran. Soil and Water Research Institute of Iran, Iran.
3. Brevik, E.C., Calzolari, C., Miller, B.A., Pereira, P., Kabala, C., Baumgarten, A., & Jordán, A. (2016). Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 264, 256–274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.05.017>
4. Chapman, H.D. (1965). Cation exchange capacity. In: Black CA, editor. *Methods of soil analysis*. Part 2. Madison (WI): American Society of Agronomy. p. 891–901.
5. Cline, M.G. (1967). Basic principles of soil classification. *Soil Science*, 67(2), 81–91.
6. Esfandiarpour Boroujeni, I., Farpoor, M.H., & Kamali, A. (2011). Comparison between soil taxonomy and WRB for classifying saline soils of Kerman province. *Journal of Water and Soil*, 25(5), 1158–1171. (In Persian)
7. Esfandiarpour Boroujeni, I., Mosleh, Z., & Farpoor, M.H. (2018). Comparing the ability of soil taxonomy (2014) and WRB (2015) to distinguish lithologic discontinuity and an abrupt textural change in major soils of Iran. *Catena*, 165, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.018>
8. Esfandiarpour, I., Salehi, M.H., Karimi, A., & Kamali, A. (2013). Correlation between Soil Taxonomy and world reference base for soil resources in classifying calcareous soils: (a case study of arid and semiarid regions of Iran). *Geoderma*, 197, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.002>
9. Eswaran, H., Rice, T., Ahrens, R., & Stewart, B.A. (Eds.). (2002). *Soil Classification: A Global Desk Reference*. CRC Press, Boca Raton, FL.
10. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). *Particle-size analysis*. In 'Methods of soil analysis, Part 1. Agronomy Monograph, Vol. 9'. 2nd edn. (Ed. A Klute) pp. 383–411. (American Society of Agronomy: Madison, WI, USA)
11. Gerasimova, M.I. (2010). Chinese soil taxonomy: between the American and the international classification systems. *Eur. Soil Science*, 43(8), 945–949.
12. Havaee, Sh., Kamali, A., & Toomanian, N. (2019). Appraisal of the world reference base for soils (WRB) and US soil taxonomy for classification of developed soils of Zayandeh-rud River's upper Terrace. *Journal of Water and Soil*, 33(1), 181–189. (In Persian with English abstract)
13. IUSS Working Group WRB, (2014). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. In: *World Soil Resources Reports No. 106*. FAO, Rome.
14. IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.
15. Jackson, M.L. (1975). *Soil Chemical Analysis*. Advanced Course Univ. of Wisconsin, College of Agric., Dept. of Soils, Madison, WI. 894 pp.
16. Johns, W.D., Grim, R.E., & Bradley, F. (1954). Quantitative estimation of clay minerals by diffraction methods. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24(4), 242–251.
17. Khademi, H., & Mermut, A.R. (2003). Micromorphology and classification of Argids and associated gypsiferous Aridisols from central Iran. *Catena*, 54, 439–455.
18. Khormeli, F., Abtahi, A., & Stoops, G. (2006). Micromorphology of calcitic pedofeatures in highly calcareous soils of Fars province, Southern Iran. *Catena*, 132, 3–46.
19. Kittrick, J.A., & Hope, E.W. (1963). A procedure for the particle size separation of soils for X-ray diffraction analysis. *Soil Science*, 96(5), 319–325.
20. Lee, D.B., Kim, Y.-N., Sonn Y.-K., & Kim, K. H. (2022). Comparison of Soil Taxonomy (2022) and WRB (2022) Systems for classifying Paddy Soils with different drainage grades in South Korea. *Land*, 12, 1204. <https://doi.org/10.3390/land12061204>
21. Lee, D.B., Seo, B.H., Go, W.R., Cho, S.R., & Sonn, Y.K. (2023). Comparison among Soil Taxonomy (2014), WRB (2014), and WRB (2022) Systems on Anthropogenic Soils in Korea. *Korean Journal Soil Science Fertility*, 56(1), 68–76. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2023.56.1.068>
22. Lee, S.B., Chun, H.C., Cho, H.J., Hyun, B.K., Song, K.C., Zhang, Y.S., Sonn, Y.K., & Park, C.W. (2013). Soil classification of anthropogenic soils in a remodeled area using soil taxonomy and world reference base for soil resources. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, (6), 536–541. <https://doi.org/10.7745/KJSSF.2013.46.6.536>
23. Meng, Q., Li, S., Liu, B., Hu, J., Liu, J., Chen, Y., & Ci, E. (2023). Appraisal of soil taxonomy and the world reference base for soil resources applied to classify purple soils from the Eastern Sichuan Basin, China. *Agronomy*, 13(7), 1837. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071837>
24. Montakhab Kalajahi, V., Jafarzadeh, A.A., Oustan, Sh., Shahbazi, F., & Arabi Belaghi, R. (2018). Soil Taxonomy (ST) and World Reference Base (WRB) systems proficiency to describe saline and gypsiferous soils properties in some region of east Azerbaijan. *Water and Soil Science*, 28, 55–67. (In Persian with English abstract)

25. Murphy C.P. (1986). *Thin Section Preparation of Soils and Sediments*. AB Academic Publishers, Berkhamsted, Herts, UK.
26. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and matter*. In 'Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy Monograph, Vol. 9'. 2nd edn. (Eds AL Page, RH Miller, DR Keeney) pp. 539–577. American Society of Agronomy: Madison, WI, USA.
27. Nelson, R.E. (1982). *Carbonate and gypsum*. In 'Methods of soil analysis. Part 2'. (Eds AL Page, RH Miller, DR Keeney) pp. 181–197. (American Society of Agronomy: Madison, WI, USA).
28. Owliaie, H.R. (2014). Soil Genesis along a Catena in Southwestern Iran: A Micromorphological Approach. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(4), 471-486. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.796587>
29. Owliaie, H.R. Najafi Ghiri, M., & Shakeri, S. (2018a). Soil-landscape relationship as indicated by pedogenesis data on selected soils from Southwestern, Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 7(2), 167–180. <https://doi.org/10.18393/ejss.376284>
30. Owliaie, H.R., Najafi Ghiri, M., Adhami, E., & Shakeri, S. (2018b). Pedological investigation of a Litho-Toposequencen a semi-arid region of Southwestern Iran. *Eurasian Soil Science*, 51(12), 1447–1461. <https://doi.org/10.1134/S1064229318130033>
31. Page, A.L., Miller, R.H., & Keeney, D.R. (1982). *Methods of Soil Analysis*, Second edition. Part 2: Chemical and Biological Properties. Soil Science Society of America Journal Publisher.
32. Rasooli, N., Farpoor, M.H., Mahmoodabadi, M., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2021). Capability of Soil Taxonomy (2014) compared to updated WRB (2015) in describing Lut Desert soils. *Desert*, 26(2), 219-235. <https://doi.org/10.22059/JDESERT.2021.318248.1006804>
33. Rhoades, J.D. (1996). *Salinity: Electrical Conductivity and total dissolved solids*. P. 417- 436. In: Sparks D.L. et al., (eds) *Methods of soil analysis. Part 3*. Am. Soc. Agron., Madison. WI.
34. Roca P.N., & Pazos M.S. (2002). *The WRB applied to Argentinian soils: two case studies*. European Soil Bureau, Research Report NO. 7. Latvia University of Agriculture, Jelgava, Latvia. pp. 191-197.
35. Salehi, M.H. (2018). *Challenges of Soil Taxonomy and WRB in classifying soils: Some examples from Iranian soils*. *Bull. Geogr. Phys. Geogr. Ser.* 2018, 63–70. <https://doi.org/10.2478/bgeo-2018-0005>
36. Salinity Laboratory Staff. (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*, Agriculture Handbook vol. 60 (Department of Agriculture, Washington).
37. Sanjari, S., Farpoor, M.H., Mahmoodabadi, M., & Barkhori, S. (2021). Soil Taxonomy and WRB comparison to classify soils with different climatic conditions in Kerman province. *Agricultural Engineering*, 43(4), 479-493. (In Persian). <https://doi.org/10.22055/AGEN.2021.34266.1575>
38. Sarmast, M., Farpoor, M.H., & Esfandiarpour Boroujeni, I. (2016). Comparing Soil Taxonomy (2014) and updated WRB (2015). for describing calcareous and gypsiferous soils, Central Iran. *Catena*, 145, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.026>
39. Sarshogh, M., Salehi, M.H., & Beigie, H. (2012). The effect of slope aspect and position on Soils particle size distribution in Chelgerd region, Chaharmahal-va-Bakhtiari province. *Journal Water Soil Conservation*, 19, 77-97. (In Persian). <https://doi.org/20.1001.1.23222069.1391.19.3.5.0>
40. Schad, P., & Micheli, E. (2010). *The next steps in soil classification or how to kill 3 birds with 1 stone: pedons, landscapes, functions*. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. pp: 40–42.
41. Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., & Broderson, W.D. (2012). *Field book for describing and sampling soils*, 2nd version. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE, USA.
42. Soil Science Division Staff. (2017). *Soil Survey Manual*. C. Ditzler, K. Scheffe, and H.C. Monger (eds). U.S. Department of Agriculture Handbook 18. Government Publishing Ofce, Washington, D.C.
43. Soil Survey Staff, (2014). *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
44. Soil Survey Staff, (2022). *Keys to Soil Taxonomy*. 1th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
45. Soil Survey Staff. (2014). *Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5.0. R. Burt and Soil Survey Staff (ed). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service
46. Stoops, G. (2003). *Guidelines for the Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
47. Toomanian, N. (2006). *How to develop land, soil diversity and quantitative mapping of some pedogenic characteristics in some parts of Central Iran*. Ph.D. Thesis, Soil Science Dept. College of Agriculture, Isfahan University of Technology.
48. Toomanian, N., Jalalian, A., & Eghbal, M.K. (2003). Application of the WRB (FAO) and US taxonomy systems to gypsiferous soils in Northwest Isfahan. *Iran Journal Agriculture Science Technology*, 5, 51-66.



Spatial-Temporal Analysis of Cloudiness Across the Iran

A. Gholami^{1*}, H. Mir Mousavi², M. Jalali³, K. Raispour⁴

Received: 17-06-2023

Revised: 30-07-2023

Accepted: 08-08-2023

Available Online: 09-08-2023

How to cite this article:

Gholami, A., Mir Mousavi, H., Jalali, M., & Raispour, K. (2023). Spatial-temporal analysis of cloudiness across the Iran. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 621-641. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82496.1285>

Introduction

Clouds can be considered as one of the most complex and influential variables of the atmosphere system in forming of the climate structure of the earth. When the condensation process takes place at a higher altitude than the earth's surface, it creates clouds. Cloudiness represents the percentage of the atmosphere that is covered by clouds. Clouds, as one of the most complex variables of the climate system, besides changing the energy balance, are also effective in the spatial and temporal distribution of many climate variables. Clouds have a lot of temporal and spatial variability and can affect the climate through many complex relationships and affect the water cycle. The investigation of clouds holds great significance as they serve as the bridge between synoptic systems and the Earth's surface climatic conditions. Any alteration in cloud-related parameters can trigger a domino effect, influencing various other climatic variables. It's worth noting that Iran exhibits a lower average cloud cover of 26%, notably less than the global average of 50%. This places Iran in the category of countries with relatively minimal cloud cover. Hence, possessing insights into the atmospheric cloud cover conditions in Iran becomes imperative for early detection and management of hydroclimatic crises, particularly in the context of water scarcity and drought-related challenges.

Data and Methods

In the current research, the cloud data of 93 synoptic meteorological stations of Iran have been used in the daily time period during the statistical period of 1991-2021. The amount of cloudiness is an estimate of the nearest octa (eighth) and values 0 and 8 are completely clear and completely cloudy, respectively. In the present study, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling and Lilliefors test were used to determine the normality of the data at the 95% confidence level for annual, monthly and seasonal scales.

In the subsequent phase, we employed both parametric and nonparametric methods to discern trends within the cloudiness time series. The parametric approach involved a linear regression test based on the least squared error method, while the nonparametric method employed the Mann-Kendall test. These tests allowed us to identify data trends, accounting for both normal and non-normal distributions of cloudiness. Furthermore, we explored the interplay between cloud cover and spatial factors, namely latitude and longitude, employing Pearson's correlation coefficient. This analysis shed light on the relationships between these variables. Conclusively, we created a spatial distribution map depicting the extent of cloudiness across various stations. This mapping allowed us to dissect the temporal-spatial distribution of cloudiness, comprehend alterations in cloud cover, and investigate the contributing factors behind these changes.

Results and Discussion

The results of Normality Tests according to the Kolmogorov-Smirnov test showed that all the stations did not have a normal distribution however, during the other two tests, except Arak, Kashan, Sarakhs, Takab, Kahnuij, Ramhormoz and Ramsar, other stations had normal distribution. The tests to determine the trend based on the

1, 2, 3 and 4- Ph.D. Student, Associate Professor and Assistant Professors in Climatology, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: gholami.ava97@znu.ac.ir)

DOI: [10.22067/jsw.2023.82496.1285](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.82496.1285)

parametric linear regression test based on the least squares error method showed a decreasing trend in 44 stations and an increasing trend in 3 stations of Ardabil, Qom and Sarab. According to the non-parametric Mann-Kendall test, among the stations without normal distribution, Kahnuj, Ramhormoz and Sarakhs stations have a decreasing trend, and no special trend was observed in other stations. The relationship between the two factors of latitude and longitude with the cloudiness variable using the Pearson correlation coefficient indicates a negative relationship (-0.42) between the cloudiness variable and the longitude factor as the amount of cloudiness in Iran's atmosphere decreases with the increase of latitude. However, the relationship between cloudiness variable and latitude, a positive relationship (0.75) was obtained as the amount of cloudiness increases with the increase of latitude. The survey of the annual cloudiness map of the stations shows the highest amount of cloudiness is in the South, Southwest and East of Caspian Sea. The lowest amount of annual rainfall was in South and Southeast of Iran. The statistical analysis of annual cloudiness data in Iran showed that the amount of cloudiness in Iran is 27.5%. Examining the normal distribution of monthly and seasonal values indicates the non-normality of the data with the Kolmogorov-Smirnov test, but based on the Lilliefors and Anderson-Darling tests, the winter and spring seasons and the months of December, January, February, April and May had a normal distribution and the autumn and summer seasons and the months of June, July, August, September and October did not have normal distribution. Seasonal and monthly trend with linear regression method shows a decreasing trend in winter and spring seasons and cold months of the year. According to the Mann-Kendall method, there was a decreasing trend in the fall season and no significant trend was observed in the summer season.

Conclusion

The purpose of this research was to investigate the temporal and spatial changes of cloudiness in Iran. The results showed a decreasing trend in 47 stations and an increasing trend in only 3 stations and no significant trend was observed in other stations. Also, in monthly and seasonal scales results indicated a decreasing trend in all stations in the cold months of the year and winter, spring and autumn seasons. Examining the relationship between the spatial factors of longitude and latitude with the cloudiness variable using Pearson's correlation coefficient also indicates a negative correlation with longitude and a positive correlation with latitude, and this indicates a large spatial difference in the amount of cloudiness in the country. In general, it can be said that spatial factors (longitude and latitude) were internal factors in the spatial changes of clouds and climatic systems such as Siberian high pressure, sub-tropical high pressure, westerlies system and moisture from the seas of Oman, India and the Persian Gulf and sometimes the Red Sea as external factors were in the temporal changes of clouds. So, cloudiness was a variable that was directly related to other climate variables. Thus, cloud cover was a variable that was directly related to other climatic variables, and its decrease or increase causes the values of elements such as temperature, precipitation, and humidity to change. Therefore, studying this important climate variable and investigating its changes is very important and especially in the discussions of droughts and water crises, it has a special place.

Keywords: Cloud cover, Iran, Spatial-Temporal analysis, Trend

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۶۴۱-۶۲۱

تحلیل زمانی- مکانی ابرناکی در ایران

آوا غلامی^{۱*} - سید حسین میرموسوی^۲ - مسعود جلالی^۳ - کوهزاد رئیس پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

چکیده

ابرها را می‌توان به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و تأثیرگذارترین متغیرهای دستگاه نیوار در شکل‌دهی ساختار اقلیمی کره زمین به شمار آورد. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی و تحلیل مقدار ابرناکی به لحاظ تغییرات زمانی و مکانی در ایران است که طی یک دوره ۳۱ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۱) برای تعداد ۹۳ ایستگاه در پهنه ایران به انجام رسیده است. بدین منظور داده‌های روزانه متغیر ابر از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید و پس از بررسی و پیش‌پردازش و تبدیل آنها به مقیاس‌های سالانه، ماهانه و فصلی، سطح نرمال بودن داده‌ها با آزمون‌های مختلف آماری از قبیل آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف، لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ بررسی شد. سپس براساس توزیع نرمال و غیرنرمال سری‌های زمانی ابرناکی جهت تشخیص روند داده‌ها از آزمون رگرسیون خطی بر اساس روش کمترین مربعات خطا و آزمون من-کندال در سطح اطمینان ۹۵ درصد استفاده شد. نتایج سالانه نشان داد تعداد ۵۰ ایستگاه دارای تغییرات معنادار بوده‌اند که جهت این تغییرات در ۴۷ ایستگاه، کاهشی و تنها در ۳ ایستگاه، افزایشی بوده است، در سایر ایستگاه‌ها هیچ روند معناداری مشاهده نگردید. نتایج ماهانه و فصلی نیز بیانگر روند کاهشی مقدار ابرناکی در ماه‌های سرد سال و فصل‌های زمستان و بهار و البته فصل پاییز است. همچنین ارتباط بین عوامل مکانی طول و عرض جغرافیایی با مقدار ابرناکی با استفاده از آزمون ضریب همبستگی پیرسون بررسی گردید که نتایج این آزمون بیانگر همبستگی منفی با طول جغرافیایی و همبستگی مثبت با عرض جغرافیایی است. سپس مقدار ابرناکی و توزیع آن در هر یک از مقیاس‌های مورد مطالعه (سالانه، ماهانه و فصلی) در پهنه ایران در قالب نقشه نمایش داده شد. بالاترین مقادیر سالانه ابرناکی در جنوب و جنوب‌غربی دریای خزر در ایستگاه‌های رشت، رامسر، بندر انزلی، نوشهر و بابلسر و بعد از آن در مناطق شمال‌غرب کشور در ایستگاه‌های اردبیل، اهر، تبریز، سراب و ماکو و کمترین مقدار در مناطق جنوب و جنوب‌شرق کشور است.

واژه‌های کلیدی: ابرناکی، ایران، تحلیل زمانی- مکانی، روند

مقدمه

بخشی از نیوار که به وسیله نوع ابر خاصی یا به وسیله انواع ابرهای مختلف پوشیده شده باشد گفته می‌شود (WMO, 2008). ابرناکی یک متغیر عمده اقلیمی است و به طور مستقیم با شار تابشی هم در بالای جو و هم در بالای سطح زمین ارتباط دارد که در عرض‌های معتدله در نتیجه اشباع در جو به وجود می‌آید و عمدتاً به دلیل کم‌فشارهای جبهه ای یا سرمایش بی‌درروی محلی در ارتباط با جریان‌های همرفتی در شرایط ناپایدار جو رخ می‌دهد (Lolis, 2009). این متغیر نماینده

وقتی که فرایند تراکم در ارتفاع بالاتر نسبت به سطح زمین صورت بگیرد، ابر را به وجود می‌آورد (Kavyani and Alijani, 2012). طبق دستورالعمل سازمان هواشناسی جهانی، ابر، توده‌ای از ذرات خیلی ریز آب یا بلورهای یخ یا ترکیبی از هر دو است که در بالای سطح زمین قرار گرفته و در یک مکان دیده‌بانی قابل مشاهده باشد. ابرناکی، به

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استادیاران آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(Email: gholami.ava97@znu.ac.ir)

* - نویسنده مسئول:

درصدی از آسمان است که پوشیده از ابر است. ابرها به عنوان یکی از پیچیده‌ترین متغیرهای سامانه اقلیم، علاوه بر تغییر در بیلان انرژی، در توزیع زمانی و مکانی بسیاری از متغیرهای اقلیمی نیز موثر هستند (Rezaei and Ghavidel, 2016). همچنین اینکه ابرها تغییرپذیری زمانی و مکانی زیادی دارند و می‌توانند اقلیم را از طریق روابط پیچیده‌ی زیادی تحت تأثیر قرار داده و چرخه آب را درگیر سازند (Schiffer and Rossow, 1983). مطالعه ابرها به علت اینکه حد واسط بین سامانه های همدیدی و شرایط آب و هوای سطح زمین هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و هر گونه تغییر در متغیرهای آن می‌تواند سرآغاز زنجیره‌ای از واکنش‌ها در دیگر متغیرهای اقلیمی گردد (Ahmadi et al., 2020). اهمیت و کاربرد تغییرات زمانی و مکانی مقدار پوشش ابرها می‌تواند در مباحثی مانند مکان‌یابی نیروگاه‌های خورشیدی، پیش بینی‌های آب و هوایی، مدل‌های هیدرولوژیکی، بهبود مدل‌های تغییر اقلیم و بارورسازی ابرها باشد. پدیده ابرناکی به عنوان یکی از مهم‌ترین مولفه‌های اقلیمی نقش موثری در شرایط اقلیمی و شرایط محیطی منطقه ایفا می‌کند. این پدیده به عنوان مقدمه چرخه هیدرولوژیکی و همچنین نقش موثر در بیلان انرژی سطح زمین، از نظر کم‌آبی و خشکسالی نیز حایز اهمیت فراوان می‌باشد. از همین‌رو، آگاهی از وضعیت ابرناکی جو ایران برای پیش‌آگاهی در مدیریت بحران مخاطرات هیدروکلیمایی بخصوص بحران کم‌آبی و خشکسالی بسیار حیاتی است (Ahmadi et al., 2018). با عنایت به اینکه میانگین ابرناکی ایران، ۲۶ درصد است که با توجه به میانگین جهانی (۵۰ درصد)، ایران کشوری کم‌ابر به شمار می‌آید (Masoudian and Kavyani, 2008). لذا اهمیت این پدیده در اقلیم کره زمین و نیز نقش آن در زندگی انسان موجب شده تا در سطح جهانی و ایران مطالعاتی را به خود اختصاص دهد.

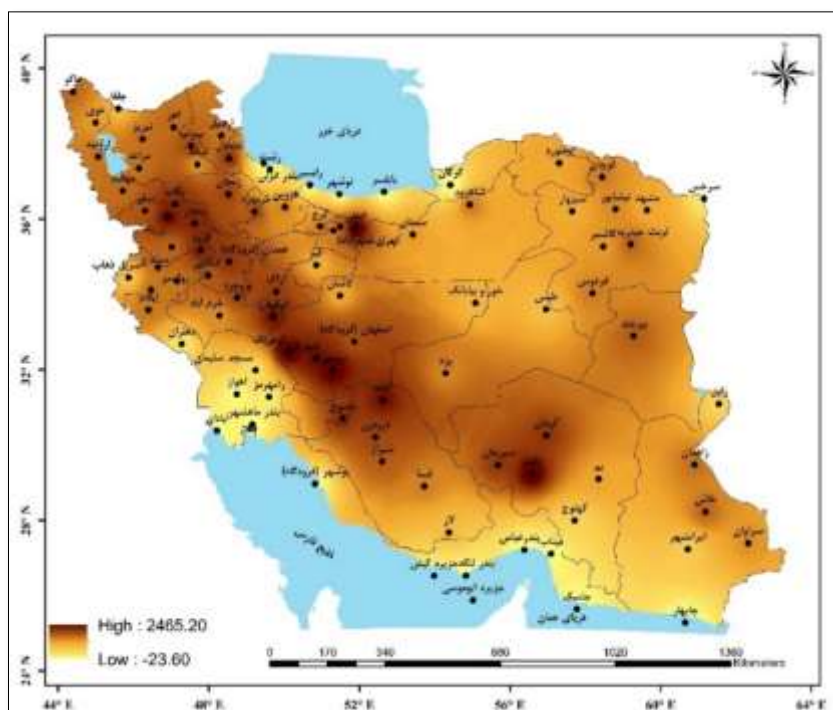
در زمینه مطالعاتی که در خارج از کشور انجام گرفته می‌توان به این تحقیقات اشاره کرد: اشنایدر (Schneider, 1972) با بررسی تأثیرات حاصل از تغییرات ابرناکی بر روی تابش و دمای سطح زمین اذعان نمود که در مطالعه تغییرات ابرناکی ابتدا باید مقدار اولیه این تغییرات بر روی تابش خالص مشخص شود. اورینگ و کلپ (Ohring and Clapp, 1980) با بررسی تأثیر مقادیر ابر بر روی تابش خالص در بالای جو متوجه نوسانات تابش خالص نسبت به تغییرات مقدار ابر در نتیجه اثر آلودگی ابرها شدند. استون و همکاران (Stone et al., 1989) و داتون و همکاران (Dutton et al., 1991) با مطالعه تغییرات تابش خورشید، ابرناکی و دما در قطب جنوب متوجه ارتباط گرمایش سطح با افزایش تابش موج بلند متأثر از ابرناکی شدند. همچنین اوباکاما و همکاران (Abakumova et al., 1996) با بررسی تغییرات بلندمدت تابش، ابرناکی و دمای سطح متأثر از ابرناکی و آلودگی جو در شوروی سابق، وندلر و همکاران (Wendler et al., 2004) با بررسی تأثیرات آلودگی بر روی تابش خالص با افزایش مقدار پوشش ابر در مناطق یخی

جنوبگان، روساک (Russak, 2009) با مطالعه تغییرات تابش خورشید و تأثیر آن بر روند دمای ناشی از تغییرات ابرناکی در شهر استونی، کجنا و همکاران (Kejna et al., 2012) با مطالعه تأثیر ابرناکی بر روی بیلان تابش خورشیدی، ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2015) با مطالعه تابش موج کوتاه خورشیدی در ارتباط با ابرناکی، پیرگو و همکاران (Pyrgou et al., 2019) با بررسی تغییرات دما در ارتباط با ابرناکی، کبیائو و همکاران (Kebiao et al., 2019) با بررسی مقدار ابرناکی جهانی با استفاده از داده‌های Modis، دانسو و همکاران (Danso et al., 2020) با مطالعه شرایط ابرناکی و اثرات آن در غرب افریقا و کجنا و همکاران (Kejna et al., 2021) با بررسی تأثیر ابرناکی و گردش جوی بر بیلان تابش در منطقه‌ای در لهستان به نتایج مشابهی دست یافتند. در زمینه مطالعات داخل کشور نیز که تقریباً از حدود یک دهه اخیر شروع شده و طی این مدت نیز مطالعاتی صورت گرفته می‌توان به این تحقیقات اشاره نمود: شرعی پور و بیدختی (Shariepour and Bidokhti, 2011) با سنجش داده‌های ابرناکی و تابش و از ن در اصفهان به این نتیجه رسیدند که پوشش ابری زیاد می‌تواند باعث کاهش شدید تابش فرابنفش خورشیدی روزانه در منطقه مورد مطالعه گردد. علاوه بر این، پژوهشگرانی مانند موسوی بایگی و اشرف (Mousavi Baygi and Ashraf, 2011) کمترین میزان ابرناکی به منظور پهنه‌بندی نواحی پرتابش کشور، رسولی و همکاران (Rasouli et al., 2013) تغییرات زمانی و مکانی مقدار پوشش ابر و صحراییان و همکاران (Sahraeyan et al., 2015) را مورد بررسی قرار داده‌اند، و در نهایت به این نتیجه رسیده‌اند که مقدار پوشش ابری دارای روندی کاهشی بوده است. همچنین معماریان و دامن‌افشان (Memarian and Daman Afshan, 2016) با ارزیابی مقدار ابرناکی در ایران، پیش‌بینی‌هایی برای پوشش ابر با استفاده از مدل میان‌مقیاس جوی انجام داده‌اند. براتی و همکاران (Barati et al., 2017) نیز به تحلیل روابط ابرناکی شبانه و رخداد شب‌های گرم در ایران مرکزی پرداختند. حجازی‌زاده و همکاران (Hejazizadeh et al., 2017) با استفاده از اثر همزمان مولفه‌های ابرناکی، توپوگرافی، رطوبت لایه سطحی خاک و پوشش گیاهی به بررسی مقدار تغییرات زمانی- مکانی آلودگی ایران زمین پرداختند. احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2018) با مطالعه روند تغییرات مکانی و زمانی سالانه ابرناکی در ایران با استفاده از داده‌های مربوط به ابرناکی و بهره‌گیری از روش‌های مختلف زمین‌آمار به این نتیجه رسیدند که از شمال به جنوب و از غرب به شرق ایران، تعداد روزهای ابری کاهش می‌یابد و توزیع زمانی- مکانی روزهای ابری در کشور نیز تابع مولفه‌های مکان بویژه عرض جغرافیایی است. حاتمی بهمن بیگلو و موحدی (Hatami Bahmanbeiglou and Movahedi, 2018) با شناسایی فصلی و ماهانه ابرناکی در ایران با بهره‌گیری از داده‌های فرآورده ابرسنجندة Modis، قاسمی فر و همکاران (Ghasemifar et

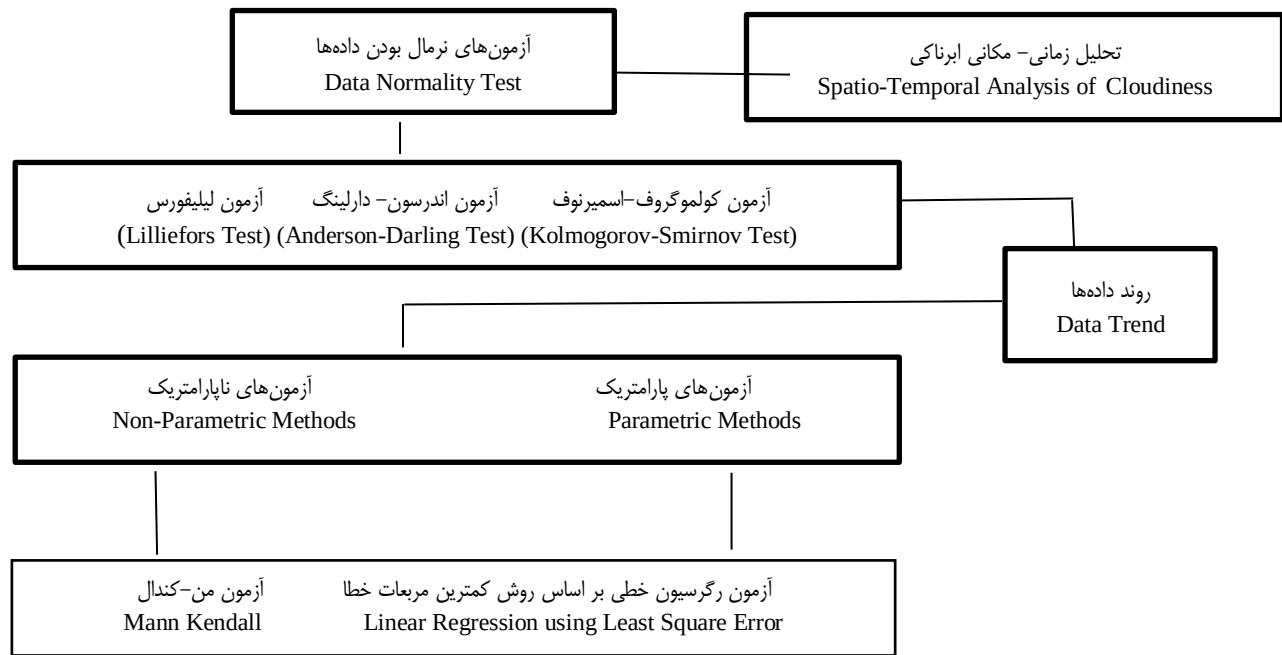
منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، منطقه مورد بررسی، کل ایران می‌باشد که با توجه به در دسترس بودن آمار مربوط به متغیر ابرناکی برای یک دوره ۳۱ ساله در مجموع از ۹۳ ایستگاه سینوپتیک برای پهنه ایران استفاده شده است. کشور ایران با وسعت ۱۶۴۸،۰۰۰ کیلومتر مربع بین عرض‌های ۰۳° ۲۵' الی ۰۳° ۴۷' شمالی و طول ۰۵° ۴۴' الی ۰۱° ۱۸' شرقی واقع شده و به لحاظ برخورداری از نوسانات شدید اقلیمی، بررسی متغیرهای آب و هوایی و عواملی که آنها را تحت کنترل دارند حائز اهمیت بسیار است (Fotouhi firoozabad and Malekinejad, 2020, Malekinejad et al., 2012). میانگین سالانه دما در پهنه کشور ایران با آهنگ ۱/۳۴ درجه سانتی‌گراد در هر سده دارای روند افزایشی است (Alipour et al., 2022)، و میانگین بلندمدت سالانه بارش ایران طبق پایگاه داده شبکه‌ای بارش اسفزاری، ۲۵۰ میلی‌متر در سال برآورد شده است (Masoodian, 2022). همچنین در تحقیقی که رئیس‌پور و رزمی (Raispour and Razmi, 2020) طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۱۹ با استفاده از داده‌های سنجنده MISR با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵° در ۰/۵° انجام داده‌اند میانگین ابرناکی در کل کشور را ۲۵ درصد برآورد کرده‌اند. موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

(al., 2018) با بررسی تغییرات فضایی- زمانی ابرناکی بر پایه ویژگی‌های جغرافیایی و داده‌های سنجنش از دور در ایران، احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2019) با بررسی توزیع فضایی- زمانی پوشش ابر طی فصول مختلف سال در ایران، رئیس‌پور و رزمی (Raispour and Razmi, 2020) با مطالعه توزیع مکانی و برآورد میانگین بلندمدت ابرناکی در مقیاس زمانی فصلی و ماهانه در محدوده جغرافیایی جو ایران، احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2020) با بررسی تغییرات فصلی ابرهای مایع در گستره ایران مبتنی بر داده‌های سنجنده Modis و احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2020) با تفکیک فصلی و سالانه ابرهای مایع و یخی در ایران و ارتباط آنها با مولفه‌های جغرافیایی و بارش، متغیر ابرناکی را در ایران مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. در مجموع می‌توان گفت اگرچه تاکنون مطالعات متعددی بر روی ابر در ایران انجام شده ولی این مطالعات صرفاً به بررسی جنبه‌هایی از ابر از جمله اثرات ابر بر روی تابش، دما یا بارش پرداخته‌اند و در برخی موارد این مطالعات شامل توضیح و طبقه‌بندی و بیان مشخصات فیزیکی انواع ابرها و یا بررسی تغییرات زمانی- مکانی ابر بصورت کلی بوده است. در این پژوهش با رویکردی متفاوت بویژه از جنبه بحث عدم قطعیت در علم آب و هوا سعی بر آن شده است تا روند زمانی و مکانی ابرناکی در مناطق مختلف ایران مورد تحلیل قرار گیرد.



شکل ۱- پراکنش مکانی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه
Figure 1- Spatial distribution of studied synoptic stations



نمای کلی بررسی داده‌ها و فرآیند تحقیق (Overview of data review and research process)

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های ابرناکی برگرفته از ۹۳ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک در ایران در بازه زمانی روزانه طی دوره آماری ۲۰۲۱-۱۹۹۱ استفاده شده است. مقدار ابرناکی برآوردی از نزدیک‌ترین اکتا^۱ (هشتم) می‌باشد و به استثنای مقادیر ۰ و ۸ که بترتیب به مفهوم کاملاً پاک و کاملاً ابری می‌باشد مقدار ابرناکی را با نماد یک‌دهم و یک‌هشتم مقایسه می‌کنند (WMO, 2008). برای وضعیت ابری از شش‌دهم تا نه‌دهم مقدار ابرناکی را در نظر می‌گیرند (Sharifan and Hezarjaribi, 2013). از آنجا که پدیده‌های طبیعی را نمی‌توان به طور قطع پیش‌بینی کرد (Latif, 2011) و عدم قطعیت، اساس آمار توصیفی و استنباطی است (Wilks, 2019) و از آنجایی که عدم قطعیت حقیقی در بکارگیری مدل‌ها (Asakereh, 2009) و عاملی کلیدی در شکل دهی به سیاست‌های اقلیمی است (Mehta et al., 2019) بنابراین، در این تحقیق ابتدا جهت تشخیص نرمال بودن داده‌ها در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای مقیاس‌های سالانه، ماهانه و فصلی، آزمون‌های کولموگوروف-اسمیرنوف^۲، اندرسون-دارلینگ^۳ و لیلیفورس^۴ (Panahi, Jing Lin Asamoah and Ansah-Mensah, 2020, et al., 2021, et al., 2020) به کار گرفته شد. در مرحله بعد برای تشخیص روند داده‌ها براساس توزیع نرمال و غیرنرمال سری‌های زمانی ابرناکی از

آزمون رگرسیون خطی بر اساس روش کمترین مربعات خطا^۵ (روش‌های پارامتریک) (Asakereh and Ashrafi, 2023, DelSole and Tali, 2022) و آزمون من-کندال^۶ (روش‌های ناپارامتریک) (Tippett, 2022) استفاده شد. همچنین به منظور بررسی ارتباط بین عوامل مکانی (طول و عرض جغرافیایی) با مقدار ابرناکی، (Asakereh et al., 2021) ضریب همبستگی پیرسون^۷ (Zarfeshani and Jahangir, 2021, Froitan and Zeynali, 2023) به کار برده شد. در نهایت با ترسیم پراکنش فضایی مقدار ابرناکی ایستگاه‌ها در قالب نقشه، نحوه پراکنش زمانی-مکانی ابرناکی و همچنین تغییرات پوشش ابر و عوامل تاثیرگذار بر این تغییرات مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

آزمون داده‌ها و تعیین روند در مقیاس سالانه

در پژوهش حاضر ابتدا نرمال بودن مقادیر ابرناکی مجموع ایستگاه‌های مورد مطالعه به روش‌های کولموگوروف-اسمیرنوف، لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ مورد آزمون قرار گرفت (جدول ۱). همانطور که در جدول ۱ نیز مشاهده می‌گردد تمام ایستگاه‌ها طبق آزمون کولموگوروف-

5- Linear Regression using Least Square Error Method

6- Mann-Kendall

7- Pearson Correlation

1- Octa

2- Kolmogorov-Smirnov Test

3- Anderson-Darling Test

4- Lilliefors Test

روش رگرسیون خطی مبتنی بر کمترین مربعات خطا، ۴۴ ایستگاه دارای روند کاهشی و ۳ ایستگاه اردبیل، قم و سراب دارای روند افزایشی بودند و در سایر ایستگاه‌ها هیچ روند مشخصی مشاهده نگردید. همچنین طبق آزمون ناپارامتریک من-کندال از بین ایستگاه‌های فاقد توزیع نرمال، ایستگاه‌های کهنوج، رامهرمز و سرخس دارای روند کاهشی و در سایر ایستگاه‌ها روندی مشاهده نگردید.

اسمیرنوف فاقد توزیع نرمال بودند اما با دو آزمون دیگر، تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه بجز ایستگاه‌های اراک، کاشان، سرخس، تکاب، کهنوج، رامهرمز و رامسر از توزیع نرمال برخوردار بودند. سپس روند داده‌های نرمال با آزمون پارامتریک رگرسیون خطی بر اساس روش کمترین مربعات خطا و روند داده‌های غیرنرمال با آزمون ناپارامتریک من-کندال بررسی شد. بر اساس نتایج (جدول‌های ۲ و ۳) حاصل از

جدول ۱- نتایج آزمون‌های کولموگوروف-اسمیرنوف (Kolmogorov Smirnov)، اندرسون-دارلینگ (Anderson Darling) و لیلیفورس (Lilliefors) برای داده‌های سالانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪) (خطوط ممتد: غیرنرمال و N: نرمال)

Table 1- The results of normality tests: ks, ad and lilliefors for annual cloudiness data (significance level: 95%) (None-normal: solid lines and N: Normal)

نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie	نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie
آبادان Abadan	—	N	N	دهلران Dehloran	—	N	N
آباده Abadeh	—	N	N	درودزن Dorudzan	—	N	N
آبعلی Abali	—	N	N	اصفهان Esfahan	—	N	N
ابوموسی Abu Musa	—	N	N	اسلام‌آبادغرب Eslamabad Gharb	—	N	N
اهر Ahar	—	N	N	فسا Fasa	—	N	N
اهواز Ahvaz	—	N	N	فردوس Ferdows	—	N	N
الیگودرز Aligudarz	—	N	N	گرگان Gorgan	—	N	N
اراک Arak	—	N	—	همدان Hamedan	—	N	N
اردبیل Ardebil	—	N	N	ایلام Ilam	—	N	N
بابلسر Babolsar	—	N	N	ایران‌شهر Iranshahr	—	N	N
بافت Baft	—	N	N	جاسک Jask	—	N	N
بم Bam	—	N	N	جلفا Jolfa	—	N	N
بندرعباس Bandar Abbas	—	N	N	کهنوج Kahnuj	—	—	N
بندرماهشهر Bandar Mahshahr	—	N	N	کنگاور Kangavar	—	N	N
بندرلنگه Bandar Lengeh	—	N	N	کاشان Kashan	—	—	—
بیجار Bijar	—	N	N	کرج Karaj	—	N	N

ادامه جدول ۱- نتایج آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov Smirnov)، اندرسون-دارلینگ (Anderson Darling) و لیلیفورس (Lilliefors) برای داده‌های سالانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪) (خطوط ممتد: غیر نرمال و N: نرمال)

Table 1- The results of normality tests: ks, ad and lilliefors for annual cloudiness data (Significance level: 95%) (None-normal: solid lines and N: Normal)

نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie	نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie
بیرجند Birjand	————	N	N	کاشمر Kashmar	————	N	N
بجنورد Bojnord	————	N	N	کرمان Kerman	————	N	N
بروجن Boroujen	————	N	N	کرمانشاه Kermanshah	————	N	N
بروجرد Borujerd	————	N	N	خلخال Khalkhal	————	N	N
بوشهر Bushehr	————	N	N	خاش Khash	————	N	N
چابهار Chabahr	————	N	N	خرم‌آباد Khorramabad	————	N	N
بندرانزلی Bandr Anzali	————	N	N	خرمدره Khorramdarre	————	N	N
خوی Khoy	————	N	N	سبزوار Sabzevar	————	N	N
خوروبیابانک Khur - Biabanak	————	N	N	سندج Sanandaj	————	N	N
کیش Kish	————	N	N	سقز Saqqez	————	N	N
کوه‌رنگ Kuhrang	————	N	N	سراب Sarab	————	N	N
لار Lar	————	N	N	سرخس Saraks	————	————	————
مهاباد Mahabad	————	N	N	سراوان Saravan	————	N	N
ماکو Maku	————	N	N	سرپل‌ذهاب Sarpol Zahab	————	N	N
مراغه Maragheh	————	N	N	سمنان Semnan	————	N	N
مشهد Mashhad	————	N	N	شهرکرد Shahr Kord	————	N	N
مسجدسلیمان Masjed Soleyman	————	N	N	شاهرود Shahrud	————	N	N
میانه Mianeh	————	N	N	شیراز Shiraz	————	N	N
میناب Minab	————	N	N	سیرجان Sirjan	————	N	N
نیشابور Neyshabur	————	N	N	طبس Tabas	————	N	N
نوشهر Nowshahr	————	N	N	تبریز Tabriz	————	N	N
ارومیه Orumiyeh	————	N	N	تکاب Takab	————	————	————

ادامه جدول ۱- نتایج آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف (Kolmogorov Smirnov)، اندرسون-دارلینگ (Anderson Darling) و لیلیفورس (Lilliefors) برای داده‌های سالانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪) (خطوط ممتد: غیرنرمال و N: نرمال)

Table 1- The results of normality tests: ks, ad and lilliefors for annual cloudiness data (Significance level: 95%) (None-normal: solid lines and N: Normal)

نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie	نام ایستگاه Station Name	KS	AD	Lillie
قزوین Qazvin	—	N	N	مهرآباد MehrAbad	—	N	N
قم Qom	—	N	N	شمیرانات Shemiranat	—	N	N
قروه Qorveh	—	N	N	تربت حیدریه Torbat Heydarieh	—	N	N
قوچان Quchan	—	N	N	یاسوج Yasuj	—	N	N
رامهرمز Ramhormoz	—	—	—	یزد Yazd	—	N	N
رامسر Ramsar	—	N	N	زابل Zabol	—	N	N
رشت Rasht	—	N	N	زاهدان Zahedan	—	N	N
روانسر Ravansar	—	N	N	زنجان Zanjan	—	N	N
زرینه Zarneh	—	N	N				

جدول ۲- نتایج آزمون من-کندال برای داده‌های سالانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪)

Table 2- The results of mann-kendall test for annual cloudiness data (Significance level: 95%)

روند کاهشی معنادار Decreasing Trend	فاقد روند No Trend
رامهرمز Ramhormoz	اراک Arak
سرخس Sarakhs	تکاب Takab
کهنوج Kahnuj	رامسر Ramsar
	کاشان Kashan

تحلیل مکانی مقدار سالانه ابرناکی

در تحلیل مکانی متغیرهای اقلیمی دو عامل طول و عرض جغرافیایی دخالت دارند (Asakereh, 2004). ارتباط بین دو عامل طول و عرض جغرافیایی با متغیر ابرناکی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون بررسی گردید. نتایج، گویای رابطه‌ای منفی (۰/۴۲-) بین متغیر ابرناکی و عامل طول جغرافیایی است بطوری که با افزایش طول جغرافیایی از مقدار ابرناکی نیوار ایران کاسته می‌گردد یعنی هر چه از غرب به طرف شرق ایران حرکت کنیم مقدار ابرناکی کاهش می‌یابد، بنابراین هرچه طول جغرافیایی افزایش می‌یابد از مقدار ابرناکی نیوار

ایران کاسته می‌شود. از آنجایی که مسیر ورود سامانه‌های باران‌زا و سامانه‌هایی که حامل رطوبت هستند از سمت غرب کشور است و بنابراین چون عواملی مانند عوامل سینوپتیکی همچون پرفشار جنب حاره‌ای اجازه ورود این سامانه‌های رطوبتی را به مرکز و شرق ایران نمی‌دهند و همچنین بدین دلیل که با عبور از مناطق غربی و حرکت به سمت شرق کشور، بدلیل خشک و بیابانی بودن مرکز ایران، رطوبت حاصل از این سامانه‌های ورودی تخلیه می‌گردد به همین دلیل عموماً در امتداد طول جغرافیایی در ایران از مقدار ابرناکی کاسته می‌شود.

جدول ۳- نتایج آزمون رگرسیون خطی مبتنی بر کمترین مربعات خطا برای داده‌های سالانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪)

Table 3- The results of linear regression using least square error method for annual cloudiness data (Significance Level: 95%)

فقد روند No Trend	فقد روند No Trend	روند افزایشی معنادار Increasing Trend	روند کاهششی معنادار Decreasing Trend	روند کاهششی معنادار Decreasing Trend
نوشهر Nowshahr	آبعلی Abali	اردبیل Ardebil	خاش Khash	آبادان Abadan
ارومیه Orumiyeh	اهر Ahar	سراب Sarab	خرم‌آباد Khorramabad	آباده Abadeh
رشت Rasht	الیگودرز Aligudarz	قم Qom	خرمدره Khorramdarre	خلخال Khalkhal
سنندج Sanandaj	خوی Khoy		خورویبیانک Khur - Biabanak	ابوموسی Abu Musa
سقز Saqqez	بافت Baft		کیش Kish	اهواز Ahvaz
سرپل ذهاب Sarpol Zahab	بم Bam		کوهرنگ Kuhrang	لار Lar
سمنان Semnan	بندرعباس Bandr Abbas		مشهد Mashhad	بابلسر Babolsar
شهرکرد Shahr Kord	بندرآنزلی Bandar Anzali		مسجدسلیمان Masjed Soleyman	بندرماهشهر Bandar Mahshahr
میانه Mianeh	بیرجند Birjand		میناب Minab	بندرلنگه Bandar Lengeh
سیرجان Sirjan	بجنورد Bojnord		نیشابور Neyshabur	بیجار Bijar
تبریز Tabriz	چابهار Chabahar		قزوین Qazvin	بروجن Boroujen
یزد Yazd	اسلام‌آبادغرب Eslamabad Gharb		قروه Qorveh	بروجرد Borujerd
زاهدان Zahedan	فسا Fasa		قوچان Quchan	بوشهر Bushehr
زنجان Zanjan	همدان Hamedan		روانسر Ravansar	دهلران Dehloran
شاهرود Shahrud	ایران‌شهر Iranshahr		سبزوار Sabzevar	درودزن Dorudzan
مهرآباد MehrAbad	جلفا Jolfa		سراوان Saravan	اصفهان Esfahan
شمیرانات Shemiranat	تربت حیدریه Torbat Heydarieh		شیراز Shiraz	فردوس Ferdows
	کرمان Kerman		طیس Tabas	گرگان Gotgan
	کرمانشاه Kermanshah		یاسوج Yasuj	ایلام Ilam
	مهاباد Mahabad		کرج Karaj	جاسک Jask
	ماکو Maku		زابل Zabol	کنگاور Kangavar
	مراغه Maragheh		زرینه Zarineh	کاشمر Kashmar

افزوده می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت عامل عرض جغرافیایی نقشی پررنگ در مقدار ابرناکی نیوار ایران دارد چرا که عرض‌های پایین‌تر

اما ارتباط بین متغیر ابرناکی با عرض جغرافیایی، رابطه‌ای مثبت (۰/۷۵) به دست آمد چنانکه با افزایش عرض جغرافیایی بر مقدار ابرناکی

رطوبتی خلیج فارس، توده‌های سودانی و اقیانوس هند هستند (Alijani, 2016) از مقدار ابرناکی کمتری برخوردارند به طوری که کمترین مقدار ابرناکی سالانه در ایستگاه‌های کهنوج، سراوان، زابل، بندر لنگه، جاسک، جزایر کیش و ابوموسی، ایرانشهر، خاش، زاهدان و میناب بوده است. بررسی آماری داده‌های ابرناکی سالانه در کشور ایران نشان داد، مقدار ابرناکی در ایران ۲۷/۵ درصد است.

در مطالعاتی که توسط (Raispour and Razmi, 2020, Masoudian and Kavyani, 2008) نیز انجام شده است مقدار ابرناکی را ۲۶ و ۲۵ درصد برآورد نموده‌اند. به نظر می‌رسد که این تفاوت ناچیز می‌تواند به دلیل تفاوت در طول دوره‌های آماری و نوع داده‌های مورد استفاده باشد.

آزمون داده‌ها و تعیین روند در مقیاس‌های ماهانه و فصلی

سطح نرمال بودن مقادیر ماهانه ایستگاه‌های مطالعاتی به روش های کولموگروف-اسمیرنوف، لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ در سطح اطمینان ۹۵ درصد مورد آزمون قرار گرفت (که به دلیل حجم زیاد اطلاعات جداول، از ذکر آنها در متن مقاله خودداری گردید). برای مقادیر ماهانه با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف داده‌ها فاقد توزیع نرمال به دست آمد، اما با بکارگیری دو آزمون دیگر یعنی لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ تقریباً در تمام ایستگاه‌ها ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه، آوریل و می از توزیع نرمال برخوردار بودند و ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت، سپتامبر و اکتبر فاقد توزیع نرمال بودند. ماه‌های مارس و نوامبر نیز در برخی ایستگاه‌ها دارای توزیع نرمال و در برخی دیگر فاقد توزیع نرمال بودند. نتایج روند ماهانه با روش رگرسیون خطی بیانگر روند کاهشی در تمامی ایستگاه‌ها برای ماه‌های سرد سال است و در ۱۴ ایستگاه که در جدول ۴ عنوان گردیده، در هیچ یک از ماه‌های سال روند معناداری مشاهده نگردید.

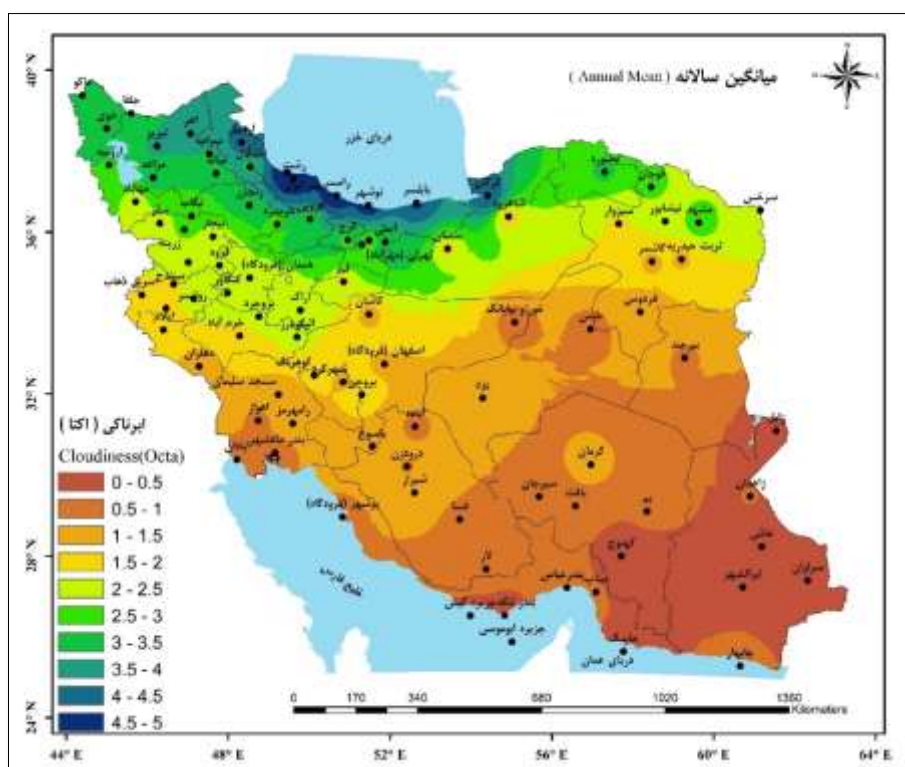
تقریباً در اغلب ایام سال تحت سیطرهٔ پرفشار جنب‌حاره هستند در حالی که مناطقی که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر قرار دارند چون کمتر تحت تاثیر این پرفشار هستند بنابراین شرایط برای ورود توده‌هایی که وارد ایران می‌شوند و با خود رطوبت را به همراه دارند مساعدتر است و به همین خاطر در عرض‌های جغرافیایی بالاتر مقدار ابرناکی بیشتر است. همچنین در ایام سرد سال موج‌های کوتاه جوی مدام وارد ایران شده و سبب ناپایداری و ایجاد ابر و باران می‌شوند. تعداد این موج‌ها از شمال به جنوب و از غرب به شرق کم می‌شود و کمترین مقدار آنها در جنوب شرق می‌باشند، چرا که بادهای غربی کمتر به این منطقه نفوذ می‌کنند (Alijani, 2016).

توزیع سالانه مقدار ابرناکی

از آنجایی که ابرناکی و رطوبت بارزترین و غالب‌ترین ویژگی آب و هوایی در نوار شمالی ایران است (Masoodian, 2003) نقشهٔ سالانه مقدار ابرناکی (شکل ۲) نیز نشان‌دهندهٔ بالاترین مقادیر ابرناکی در حوالی سواحل دریای خزر و در ایستگاه‌های رشت، رامسر، بندر انزلی، نوشهر و بابلسر و سپس در ایستگاه‌های گرگان، اردبیل، اهر، تبریز، سراب و ماکو است. در ایام سرد سال نیز این مناطق محل عبور چرخندهای مهاجر غربی هستند (Rasouli et al., 2013). حتی در فصل تابستان به علت اینکه رودباد جنب‌حاره‌ای در امتداد رشته کوه‌های البرز مستقر می‌شود اما باز هم این نواحی تحت نفوذ بادهای غربی هستند و در نتیجه شرایط برای افزایش مقدار ابرناکی نسبت به دیگر مناطق ایران مساعدتر است (Fallahi Khoshji, et al., 2017). اما با حرکت به سمت جنوب کشور از مقدار و تعداد روزهای ابری کاسته شده به طوری که می‌توان گفت در ایام گرم سال بیش از نیمی از کشور روزهای بدون ابر را تجربه می‌کند. این نواحی با توجه به اینکه کمتر در معرض سامانه‌های مرطوب غربی قرار دارند و گاهی متاثر از منابع

جدول ۴- ایستگاه‌های فاقد روند برای داده‌های ماهانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪)
Table 4- The stations of no trend for monthly cloudiness data (Significance level: 95%)

شمیرانات Shemiranat	تبریز Tabriz	تربت حیدریه Torbat Heydarieh	خوی Khoy	همدان Hamedan	بندرعباس Bandar Abbas	بم Bam
زاهدان Zahedan	سقز Saqqez	نوشهر Nowshahr	میانه Mianeh	مراغه Maragheh	ماکو Maku	مهاباد Mahabad



شکل ۲- پراکنش مکانی مقدار ابرناکی سالانه در ایران طی دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۱)
Figure 2- Spatial distribution of annual cloudiness data in Iran (1991-2021)

این دو است چنانکه با افزایش عرض جغرافیایی بر مقدار ابرناکی نیز افزوده می‌گردد؛ بیشترین مقادیر در ماه‌های سرد سال و دو فصل زمستان و بهار و البته فصل پاییز است چرا که سامانه‌های رطوبتی و باران‌زای بادهای غربی در این ایام در ایران مستقر می‌گردند و با افزایش عرض جغرافیایی میزان اثرپذیری از این سامانه‌های رطوبتی نیز بیشتر می‌گردد.

توزیع ماهانه و فصلی مقادیر ابرناکی

توزیع ماهانه و فصلی مقادیر ابرناکی برای فصل زمستان و طی ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه (شکل ۳) نشان می‌دهد بالاترین مقدار ابرناکی در ایستگاه‌های انزلی، رشت، رامسر، نوشهر و بابل قرار دارد که این امر به واسطه وجود منبع رطوبتی دریای خزر و الگوهای گردشی بزرگ مقیاس مانند پرفشار سیبری، کم‌فشارهای دینامیکی و واچرخندهای مهاجر (Sadeghi et al., 2023) است. بعد از این مناطق، بیشینه ابرناکی در این موقع از سال در نواحی شمال غرب و غرب و در راستای نوار کوهستانی زاگرس است که این امر به دلیل پسروی رودباد جنب‌حاره و ورود بادهای غربی (Masoudian, 2012) و قرارگیری در مسیر توده‌های هوای مدیترانه‌ای (Shojaei Moghadam et al., 2019) می‌باشد.

نتایج آزمون‌های نرمال بودن برای مقادیر فصلی ایستگاه‌ها به روش کولموگروف-اسمیرنوف در هیچ کدام از فصل‌ها توزیع نرمالی را نشان نداد و طبق دو آزمون لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ نیز مقدار ابرناکی تنها در دو فصل زمستان و بهار از توزیع نرمال برخوردار بودند. برای دو فصل زمستان و بهار که از توزیع نرمال برخوردار بودند طبق آزمون رگرسیون خطی، این دو فصل طی دوره مورد مطالعه روند کاهشی معناداری را تجربه کرده‌اند و برای فصل‌های فاقد توزیع نرمال یعنی دو فصل پاییز و فصل تابستان طبق آزمون من-کندل، برای فصل پاییز، روند، کاهشی بوده و در فصل تابستان، هیچ روند معناداری مشاهده نگردید.

تحلیل مکانی مقادیر ماهانه و فصلی ابرناکی

ضریب همبستگی بین عوامل مکانی (طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی) با متغیر ابرناکی برای تمام ماه‌ها و فصل‌های سال محاسبه شد (جدول ۵). مقدار این ضریب در ارتباط با طول جغرافیایی با متغیر ابرناکی در همه ماه‌ها و فصل‌ها، منفی به دست آمد. این بدان معناست که در همه ماه‌ها و فصول سال با افزایش طول جغرافیایی از مقدار ابرناکی کاسته می‌گردد. اما نتایج به دست آمده از ارتباط بین عرض جغرافیایی و مقادیر ماهانه و فصلی ابرناکی حاکی از رابطه مثبت بین

جدول ۵- نتایج آزمون همبستگی پیرسون بین عوامل مکانی و مقدار ماهانه ابرناکی (سطح اطمینان ۹۵٪)

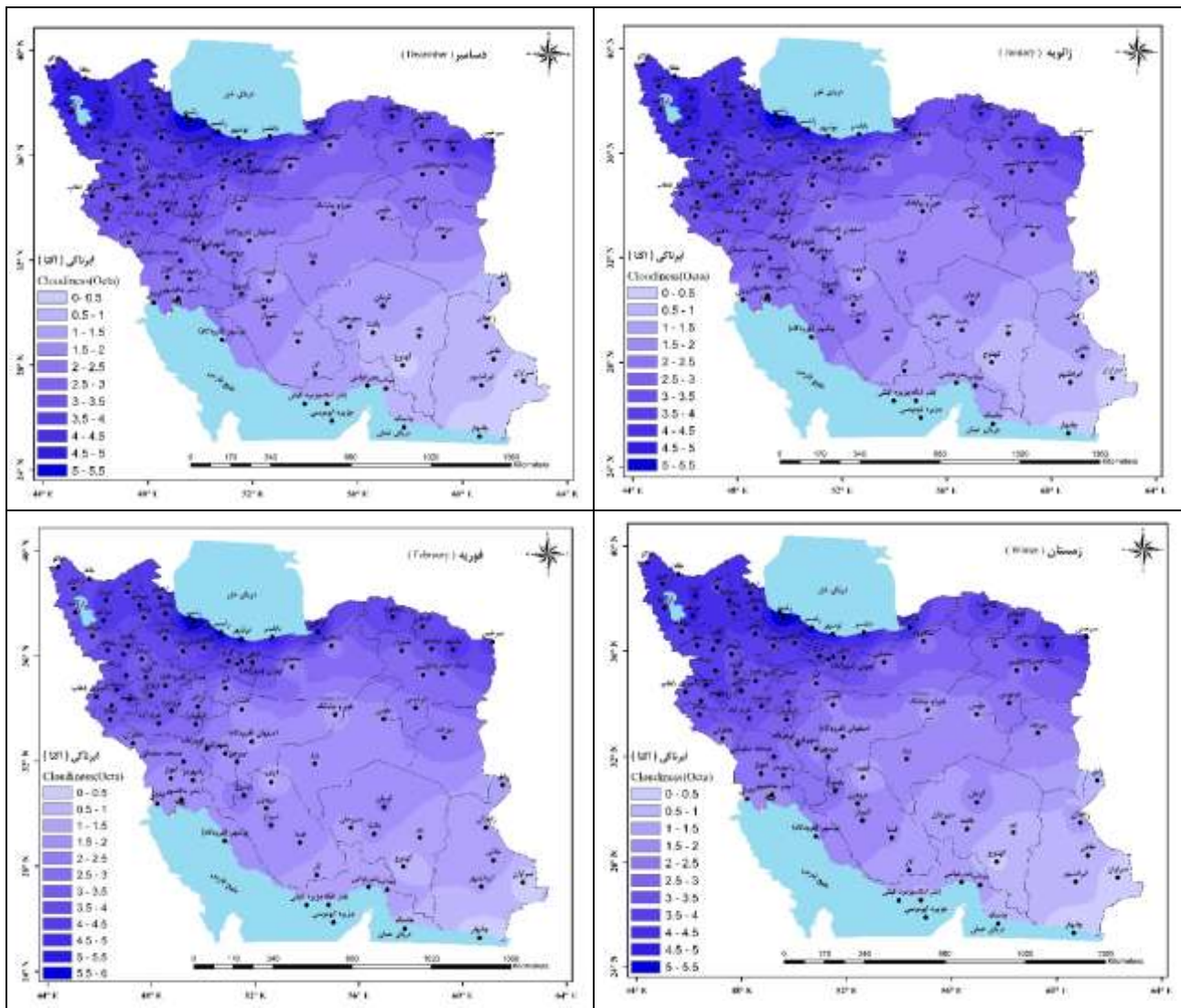
Table 5- The results of pearson correlation for geographical factors and monthly cloudiness data (Significance level: 95%)

عوامل مکانی Geographical Factors	ژانویه Jan	فوریه Feb	مارس Mar	آوریل Apr	مئ May	ژوئن June	ژوئیه July	اوت Aug	سپتامبر Sep	اکتبر Oct	نوامبر Nov	دسامبر Dec	زمستان Winter	بهار Spring	تابستان Summer	پاییز Fall
طول جغرافیایی Longitude	-0.6	-0.44	-0.37	-0.52	-0.48	-0.12	-0.07	-0.09	-0.13	-0.51	-0.59	-0.63	-0.56	-0.46	-0.1	-0.43
عرض جغرافیایی Latitude	0.83	0.8	0.84	0.88	0.9	0.59	0.24	0.18	0.36	0.76	0.84	0.87	0.84	0.89	0.34	0.69

در غرب ایران، بادهای غربی در سطوح میانی جو با حرکت نصف النهاری با ورود تاوه قطبی تا شمال غربی و فرود عمیق در شرق مدیترانه موجب حرکت‌های صعودی شدید و ناپایداری در سطح زمین می‌شوند و در این شرایط پراارتفاع جنب‌حاره در جنوب ایران و عمدتاً در شرق عربستان مستقر است (Mansouri and Dustan, 2019). بیشترین مقادیر ابرناکی منطقه جنوب و جنوب‌غرب کشور نیز در همین فصل سال یعنی فصل زمستان می‌باشد که دلیل آن را می‌توان فعالیت سامانه‌های سودانی (Lashkari and Mohammadi, 2022) در نتیجه حرکت شرق‌سوی پرفشار عربستان و فرارفت رطوبت به درون سامانه‌های سودانی (Lashkari and Mohammadi, 2015) در این موقع از سال دانست. کمترین مقدار ابرناکی در این فصل سال (زمستان) همانطور که از نقشه‌ها قابل مشاهده است در مناطق جنوب و جنوب-شرق کشور است. بیشترین مقدار ابرناکی این مناطق در فصل زمستان و در مرتبه دوم در فصل بهار اتفاق می‌افتد که این امر را می‌توان به استقرار واپرخند عربستان در ساحل شرقی شبه جزیره عربستان و گسترش شمالی- جنوبی ناوه مدیترانه در شرق مدیترانه (Lashkari and Jafari, 2021) نسبت داد که قرارگیری این دو سامانه موجب گسترش کم‌فشار سودان و تزریق رطوبت از این سامانه به جنوب و جنوب‌شرق کشور می‌گردد.

بررسی مقادیر ابرناکی در ماه‌های فصل بهار یعنی ماه‌های مارس، آوریل و می (شکل ۴) بیانگر بیشینه ابرناکی در ایستگاه‌های جنوبی و جنوب‌غربی دریای خزر یعنی ایستگاه‌های رامسر، رشت، انزلی، نوشهر و بابلسر و همچنین یک مرکز بیشینه در شرق خزر یعنی در ایستگاه گرگان است. با تشکیل یک مرکز گردش چرخندی بر روی این مناطق و عمیق شدن یک ناوه برون‌حاره و تحریک شرایط همگرایی محلی به

شکل دینامیکی (Khorshiddoust et al., 2016) بیشترین مقادیر ابرناکی و بارش در این نواحی فراهم می‌گردد. بررسی نقشه‌های ماهانه نشان می‌دهد در ماه مارس مقدار ابرناکی ایستگاه مشهد بیش از ایستگاه‌های شمال غرب کشور است. علت این امر را می‌توان با گسترش شمال‌سوی کم‌فشار سودانی به موازات حرکت شرق‌سوی پرفشار سبیری و تشکیل ناوه عمیق در غرب خاورمیانه از یک طرف و فرارفت هوای گرم و مرطوب به عرض‌های شمالی و تداوم فرارفت رطوبت از منابع رطوبتی خلیج فارس و دریای عمان از طرف دیگر (Bijandi et al., 2022) مرتبط دانست. اما طی ماه‌های آوریل و می به ترتیب ایستگاه‌های واقع در سواحل دریای خزر و سپس برخی ایستگاه‌های واقع در شمال غرب شامل ایستگاه‌های اردبیل، اهر، سراب و تبریز دارای بیشینه ابرناکی هستند. بعد از این مناطق، ایستگاه مشهد و سپس ایستگاه‌های مراغه، ماکو و خلخال قرار دارند. شکل‌گیری مرکز همگرایی ناشی از استقرار مراکز کم‌فشار در تقابل با زبانه‌های سرد کم‌فشار جنب قطبی و پرفشار سبیری و شکل‌گیری میدان جبهه‌زایی با همراهی جریانات صعودی تراز بالایی جو (Haghighi, et al., 2017) را می‌توان از عوامل تشکیل و تشدید ابرناکی و بارش این فصل از سال در این مناطق دانست. از سویی دیگر با توجه به اینکه فصل بهار، زمان گذار از الگوهای زمستانی به تابستانی می‌باشد و هوای نزدیک به سطح زمین در حال گرم شدن است، از این‌رو شرایط جوی برای رخداد همرفت مساعد است و به همین خاطر بیشترین مقدار همرفت در این در مناطق غرب و شمال‌غرب کشور و سواحل میانی دریای خزر اتفاق می‌افتد (Bodghjamali et al., 2020) که همین عامل همرفت، خود عامل مهمی در تشکیل ابر و وقوع بارش در فصل بهار در این نواحی می‌باشد.



شکل ۳- پراکنش مکانی مقدار ابرناکی ماهانه و فصلی (دسامبر، ژانویه، فوریه، زمستان) در ایران طی دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۱)

Figure 3- Spatial distribution of monthly and seasonal cloudiness data (december, january, february, winter) in Iran (1991-2021)

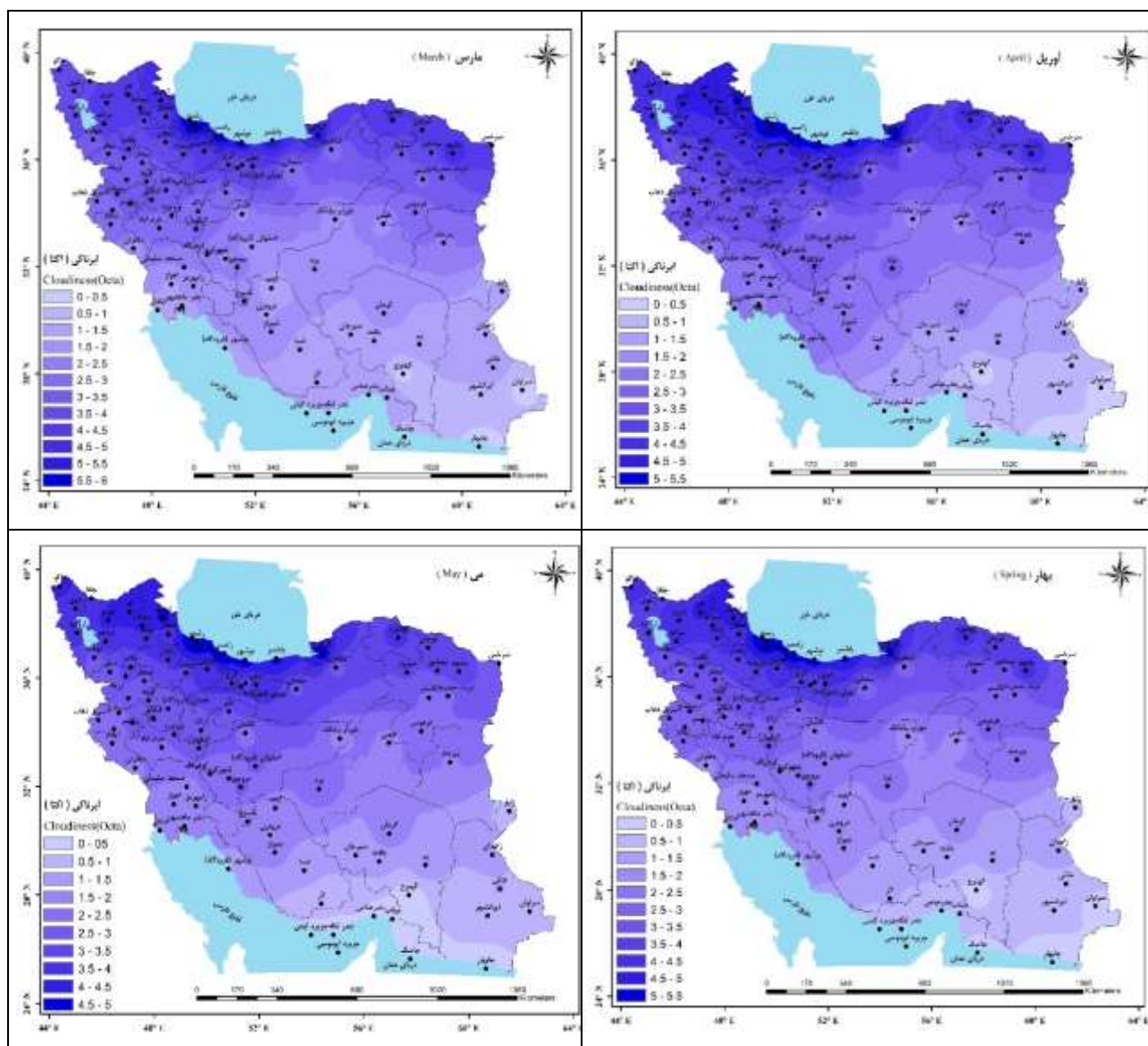
های اردبیل و اهر قابل مشاهده است. در این مناطق، در دوره گرم سال، به دلیل نقش مهم دو فرود دریای سیاه و دریای مدیترانه و سازوکارهای صعود بویژه وزش تاوایی مثبت در قسمت جلوی این دو فرود و همرفت حرارتی در این قلمرو (Halabian and Shabankari, 2012) موجبات ایجاد ابرناکی و بارش فراهم می‌گردد. همچنین یک هسته بیشینه ابرناکی در جنوب شرق (چابهار) و جنوب (بندرعباس) کشور نیز در فصل تابستان قابل ذکر است. با گسترش کم‌فشار پاکستان و محدود شدن حاکمیت پرفشار آزر در جهت غربی- شرقی و امکان ورود رطوبت از دریای عرب و دریای عمان و حرکت غرب‌سوی آن به سمت این نواحی (Khosravi et al., 2019) شرایط برای تشکیل ابر و بارش در این مناطق فراهم می‌گردد. در سایر مناطق کشور در این فصل سال به دلیل

در شکل ۵ که شامل نقشه‌های ماه‌های فصل تابستان (ژوئن، ژوئیه، اوت) است، بیشترین مقدار ابرناکی در مناطق جنوب و جنوب غربی سواحل دریای خزر در ایستگاه‌های رامسر، نوشهر، رشت، بابلسر و انزلی قابل مشاهده است. در این موقع از سال (فصل تابستان)، صعودهای همرفتی که بر اساس امواج غربی و رطوبت دریای مدیترانه به سواحل دریای خزر آورده می‌شوند (Hakimdoust et al., 2017) می‌تواند عامل اصلی بیشینه ابرناکی و بارش در این مناطق باشد و در ایستگاه گرگان، تضعیف پرفشار جنب‌حاره در نتیجه حرکات همرفتی بالارونده در این فصل سال (Akbari and Nodehi, 2015) را می‌توان با ابرناکی زیاد این منطقه مرتبط دانست. بعد از ایستگاه‌های شمالی، بیشترین مقدار ابرناکی در ایستگاه‌های شمال غرب کشور بویژه ایستگاه

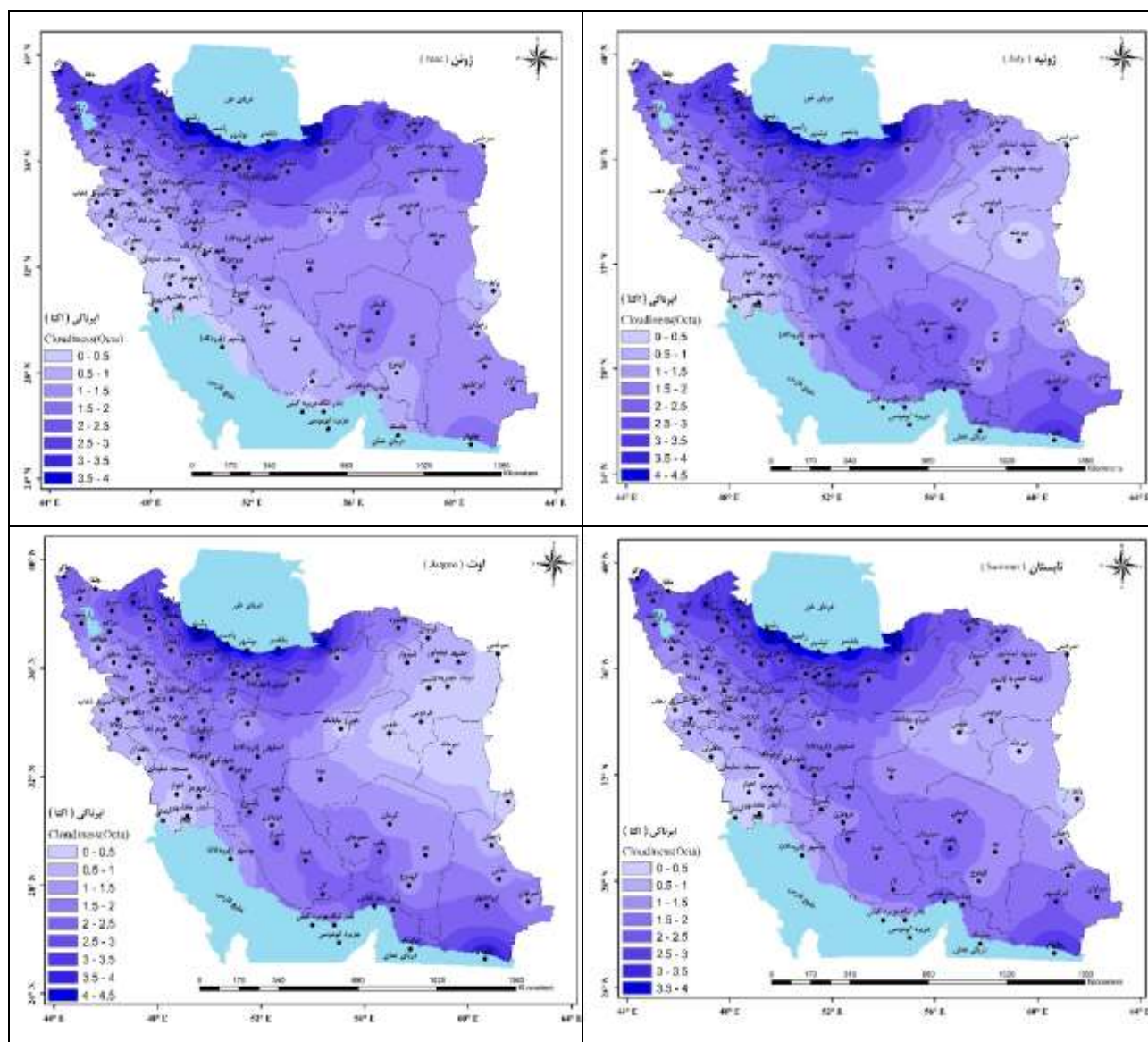
همرفت وزشی ناشی از وزش بادهای سرد سیبری از روی دریای خزر در این فصل از سال است (Alijani, 2016). هسته دیگر بیشینه ابرناکی در ایستگاه گرگان به دلیل افزایش اختلاف درجه حرارت سطح دریا و هوا (Roradeh and Safarrad, 2017) و سپس در ایستگاه‌های شمال غرب کشور از جمله اردبیل، اهر، ماکو و تبریز قرار دارد. در فصل پاییز با کاهش تدریجی دما بتدریج بر تعداد روزهای ابری و وقوع بارش ها از سمت غرب و شمال غرب کشور افزوده می‌شود که آن را می‌توان با فعالیت رودباد قطبی و تغییرات نصف‌النهاری آن مرتبط دانست که در مسیر خود باعث انتقال رطوبت از دریای مدیترانه به این مناطق می‌گردد (Sepadeh et al., 2017).

حاکمیت پرفشار جنب‌خارهای، امکان تشکیل ابر و بارش فراهم نمی‌شود (Karimi et al., 2021).

نقشه ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر (فصل پاییز) (شکل ۶) حاکی از بیشترین مقدار ابرناکی در جنوب و جنوب غربی سواحل خزر در ایستگاه‌های انزلی، رشت، رامسر، نوشهر و بابل‌سر است. تشکیل گردان فشار بر روی دریای خزر به صورت زبانه‌هایی از پرفشار سیبری و پرفشار دریای سیاه که موجب هدایت جریانات شمالی به سمت سواحل جنوبی خزر می‌شوند (Chehreara Ziyabari and Safarrad, 2019) عوامل اصلی ایجاد ابر و بارش در این موقع از سال در این مناطق است. بنابراین علت اصلی افزایش ابرناکی در این ماه‌ها (فصل پاییز) مکانیسم



شکل ۴- پراکنش مکانی مقدار ابرناکی ماهانه و فصلی (مارس، آوریل، می، بهار) در ایران طی دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۱)
Figure 4- Spatial distribution of monthly and seasonal cloudiness data (March, April, May, Spring) in Iran (1991-2021)



شکل ۵- پراکنش مکانی مقدار ابرناکی ماهانه و فصلی (ژوئن، ژوئیه، اوت، تابستان) در ایران طی دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۱)

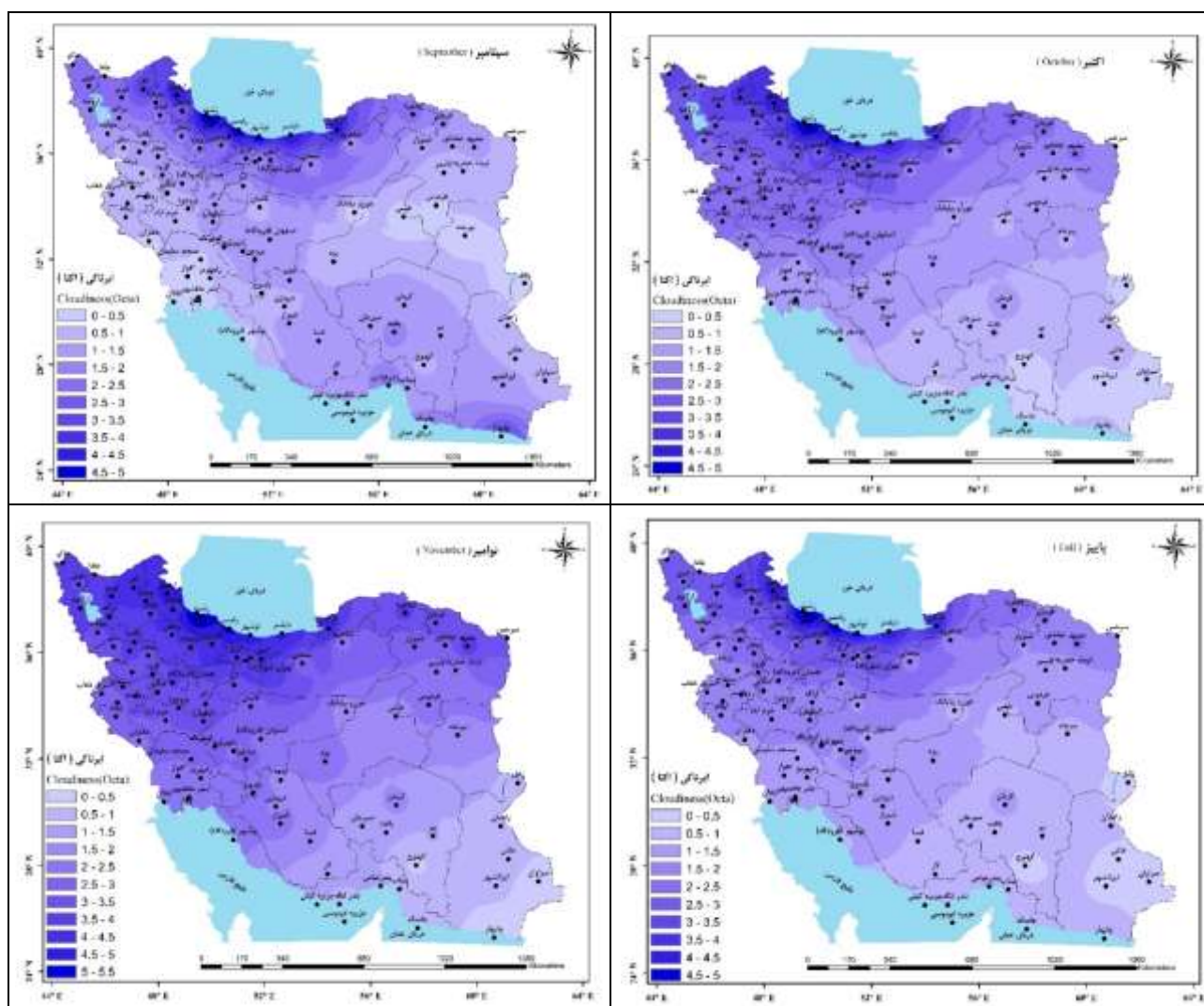
Figure 5- Spatial distribution of monthly and seasonal cloudiness data (June, July, August, Summer) in Iran (1991-2021)

طی بازه زمانی ۱۹۹۱/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۱/۱۲/۳۱ مورد استفاده گردید. جهت تشخیص نرمال بودن داده‌ها، آزمون‌های مختلف آماری از جمله آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف، لیلیفورس و اندرسون-دارلینگ در سه مقیاس زمانی سالانه، ماهانه و فصلی به کار گرفته شد و سپس روند داده‌ها بر اساس روش پارامتری رگرسیون خطی مبتنی بر کمترین مربعات خطا و روش ناپارامتری من-کندال مورد آزمون قرار گرفت. نتایج سالانه بر اساس آزمون پارامتری رگرسیون خطی بیانگر روند کاهشی در ۴۷ ایستگاه و روند افزایشی تنها در ۳ ایستگاه است، و بر اساس آزمون ناپارامتری من-کندال ۳ ایستگاه دارای روند کاهشی و در سایر ایستگاه‌ها طی دو آزمون تعیین روند، هیچ روند معناداری مشاهده نگردید.

مناطق جنوب و جنوب شرق در این فصل سال با کمترین مقدار ابرناکی همراه هستند که این امر می‌تواند به دلیل استیلای پرفشار جنب‌حاره‌ای باشد که از ورود جریان‌های بادهای غربی عرض‌های بالاتر و همچنین از ورود جریان‌های سودانی که می‌تواند منجر به بارش در این مناطق شود، جلوگیری نماید (Mirian et al., 2023).

نتیجه‌گیری

هدف از پژوهش حاضر، بررسی تغییرات زمانی و مکانی ابرناکی در ایران است. برای این منظور از داده‌های ابرناکی تعداد ۹۳ ایستگاه که به لحاظ طول دوره آماری و صحت داده‌ها مناسب تشخیص داده شد،



شکل ۶- پراکنش مکانی مقدار ابرناکی ماهانه و فصلی (سپتامبر، اکتبر، نوامبر، پاییز) در ایران طی دوره آماری (۱۹۹۱-۲۰۲۱)

Figure 6- Spatial distribution of Monthly and Seasonal Cloudiness Data (September, October, November, Fall) in Iran (1991-2021)

بیرونی که سامانه‌هایی خارج از محدوده جغرافیایی ایران هستند و در ایام مختلف سال، اقلیم ایران را تحت تاثیر قرار می‌دهند، در تغییرات زمانی ابرناکی دخالت دارند. بنابراین ابرناکی به عنوان متغیری که به طور مستقیم با سایر متغیرهای اقلیمی در ارتباط است و کاهش یا افزایش آن، موجب می شود تا مقادیر متغیرهایی همچون دما، بارش و رطوبت نیز دچار تغییر گردد. لذا مطالعه این متغیر مهم آب و هوایی و بررسی تغییرات آن حائز اهمیت بسیار است و بویژه در مباحث خشکسالی‌ها و بحران‌های آبی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است.

سپاسگزاری

از آقای آرمان جاهدی، دانشجوی دکترای اقلیم‌شناسی دانشگاه

نتایج ماهانه و فصلی نیز حکایت از روند کاهشی معنادار در تمام ایستگاه‌ها در ماه‌های سرد سال و در فصل‌های زمستان و بهار و پاییز دارد. بررسی ارتباط بین عوامل مکانی طول و عرض جغرافیایی با متغیر ابرناکی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون نیز حاکی از همبستگی منفی با طول جغرافیایی و همبستگی مثبت با عرض جغرافیایی دارد و این امر نشانگر تفاوت مکانی زیاد مقدار ابرناکی در ایران است. در مجموع می‌توان گفت عوامل مکانی (طول و عرض جغرافیایی) به عنوان عوامل داخلی و سامانه‌های آب و هوایی همچون پرفشار سيبري، پرفشار جنب‌حاره‌ای، سامانه بادهای غربی و رطوبت حاصل از دریاهای عمان، هند و خلیج فارس و گاها دریای سرخ به عنوان عوامل بیرونی مهمترین عوامل موثر در چگونگی و میزان تغییرات ابرناکی در ایران هستند. در واقع، عوامل داخلی در تغییرات مکانی ابرناکی و عوامل

منابع

- 1- Abakumova, G.M., Feigelson, E.M., Russak, V., & Stadnik, V.V. (1996). Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the former Soviet Union. *Journal of Climate*, 9(6), 1319–1327. <http://www.jstor.org/stable/26201319>
- 2- Ahmadi, M., Ahmadi, H., & Dadashiroudbari, A. (2018). Assessment of trends and spatial pattern seasonal and annual cloudiness in Iran. *Natural Environmental Hazards*, 7(15), 239-256. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22111/JNEH.2017.3200>.
- 3- Ahmadi, M., Dadashiroudbari, A., & Ahmadi, H. (2019). Spatiotemporal variations of total cloud cover and cloud optical thickness in Iran. *The Earth and Space Physics*, 44(4), 145-164. <http://doi.org/10.22059/jesphys.2018.248041.1006956>
- 4- Ahmadi, M., Dadashiroudbari, A., Nassiri Khuzani, B., & Akbari Azirani, T. (2020). Seasonal changes of liquid clouds in Iran based on data received from MODIS sensor of TERRA satellite. *Scientific - Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 29(113), 7-19. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22131/sepehr.2020.40467>
- 5- Ahmadi, M., Dadashiroudbari, A., Akbari-Azirani, T., & Nasiri-Khuzani, B. (2020). Seasonal and annual segregation of liquid water and ice clouds in Iran and their relation to geographic components and precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 140(3-4), 963–982. <http://doi.org/10.1007/s00704-020-03131-5>
- 6- Akbari, M., & Nodehi, V. (2015). Analysis of trends in annual and summer rainfall of Golestan Province. *Geographical Planning of Space*, 5(17), 141-150. (In Persian with English abstract)
- 7- Alijani, B. (2016). *Climate of Iran*. Tehran, Payam Noor University.
- 8- Alipour, Y., Bayat, N., & Osanlu, A. (2022). Detection and analysis of temperature trend at the 1000 hPa level in Iran. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 31(121), 191-203. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2022.252778>.
- 9- Asakereh, H. (2004). Spatial change modeling of climatic data (a case study: annual precipitation of Esfahan Province. *Geographical Research*, 19(3(74)), 213-231. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/29965/en>
- 10- Asakereh, H. (2009). Arima modeling for Tabriz city annual temperature. *Geographical Research*, 24(2 (93)), 3-24. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/29858/en>.
- 11- Asakereh, H., Masoodian, S.A., & Tarkarani, F. (2021). A discrimination of roles of internal and external factors on the decadal variation of annual precipitation in Iran over recent four decades (1975-2016). *Physical Geography Research Quarterly*, 53(1), 91-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.304776.1007529>
- 12- Asakereh, H., & Ashrafi, S. (2023). An investigation into trends in frequency and proportion of different durations of various types of extreme precipitation in Iran. *Meteorological Applications*, 30(1): e2117. <https://doi.org/10.1002/met.2117>
- 13- Asamoah, M., & Ansah-Mensah, K. (2020). Temporal description of annual temperature and rainfall in the Bawku area of Ghana. *Advances in Meteorology*. <https://doi.org/10.1155/2020/3402178>
- 14- Barati, G., Ahmadi, M., Mirzaie, E., & Pazhooh, F. (2017). On the analysis of relationship between night cloudiness and warm nights in central Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 7(2), 1-11. (In Persian with English abstract)
- 15- Bijandi, M., Daryabari, S.J., Ranjbar Saadat Abadi, A., & Arbabisabzevari, A. (2022). Investigation of extreme precipitation events over northeastern Iran during the period 2001-2020. *Meteorology and Atmospheric Science*, 4(4), 284-307. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jmas.2022.347475.1176>
- 16- Bodghjamali, J., Javanmard, S., & Tajbakhsh, S. (2020). The estimation of type and amount rainfall using TMI Sensor of TRMM Satellite. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 38-56. (In Persian with English abstract)
- 17- Chehreara Ziyabari, T., & Safarrad, T. (2019). Presenting a new index to study heavy and widespread precipitations at southern coast of the Caspian sea during fall. *Geography and Regional Development*, 17(1), 283-306. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/geography.v17i1.72293>.
- 18- Danso, D.K., Anquetin, S., Diedhiou, A., & Adamou, R. (2020). Cloudiness information services for solar energy management in west Africa. *Atmosphere*, 11(8), 857, 1-18. <https://doi.org/10.3390/atmos11080857>
- 19- DelSole, T., & Tippet, M. (2022). *Statistical Methods for Climate Scientists*. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/9781108659055>
- 20- Dutton, E.G., Stone, R.S., Nelson, D.W., & Mendonca, B.G. (1991). Recent interannual variations in solar radiation,

- cloudiness, and surface temperature at the south pole. *Journal of Climate*, 4(8), 848-858. <http://www.jstor.org/stable/26196432>
- 21- Fallahi Khoshji, M., Alijani, B., Hejazizadeh, Z., & Naserzadeeh, M.H. (2017). Spatial patterns of changes in frequency of occurrence and intensity of Pluvial clouds (lower atmosphere) in Iran. *Natural Environment Hazards*, 6(13), 1-14. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/259166/en>
- 22- Fotouhi firoozabad, F., & Malekinejad, H. (2020). Analysis and zonation of maximum 24-hour rainfall of Iran using wakeby distribution and geostatistic technique. *Desert Management*, 7(14), 75-92. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38477>.
- 23- Frotan, M., & Zeynali, B. (2023). Simultaneous effect of NAO and AMO remote bonding indices on temperature and precipitation variability of cities adjacent to Sabalan. *Environmental Science Studies*, 8(1), 5857-5868. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jess.2022.345519.1802>
- 24- Ghasemifar, E., Farajzadeh, M., Ghavidel Rahimi, Y., & Ali-Akbari Bidokhti, A.A. (2018). Analysis of spatiotemporal variations of cloud fraction based on Geographic characteristics in Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(1), 103-124. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22059/jesphys.2017.60302>
- 25- Haghighi, E., Gholizadeh, M. H., Doostkamian, M., & Ghaderi, F. (2017). Nature and structure of the atmospheric circulation in pervasive rains of spring, Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(3), 523-539. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.218909.1006955>
- 26- Halabian, A.H., & Shabankari, M. (2012). The role of subtropical high pressure in the spatial daily precipitation distribution in Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 1(1), 1-21.
- 27- Hakimdoust, S.A., Pourzeidi, A.M., & Gerami, M.S. (2017). Showers spatial analysis system in the province Maandaeen in geographic information system (GIS). *Geographical Data*, 26(102), 191-203. (In Persian). <https://sid.ir/paper/253261/en>
- 28- Hatami Bahmanbeiglou, Kh., & Movahedi, S. (2018). Seasonal and monthly identification of cloudiness in Iran using cloud product of MODIS/Terra Satellite. *Geography and Development*, 16(50), 211-230. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22111/gdij.2018.3574>
- 29- Hejazizadeh, Z., Toulabi Nejad, M., Rahimi, A., Bazmi, N., & Bosak, A. (2017). Modeling of spatio-temporal of albedo over Iran. *Applied researches in Geographical Sciences*, 17(47), 1-17. (In Persian)
- 30- Jing Lin, Ng., Yap, S. Y., Huang, Y. F., Farhana Md Noh, N. I., Al-Mansob, R., & Razman, R. (2020). Investigation of the best fit probability distribution for annual maximum rainfall in Kelantan River Basin. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*. Volume 476, 2nd International Conference on Civil & Environmental Engineering, Langkawi, Kedah, Malaysia, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012118>
- 31- Karimi, M., Heidari, S., & Rafati, S. (2021). The trend of atmospheric water cycle components (precipitation and precipitable water) in catchments of Iran. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(2) :33-54. (In Persian with English abstract)
- 32- Kavyani, M.R., & Alijani, B. (2012). *Basics of Climatology*. Tehran, Samt.
- 33- 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. *Natural Environmental Hazards*, 5(8), 53-82. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/jneh.2016.2783>
- 34- Khosravi, M., Shoja, F., & Pakbaz, H. (2019). A survey on the of the summer precipitation events moisture supply resources of Southeast of Iran. *Water Resources Engineering*, 12(41), 127-144. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/169612/en>.
- 35- Ke-biao, M., Zijin, Y., Zhiyuan, Z., Tongren, X., Xinyi, S., & Chunyu, G. (2019). Changes in global cloud cover based on remote sensing data from 2003 to 2012. *Chinese Geographical Science*, 20, 306-315. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1030-6>
- 36- Kejna, M., Przybylak, P., & Arazny, A. (2012). The influence of cloudiness and synoptic situations on the solar radiation balance in the area of KaffiØyra in the summer seasons 2010-2011. *Bulletin of Geography, Physical Geography*, 5(1), 77-95. <https://doi.org/10.2478/v10250-012-0005-6>
- 37- Kejna, M., Uscka-Kowalkowska, J., & Kejna, P. (2021). The influence of cloudiness and atmospheric circulation on radiation balance and its components. *Theoretical and Applied Climatology*, 44(3-4), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03570-8>
- 38- Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2015). The role of Saudi Arabian sub-tropical high pressure on the rainfall systems on south and southwest Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 47(1), 73-90. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.53679>.
- 39- Lashkari, H., & Jafari, M. (2021). Synoptic patterns that determine the trajectory of precipitation systems of Sudanese origin. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8(1) :55-78. (In Persian)
- 40- Lashkari, H., & Mohammadi, F. (2022). Synoptic analysis of the changes trend of the share of systems due to the

- Sudan low in the cold period of the Persian Gulf coast during 1976-2017. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(3): 1-18. (In Persian)
- 41- Latif, M. (2011). Uncertainty in climate change projections. *Geochemical Exploration*, 110, 1-7.
- 42- Lolis, C.J. (2009). Winter cloudiness variability in the Mediterranean region and its connection to atmospheric circulation features. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 357-373. <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0046-0>
- 43- Malekinejad, H., Solaimanimotlagh, M., Jaedaei, A., & Shaterabshouri, S. (2012). Analysis of the precipitation and drought trend variations using Mann-Kendall and Sen Tests in Tehran Province. *Nivar*, 29(80-81), 43-54. (In Persian with English abstract)
- 44- Mansouri, Sh., & Dustan, R. (2019). Atmospheric patterns of the continuation of rainfall in the west of Iran. *Physical Geography Quarterly*, 12, 43, 2019, 141-159. (In Persian)
- 45- Masoudian, S.A. (2003). Climatic Regions of IRAN. *Geography and Development*, 1(2), 5-20. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/395345/en>
- 46- Masoudian, A., & Kavyani, M.R. (2008). *Climatology of Iran*. Isfahan, Isfahan University.
- 47- Masoudian, A. (2012). *The climate of Iran*. Mashhad, Sharia Toos.
- 48- Masoodian, S.A. (2022). Asfezary National Gridded Daily Precipitation Data Base (Version 3). *Geography and Development*, 20(69), 107-127. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/gdij.2022.7277>
- 49- Mehta, L., Adam, H.N., & Srivastava, S. (2019). Unpacking uncertainty and climate change from 'above' and 'below'. *Regional Environment Change*, 19, 1529-1532. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01539-y>
- 50- Memarian, M.H., & Daman Afshan, M. (2016). Evaluation of cloudiness prediction resulting from WRF model. *Earth and Space Physics*, 42(1), 183-196. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22059/jesphys.2016.54494>.
- 51- Mirian, M., Karampur, M., Moradi, M., Ghaemi, H., & Nasiri, B. (2023). Analysis of statistics and anomalies of 50-year rainfall of Iran's satellite stations (period 1960-2010). *Applied Research of Geographic Sciences (Geographical Sciences)*, 23(68), 243-327. (In Persian with English abstract)
- 52- Mirmousavi, S.H., Jalali, M., Raispour, K., & Jahedi, A. (2022). Analysis of the trend of snowmelt changes in Iran and its impact ability from changes in the Mediterranean wave of westerly winds. *Natural Environmental Hazards*, 11(34), 101-126. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/JNEH.2022.39601.1839>
- 53- Mousavi Baygi, M., & Ashraf, B. (2011). Identification of low cloudiness areas to mapping of regions with high radiation across the country. *Water and Soil*, 25(3), 665-675. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9701>.
- 54- Ng, J.L., Yap, S.Y., Huang, Y.F., Noh, N., Al-Mansob, R.A., & Razman, R. (2020). Investigation of the best fit probability distribution for annual maximum rainfall in Kelantan River Basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 476. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012118>
- 55- Ohring, G., & Clapp, Ph. (1980). The effect of changes in cloud amount on net radiation at the top of the atmosphere. *Atmospheric Sciences*, 37(2), 447-454. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<0447: TEOCIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<0447: TEOCIC>2.0.CO;2)
- 56- 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. <https://doi.org/10.30488/ccr.2021.320407.1066>. (In Persian with English abstract)
- 57- Pyrgou, A., Santamouris, M., & Livada, I. (2019). Spatiotemporal analysis of diurnal temperature range: effect of urbanization, cloud cover, solar radiation, and precipitation. *Climate*, 7(7), 89. <https://doi.org/10.3390/cli7070089>
- 58- Raispour, K., & Razmi, R. (2020). Estimation of cloudiness in the atmosphere of Iran using multi-angle imaging spectroradiometer (MISR). *Iran-Water Resources Research*, 16(3), 257-271. (In Persian with English abstract)
- 59- Rasouli, A.A., Jahanbakhsh, S., & Ghasemi, A.R. (2013). Investigation of spatial and temporal variations of cloud cover in Iran. *Geographical Research*, 28(3), 85-101. (In Persian)
- 60- Rezaei, M., & Ghavidel Rahimi, Y. (2016). Analysis of the effect of north Atlantic and Mediterranean Oscillation teleconnection patterns on variations of cloudiness during winter season in Iran. *Researches in Earth Sciences*, 7(1), 1-15. (In Persian with English abstract)
- 61- Roradeh, H., & Safarrad, T. (2017). Analysis of Sea-air Temperature Difference on Regional Heavy Precipitation in the Southern Coasts of Caspian Sea during Fall. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(1), 71-83. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.61580>.
- 62- Russak, V. (2009). Changes in solar radiation and their influence on temperature trend in Estonia (1955–2007). *Geophysical Research*, 114(1), 1-6. <https://doi.org/10.1029/2008JD010613>
- 63- Sadeghi, H., Mohammadi, H., Shamsipour, A.A., & Karimi, M. (2023). Climatic zoning of the southern coastline of the Caspian Sea using multivariate statistical methods. *Geography and Environmental Planning*, 34(2), 55-74. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22108/gep.2022.127922.1409>
- 64- Sahraiyani, F., Jovanmard, S., Bastan Fard, B., & Sabetghadam, S. (2014). *Investigation of the spatial and temporal distribution of cloud cover in the Iranian region during the statistical period of 1981-2010*, The 5th regional climate

- change conference, Tehran, 1-12. <https://civilica.com/doc/557318>. (In Persian)
- 65- Schiffer, R.A., & Rossow, W.B. (1983). The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP): The First Project of the World Climate Research Programme, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64(7), 779-784. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-64.7.779>
- 66- Schneider, Stephen H. (1972). Cloudiness as a global climatic feedback mechanism: the effects on the radiation balance and surface temperature of variations in cloudiness. *Atmospheric Sciences*, 29(8), 1413-1422. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1972\)029<1413:CAAGCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1972)029<1413:CAAGCF>2.0.CO;2)
- 67- Sepadeh, D., Salahi, B., Alijani, B., & Zeynali, B. (2021). A study of the effect of the polar Jet stream on the precipitation of the cold season in Iran. *Meteorology and Atmospheric Science*, 4(3), 178-192. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jmas.2022.342496.1174>.
- 68- Shariepour, Z., & Aliakbari Bidokhti, A. (2011). The effects of cloudiness and total ozone on UV-B radiation in Esfahan region. *Iranian Journal of Geophysics*, 5(4), 74-88. (In Persian with English abstract)
- 69- Sharifian, H., & Hazarjaribi, A. (2008). *The Principles and Operations of Weather and Climatology from the Perspective of Agriculture*. Sabevar, Azhand.
- 70- Shojaei Moghadam, R., Nasiri, B., & Tahmasebipour, N. (2019). Investigation and analysis of cycles and spatial correlation model of Iranian monthly rainfalls. *Geographical Sciences*, 18(51), 235-251. <https://sid.ir/paper/102313/en>. (In Persian with English abstract)
- 71- Stone, R.S., Dutton, G.E., & DeLuisi, J.J. (1989). Surface radiation and temperature variations associated with cloudiness at the South Pole. *Antarctic Journal*, 24, 230-232.
- 72- Tali, PA., Nanda, AA., & Bhat, MM. (2021). Seasonal Spatio-Temporal Variability in Temperature over North Kashmir Himalayas Using Sen Slope and Mann-Kendall Test. *Climatology Weather Forecast*. Vol. 9 Iss. 5 No.288
- 73- Wendler, G., Moore, B., Hartmann, B., Stuefer, M., & Flint, R. (2004). Effects of multiple reflection and albedo on the net radiation in the pack ice zones of Antarctica. *Geophysical Research: Atmospheres*, 109(6), 1-8. <https://doi.org/10.1029/2003JD003927>
- 74- Wilks, D.S. (2019). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Publisher Elsevier. 4th Edition.
- 75- World Meteorological Organization (WMO). (2008). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Seventh edition, No. 8, Part I: Measurement of Meteorological Variables, Chapter 15: Observation of Clouds. <https://doi.org/10.25607/OBP-1528>
- 76- Zarfeshani, A., & Jahangir, M. H. (2021). The Isfahan values of temperature and precipitation forecast based on two fine scale models Lars_WG and SDSM and Artificial Neural Network Method. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 38-49. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.20087942.1400.15.1.4.4>
- 77- Zhang, X., Liang, S., Wild, M., & Jiang, B. (2015). Analysis of surface incident shortwave radiation from four satellite products. *Remote Sensing of Environment*, 165, 186-202. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.015>



Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN

A. Yahyavi Dizaj¹, T. Akbari Azirani^{ID 2*}, Sh. Khaledi³, Kh. Javan⁴

Received: 09-07-2023

Revised: 03-08-2023

Accepted: 08-08-2023

Available Online: 09-08-2023

How to cite this article:

Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, Sh., & Javan, Kh. (2023). Seasonal analysis of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological elements in IRAN. *Journal of Water and Soil*, 37(4), 643-657. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307>

Introduction

Evapotranspiration is the combination of two separate processes, soil moisture evaporation, and plant transpiration, which amount depends on various meteorological elements. Therefore, identifying the effective factors and the amount of their impact on reference evapotranspiration (ET_0) is important. This component plays an important role in various agricultural studies, including the design of irrigation and drainage systems, reservoir design, and irrigation planning (Ahmadyan *et al.*, 2023). Accurate estimates of evaporation and transpiration play an important role in studies such as global climate change, and environmental evolution, and in various scientific fields such as hydrology, agriculture, forest and pasture management, and water resources management (Kazemi, 2020).

Materials and Methods

The research was conducted in Iran, and the data analyzed encompass various meteorological parameters, including maximum, average, and minimum temperatures, average relative humidity, wind speed, and sunshine hours. These data were collected on a daily basis from 40 synoptic stations across the country. The dataset spans from 1976 to 2020 and was sourced from the Meteorological Organization of the country (IMO, 2022). The research employed the FAO Penman-Monteith method, specifically the 56th version, to estimate seasonal ET_0 (evapotranspiration) values. In this research, for statistical evaluations of ET_0 and revealing the trend of time series on a seasonal scale, the non-parametric Mann-Kendall (M-K) test; (Kendall, 1948; Mann, 1945) was used. To identify the changing trend of the ET_0 time series, the ITA method was used on a seasonal scale. Four meteorological stations and the 45-year time scale (1976-2020) used in the current research, it had a better performance than other interpolation methods, which was used as the superior method. To understand the possible changes of one or more meteorological variables in ET_0 , the sensitivity of Reference Evapotranspiration to six meteorological variables (relative humidity, hours of sunshine, average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and wind speed) was estimated. For this purpose, Sobol's method (Sobol, 1993). Sensitivity analysis was used.

Results and Discussion

According to the ET_0 survey results, the highest amount of ET_0 was observed in the spring season in the south and south-eastern parts, and the highest average value was 1050 mm/year in Zabul station. The increase of ET_0 in these areas can be due to the sun's radiation and more warming of the earth's surface in the southern latitudes of the country. In summer due to the length of the day and higher temperature, we saw an increase in ET_0 , especially

1, 2 and 3- Ph.D Student, Assistant Professor and Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: t_akbari@sbu.ac.ir)

4- Associate Professor in Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.83328.1307](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307)

in the southern and southeastern regions of the country. In autumn, due to the decrease in the length of the day and the decrease in temperature, the amount of ET_0 has also decreased significantly in the northern parts of the country. In winter, with a decrease in temperature and an increase in relative humidity, which is more noticeable in northern than southern regions.

In the summer season, all stations generally showed an increasing trend in ET_0 . In most of the stations, the significance level was 5% and it did not follow a specific pattern. In the autumn season, an increasing trend of ET_0 was observed at a significant level of 5% in Khoy and Saez stations, and a significant decreasing trend was observed in Qazvin and Shiraz stations. In the winter season, in the western and northwestern regions, all study stations showed an increasing trend of ET_0 . Finally, the overall results indicate that there is a significant increasing trend of ET_0 during the summer in Iran. The graphical results of the ET_0 trend by the four seasons on a scale of 44 showed that, in general, there was an increasing trend in ET_0 in both high and low areas in all seasons. The values of meteorological variables have been changed by the Sobol method in the range of 40% to investigate the effect of meteorological elements on ET_0 in different seasons of the year. The ranking of the sensitivity coefficient of the most effective meteorological parameter on the increase of the seasonal ET_0 using Sobol's method showed that, in general, in the spring season, the minimum temperature had the greatest effect on the reference evaporation and transpiration rate. Also, the ratings obtained in the summer season indicate that wind speed has the greatest effect on the ET_0 amount. In the autumn season, wind speed is still the first rank in affecting the rate of evaporation and transpiration. Finally, in the winter, the maximum temperature is the most important influencing factor among the other meteorological parameters.

Conclusion

According to the results, the amount of ET_0 was increasing and it has been noteworthy in the eastern half of Iran in recent years. The trend of changes in ET_0 showed that most stations had a positive value. The ET_0 seasonal time series analysis with the ITA method indicated that in Kerman station; ET_0 increased in all seasons and these results were at Bandar Anzali station. It was also observed that the seasonal trend of ET_0 was increasing. The results of the sensitivity analysis graphs showed that relative humidity generally had a negative effect, and the other parameters indicates a positive effect in increasing the ET_0 . Also, the results explained that in spring, summer, autumn, and winter, meteorological variables of minimum temperature, wind speed, and maximum temperature played a greater role in increasing ET_0 . The findings of the present research and the results of the ranking of the sensitivity of factors affecting the ET_0 rate showed that in each period, different conditions prevail in terms of the influence of meteorological elements on the ET_0 rate.

Keywords: ET_0 , FAO Penman-Monteith 56, ITA, Sobol's sensitivity analysis method

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۲، ص. ۶۴۳-۶۵۷

بررسی فصلی تبخیر تعرق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران

آمنه یحوی دیزج^۱ - طیبه اکبری اذیرانی^{۲*} - شهریار خالیدی^۳ - خدیجه جوان^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۷

چکیده

تبخیر تعرق ترکیب دو فرایند مجزا، تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است که میزان آن بستگی به عناصر مختلف هواشناسی دارد. از این رو شناخت عوامل مؤثر و میزان تأثیر هر عنصر بر تبخیر تعرق مرجع (ET_0) حائز اهمیت فراوان است. در پژوهش حاضر، برآورد ET_0 فصلی بر اساس آمار ۴۵ ساله ۱۹۷۶-۲۰۲۰ سازمان هواشناسی ۴۰ ایستگاه همدید به روش فائوپنمن مانتیث ۵۶ محاسبه و بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی ارائه شد. روند تغییرات ET_0 با آزمون‌های من-کندال و روند نوآورانه (ITA) بررسی شد. به منظور بررسی میزان تأثیر هر عنصر بر ET_0 ، ضریب حساسیت فصلی با استفاده از روش Sobol محاسبه شد. بدین صورت که توزیع آماری عناصر هواشناسی شامل رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط، بیشینه و کمینه دما و سرعت باد؛ با محاسبه میانگین و واریانس هر پارامتر در دامنه $\pm 40\%$ برآورد شد و سپس با ثابت نگه داشتن هر متغیر، تغییر تمامی متغیرها ضریب حساسیت در مقیاس فصلی ارائه شد. براساس نتایج، میزان تأثیرگذاری عناصر هواشناسی در ET_0 در فصول مختلف سال متفاوت است. ضریب حساسیت برای میزان تأثیرگذاری هر عنصر شامل کمینه دما با $1/18\%$ ، سرعت باد $22/5\%$ ، سرعت باد $3/19\%$ و بیشینه دما $20/4\%$ به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان رتبه نخست را در میزان تأثیرگذاری به خود اختصاص دادند. براساس یافته‌های پژوهش حاضر میزان تأثیرگذاری عناصر مختلف هواشناسی بر ET_0 در فصول مختلف تفاوت داشت که این مهم باید در برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب کشور مورد توجه قرار بگیرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر تعرق مرجع، تحلیل حساسیت سُبَل، روند نوآورانه، فائوپنمن مانتیث ۵۶

مقدمه

مختلف کشاورزی از جمله طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی، طراحی مخازن و برنامه‌ریزی آبیاری نقش مهمی ایفا می‌کند (Ahmadyan et al., 2023). تعیین مقدار تبخیر تعرق (نیاز آبی گیاه) یک مؤلفه مهم در تعیین بیلان آب و بودجه‌بندی آبیاری می‌باشد. برآوردهای دقیق تبخیر تعرق در مطالعاتی از قبیل تغییر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و در زمینه‌های مختلف علوم همچون هیدرولوژی، کشاورزی، مدیریت جنگل و مرتع و مدیریت منابع آب نقش مهمی ایفا

تبخیر تعرق^۵ متغیری پیوسته و وابسته به موقعیت جغرافیایی است و در عین حال متأثر از فرایندهای مختلفی است که این فرایندها در زمان و مکان متغیر هستند (Yahyavi Dizaj et al., 2023). نوسانات تبخیر تعرق تابعی از نوسانات عناصر مختلف هواشناسی نظیر دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی است. این مؤلفه در مطالعات

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
(Email: t_akbari@sbu.ac.ir)
(*) نویسنده مسئول:

۴- دانشیار جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

و تحلیل حساسیت معادله پنمن مانیتیت نسبت به عناصر مختلف هواشناسی درگستره ایران صورت پذیرفته است. بنابراین از آنجایی که هر یک از اجزاء سازنده دستگاه اقلیم بُرد (دامنه مکانی) و بازه (دامنه زمانی) معینی دارند یعنی اندازه و عمر مشخصی دارند اقلیم اساساً دستگاهی مقیاس‌مند است. بر همین اساس هدف اصلی پژوهش حاضر؛ ارزیابی تبخیر تعرق مرجع فصلی (دامنه زمانی) درگستره ایران (دامنه مکانی) در طول دوره آماری (۲۰۲۰-۱۹۷۶)، با بهره‌گیری از روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ و بررسی روند و تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع با بهره‌گیری از روش سُبُل، به هر یک از عناصر هواشناسی از جمله دمای بیشینه، دمای متوسط، دمای کمینه، متوسط رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است (شکل ۱)؛ ایران کشوری وسیع با تنوع جغرافیایی بالاست. حداقل ارتفاع کشور ایران از ۲۷- در سواحل دریای خزر تا بیش از ۵۶۰۰ m در رشته کوه البرز متغیر است. بخش‌های بزرگی از آن در مناطق داخلی، شرقی و جنوب‌شرقی کشور پوشیده از بیابان‌های بزرگی است؛ به طوری که دشت لوت ۱۰٪ کل مساحت کشور را در بر گرفته است (Ahmadi et al., 2021). متوسط سالانه بارندگی کشور ایران کمتر از یک سوم سالانه بارش خشکی‌های کره زمین و متوسط سالانه تبخیر آن، سه برابر تبخیر سالانه کره زمین است (Babaei, 2021).

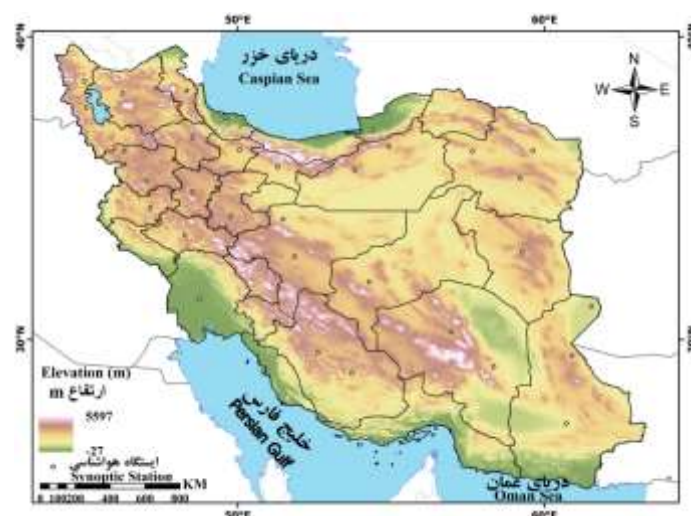
داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر داده‌های دمای بیشینه (T_{max})، دمای متوسط (T_m)، دمای کمینه (T_{min})، متوسط رطوبت نسبی (RH_{mean})، سرعت باد ($Wind$) و ساعت آفتابی (Sun) در مقیاس زمانی روزانه برای ۴۰ ایستگاه همدید کشور که دارای آمار بلند مدت ۴۵ ساله و دوره آماری مشترک بودند از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰، از سازمان هواشناسی کشور (IMO, 2022) دریافت شدند (جدول ۱). سپس داده‌های مذکور به‌ترتیب مرتب‌سازی، بازسازی به فرمت مورد نظر برای محاسبه ET_0 در مقیاس فصلی به روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ آماده‌سازی شدند.

می‌کنند (Kazemi, 2020). امروزه با توجه به مسئله بحران آب و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق، آگاهی از وضعیت تبخیر تعرق گیاه مرجع (ET_0) می‌تواند به تصمیم‌گیری‌ها برای برنامه‌ریزی استفاده از منابع آب و روش‌های مدیریتی مناسب کمک کند (Zeraati Neyshabouri et al., 2022). این امر نشان دهنده اهمیت و ضرورت توجه بیشتر به مسئله ET_0 و شناسایی عوامل مهم تأثیرگذار بر آن در فصول مختلف سال در کشور است.

تحلیل حساسیت^۲ تبخیر تعرق مرجع، نقش مؤثری در شناخت عوامل تأثیرگذار در نیاز آبی گیاهان، برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری خواهد داشت (Mubialiwo et al., 2020). تبخیر تعرق یک پارامتر اقلیمی است و با انجام تحلیل حساسیت تبخیر تعرق مرجع می‌توان با تغییر یک یا چند عنصر اقلیمی تأثیر سایر عناصر هواشناسی را محاسبه نمود (Allen et al., 1998). براساس مطالعات متفاوت انجام شده حساسیت تبخیر تعرق مرجع نسبت به عناصر هواشناسی بسته به مکان و زمان متغیر است (Fang, Hu et al., 2021; Kang et al., 2021; 2021). در نتیجه، ET_0 یک پدیده چند متغیره و پیچیده است که در هر منطقه، بازتاب شرایط اقلیمی آن منطقه بوده و تحت تأثیر برخی از عوامل اقلیمی است (Dinpashoh and Foroghi, 2020). ET_0 تابع عوامل محلی و بیرونی مانند ویژگی‌های اقلیمی، ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، وضعیت گیاهی و توپوگرافی منطقه است و برخی از این پارامترها در زمان و مکان متغیر هستند (Babaei, 2021). براساس مجموعه‌ای از مطالعات افزایش قابل توجه روند ET_0 (Pour et al., 2020; Ahmad et al., 2019; D'Andrea et al., 2019; Ghafouri-Azar Pravalie et al., 2019; Hwang et al., 2020; et al., 2018). برخلاف مجموعه قبلی، کاهش میزان ET_0 را پژوهشگرانی نظیر (Wang et al., 2020; Rahman et al., 2019; 2019; Nouri and Bannayan, 2019; Cabral Junior et al., 2019) در پژوهش خود گزارش کرده‌اند. تعدادی دیگر از محققان مانند (Li et al., 2019; Zhang et al., 2017; Gao et al., 2017) نوسان ET_0 را در مطالعات خود بیان کرده‌اند. در نهایت برخی دیگر از جمله (Lin et al., 2018; Blyth et al., 2019). در مطالعات خود عدم تغییر در میزان ET_0 را اظهار داشته‌اند. بنابراین، برای برآورد ET_0 ، یکی از موارد پراهمیت بررسی روند تغییرات و همچنین حساسیت ET_0 به تمامی پارامترهای تأثیرگذار برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و غیره ضروری است.

از آنچه گذشت چنین برمی‌آید که با توجه به اهمیت موضوع و با وجود مطالعاتی که در زمینه ET_0 در ایران انجام شده (Ebrahimi, 2019; Dinpashoh and Foroghi, 2020; Haftcheshmeh, 2019; Zeraati Neyshabouri, 2022; Ahmadyan et al., 2023)، هنوز مطالعه بنیادی و جامعی در خصوص ارزیابی فصلی تبخیر تعرق مرجع



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد پژوهش به همراه ایستگاه‌های همدید منتخب
Figure 1- Geographical location of the research area along with the selected synoptic stations

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده پژوهش حاضر

Table 1- Data used in the current research

پارامترهای هواشناسی Meteorology Parameter	واحد Unit	دوره زمانی Time	لینک داده‌ها Data Link
RH رطوبت نسبی	%	1976-2020	
SUN ساعت آفتابی	h	1976-2020	
Tmax بیشینه دما	°C	1976-2020	https://data.irimo.ir/
Tm متوسط دما	°C	1976-2020	
Tmin کمینه دما	°C	1976-2020	
Wind سرعت باد	m/s	1976-2020	

روش‌های مورد استفاده

برآورد تبخیر تعرق مرجع (ET₀)

روش‌های مختلفی برای محاسبه ET₀ وجود دارد؛ اما عملکرد این روش‌ها در شرایط اقلیمی مختلف، متفاوت می‌باشد. در مطالعاتی که توسط پژوهشگران در نقاط مختلف جهان انجام شده، روش فائو پنمن مانیت ۵۶ به عنوان یک روش استاندارد جهانی برای تخمین ET₀ پیشنهاد شده است و به عنوان دقیق‌ترین روش تحت شرایط آب و هوایی مختلف ارائه و معرفی شده است (Allen et al., 1998 Piri). از این‌رو در پژوهش حاضر نیز جهت برآورد ET₀ فصلی، از روش (FAO-56 PM)، استفاده شد.

این مدل برای استفاده در بازه زمانی روزانه، ماهانه و فصلی برای گیاه چمن با ارتفاع ۰/۱۲m، مقاومت سطحی ثابت ۰/۷ ثانیه بر متر m/s و ضریب آلبدو ۰/۳۲ به صورت رابطه ۱ است (Allen et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G_s) + \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

که در آن ET₀: تبخیر تعرق مرجع (mm)، R_n: تابش خالص، G_s: چگالی شار گرمایی خاک، T: متوسط دمای هوا (°C)، U₂: سرعت باد (m/s) در ۲ m، e_s و e_a: به ترتیب فشار بخار واقعی و فشار بخار اشباع، Δ: شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما و γ: ثابت سایکرومتری است (Allen et al., 1998).

آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K)

آزمون ناپارامتریک من-کندال یکی از پرکاربردترین روش‌های آشکارسازی روند سری‌های زمانی است. از مزایای روش‌های ناپارامتریک این است که وجود داده‌های پرت، نتیجه روند را کمتر از روش‌های پارامتریک تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش به منظور ارزیابی‌های آماری ET₀ و آشکارسازی روند سری‌های زمانی در مقیاس فصلی از آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K)؛ (Kendall, 1948)

(Mann, 1945) استفاده شد.

آزمون گرافیکی روند نوآورانه (ITA^۱)

به منظور شناسایی روند تغییرات سری زمانی ET_0 ، آزمون ITA در مقیاس فصلی مورد استفاده قرار گرفت. که بی نیاز بودن از هرگونه پیش فرضی مانند: غیرنرمال بودن توزیع، تعداد داده‌ها، همبستگی سریالی و غیره از جمله مزایای روند ITA است. ITA با ایجاد فواصل اطمینان و با در نظر گرفتن تفاوت بین دو میانگین سری داده‌ها قابل انجام است (Javan, 2021).

پهنه‌بندی ET_0 در گستره ایران

پهنه‌بندی ET_0 روشی مناسب جهت محاسبه منطقه‌ای ET_0 می باشد که برای منطقه‌ای نمودن ET_0 می‌توان از روش‌های درونیایی استفاده کرد. انتخاب روش درونیایی به نوع متغیر و تغییرات آن بستگی دارد و باید به این نکته توجه شود که برای حالات مختلف، هیچگاه استفاده از یک مدل پهنه پیشنهاد نمی‌شود، زیرا که یک مدل خاص در شرایط مختلف دقت‌های متفاوتی دارد (Ebrahimi, 2019). برای پهنه‌بندی ET_0 محاسبه شده در پژوهش حاضر با مقایسه جذر میانگین مربعات خطا^۲ در بین روش‌های مختلف درونیایی زمین آمار، روش معمولی^۳ که جزو خانواده روش کریجینگ^۴ می‌باشد. برای ایستگاه‌های هواشناسی و مقیاس زمانی ۴۵ ساله (۲۰۲۰-۱۹۷۶) مورد استفاده پژوهش حاضر؛ عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر روش‌های درونیایی داشت که به عنوان روش برتر پهنه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت.

تجزیه و تحلیل حساسیت (Sobol's Method)

با استفاده از تجزیه و تحلیل حساسیت می‌توان پارامترهای ورودی مدل را بر اساس تأثیر آنها بر خروجی رتبه‌بندی کرد تا درک بهتری از تأثیر تغییرپذیری ورودی بر خروجی مدل ارائه شود (Zhou et al., 2020). در این پژوهش، برای درک تغییرات احتمالی یک یا چند متغیر هواشناسی در ET_0 ، حساسیت تبخیر تفرق مرجع نسبت به شش متغیر هواشناسی (رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط دما، بیشینه دما، کمینه دما و سرعت باد) برآورد شد. برای این منظور از روش سبیل (Sobol, 1993). تحلیل حساسیت استفاده شد (شکل ۲). روش سبیل از یک رویکرد تجزیه واریانس برای محاسبه تأثیرگذاری حساسیت متغیرهای مختلف استفاده می‌کند (Wang et al., Yamamoto et al., 2020).

در پژوهش حاضر با استفاده از روش سبیل میانگین و واریانس هر

متغیر در دامنه واریانس $\pm 40\%$ محاسبه و توزیع هر متغیر تخمین زده شد. سپس واریانس جزئی هر متغیر با ثابت نگه داشتن متغیر مورد نظر و تغییر تمام متغیرهای باقی مانده تخمین زده شد. به عنوان مثال، حساسیت ET_0 نسبت به بیشینه دما با ثابت نگه داشتن آن در حالی که تمام پنج عنصر دیگر تغییر داده می‌شد، بدست آمد. علاوه بر این از واریانس جزئی برای تخمین حساسیت کل، نسبت به همه عناصر استفاده شد. در نهایت عناصر با توجه به حساسیت آنها رتبه‌بندی شدند. بنابراین در پژوهش حاضر ضریب حساسیت هر یک از عناصر هواشناسی بر ET_0 با استفاده از روش تحلیل حساسیت سبیل و با استفاده از برنامه نویسی در نرم‌افزار R ارزیابی شد و در نهایت ضریب حساسیت فصلی هر یک از عناصر تأثیرگذار بر میزان تغییرات ET_0 محاسبه و رتبه‌بندی شدند. لازم به ذکر است که جزئیات مربوط به روش سبیل را می‌توان در پژوهش سبیل (Sobol, 2001) یافت.

نتایج و بحث

برآورد (ET_0) در مقیاس فصلی به روش پنمن-مانتیت فائو

۵۶

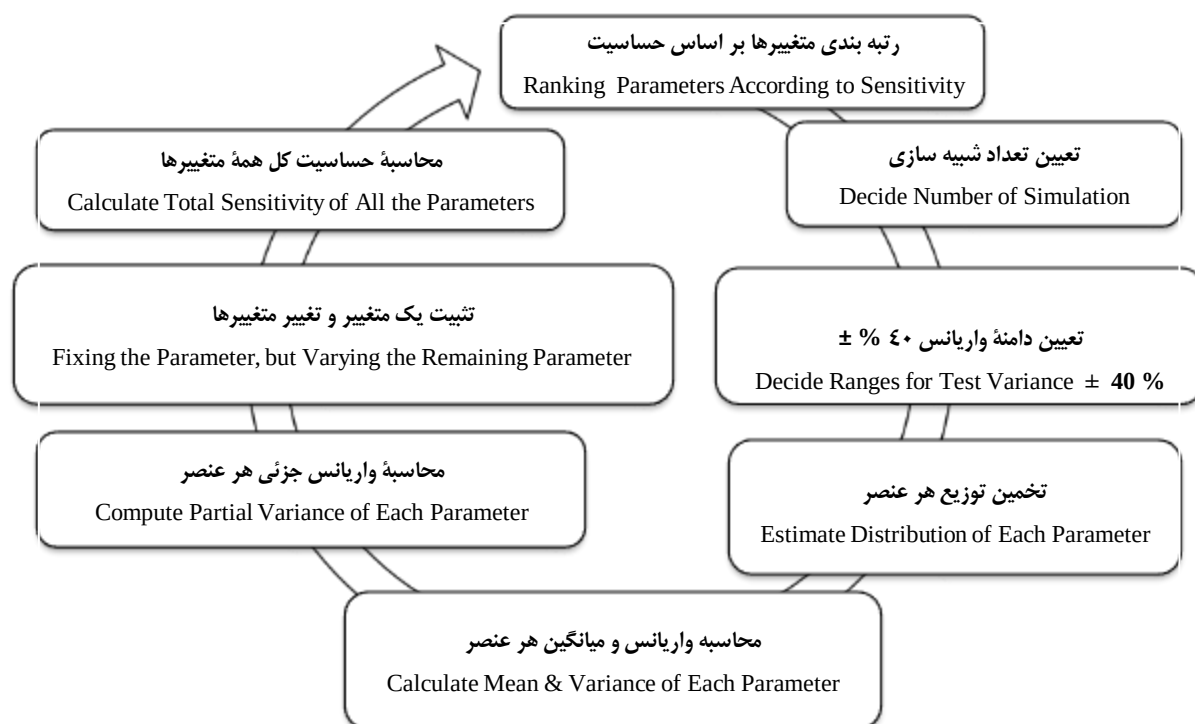
باتوجه به اینکه ET_0 متغیری پیوسته بوده و از عوامل و عناصر اقلیمی تأثیر می‌پذیرد، می‌توان استنباط کرد که ET_0 به تغییرات زمانی از قبیل: تغییر در متغیرهای مختلف اقلیمی در فصول مختلف سال و مکانی مانند: موقعیت جغرافیایی نقاط ایستگاهی وابسته می‌باشد. این مطلب اهمیت مدیریت مکانی و زمانی ET_0 را تأیید می‌نماید. از این رو محاسبه ET_0 و تهیه نقشه‌های آن با دقت بیشتر و به تفکیک فصول چهارگانه در گستره ایران انجام شد. براساس (شکل ۳) در فصل بهار در بخش‌های جنوب و جنوب شرقی بیشترین میزان ET_0 مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار میانگین آن در ایستگاه زابل ۱۰۵۰ mm در سال است. افزایش ET_0 در این نواحی می‌تواند، در اثر تابش خورشید و گرمایش بیشتر سطح زمین در عرض‌های جنوبی کشور باشد. با توجه به شکل ۳. میزان ET_0 در عرض‌های شمالی تر کاهش به کمتر از ۳۰۰ mm در سال رسیده است که از جمله دلایل آن را می‌توان کاهش زاویه تابش و آغاز بارش‌های همرفتی بهاره در عرض‌های شمالی کشور دانست که همزمان با فعالیت بارش‌های همرفتی بهاره در این نواحی ET_0 کمتری مشاهده می‌شود. نتایج این بخش از پژوهش با مطالعه طاووسی و همکاران (Tavoosi et al., 2012) که پهنه‌بندی شدت خشکی را در ایران انجام دادند همسو است. در فصل تابستان؛ به دلیل طول روز و دمای بیشتر شاهد افزایش ET_0 بویژه در نواحی جنوب و جنوب شرقی کشور هستیم.

3- Ordinary

4- Kriging

1- Innovative Trend Analysis

2- Root-Mean-Square

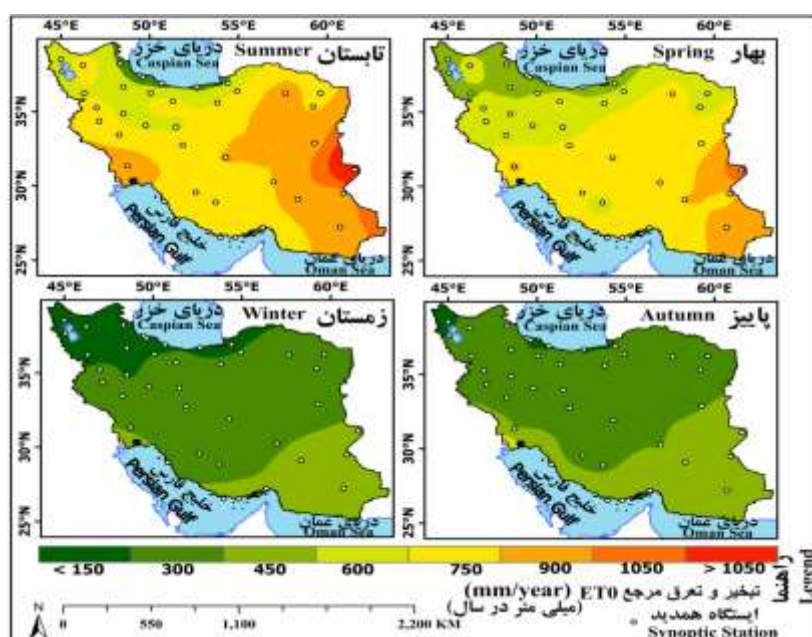


شکل ۲- فلوچارت تحلیل حساسیت عناصر هواشناسی نسبت به ET_0 با استفاده از روش تحلیل حساسیت Sobol

Figure 2- Flowchart of the sensitivity analysis of meteorological elements to ET_0 using the Sobol sensitivity analysis method

کاهش قابل توجهی دارد. کاهش ET_0 در این نواحی را می توان ناشی از کاهش گرادیان دما نسبت به ارتفاع دانست، که افزایش ارتفاع سبب کاهش دما و کاهش ET_0 می شود. در عین حال، وجود دو رشته کوه البرز در امتداد شمال و رشته کوه زاگرس در امتداد شمال غرب و غرب کشور، در کاهش دما، افزایش رطوبت و کاهش ET_0 مؤثر هستند. در نتیجه در فصل زمستان ET_0 به کمترین میزان خود یعنی به کمتر از ۱۵۰ mm در سال رسیده است. این بخش از نتایج با نتایج پژوهش نیازی (Niazi, 2016) که به محاسبه تبخیر تعرق مرجع با استفاده از روش های انتقال جرم پرداخت هم خوانی دارد. نتایج کلی نشان می دهد که آرایش جغرافیایی الگوی ET_0 تابع عوامل محلی (عرض جغرافیایی و ارتفاع) و بیرونی (عناصر گردش عمومی جو) بوده و پراکنش مکانی فصلی آن حاکی از افزایش میزان ET_0 از شمال به جنوب و از غرب به شرق می باشد. در نتیجه بیشترین میزان آن در نواحی جنوب شرقی مشاهده می شود. در این پژوهش آرایش جغرافیایی الگوی ET_0 با نتایج پژوهش صادقی و احمدی (Sadeghi and Ahmadi, 2021) در محاسبه تبخیر تعرق ایران با استفاده از روش برون داد مدل های دینامیکی ریزمقیاس شده پروژه CORDEX - MNA مطابقت دارد و صحت نتایج پژوهش حاضر را تأیید می نماید.

در این فصل؛ مقدار ET_0 در بخش های وسیعی از کشور ایران افزایش یافته است. به طوری که میزان ET_0 در عرض های جنوبی به بالاترین حد خود یعنی بیشتر از ۱۰۵۰ mm در سال رسیده است. در این دوره، نواحی واقع در عرض های بالاتر به دلیل اینکه دمای کمتری نسبت به عرض های جنوبی دارند در نتیجه میزان ET_0 کمتری یعنی کمتر از ۱۵۰ mm در سال را نشان می دهند. این قسمت از نتایج پژوهش حاضر، با نتایج لرستانی (Lorestani, 2016) که با استفاده از روش های برآورد تبخیر تعرق مرجع بر پایه درجه حرارت در ایران پرداخت هم خوانی دارد. در فصل پاییز؛ که برابر با شروع دوره سرد سال است به دلیل کاهش طول روز و پایین آمدن دما، میزان ET_0 نیز در بخش های شمالی کشور کاهش قابل توجهی یافته است که نتایج این بخش از پژوهش با نتایج نیازی (Niazi, 2016) مطابقت دارد. در این فصل؛ میزان ET_0 در عرض های شمالی به کمتر از ۱۵۰ mm در سال رسیده در حالی که در عرض های جنوبی بیشینه تبخیر تعرق مرجع بین ۳۰۰ تا ۴۵۰ mm در سال است. این بخش از نتایج نیز با نتایج طاووسی و همکاران (Tavoosi et al., 2012) مطابقت دارد. در فصل زمستان؛ با کاهش دما و افزایش رطوبت نسبی که در مناطق شمالی نسبت به مناطق جنوبی محسوس تر است. به تبع آن ET_0 نیز کاهش یافته است. در این فصل؛ در نواحی شمال غربی، غرب و شمال شرقی؛ میزان ET_0

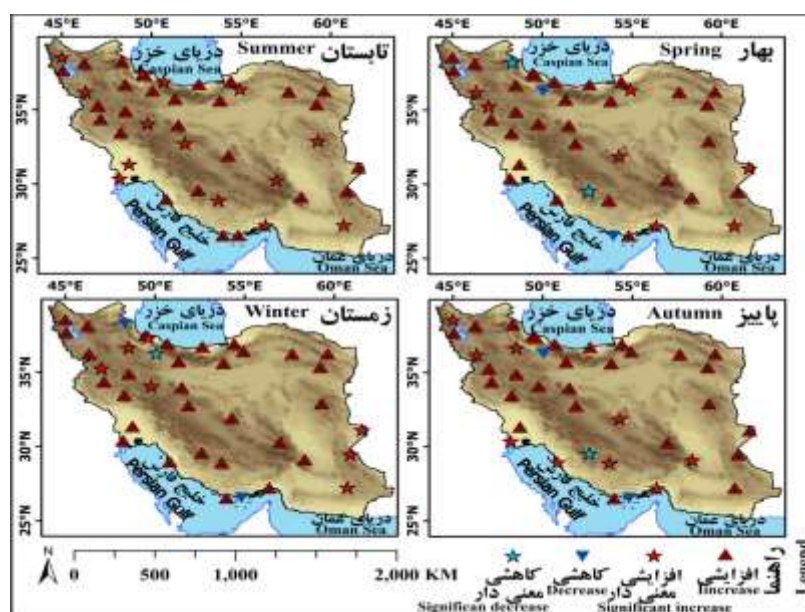


شکل ۳- توزیع فصلی ET_0 ایران با استفاده از روش فائو پنمن مانیتث ۵۶ (۱۹۷۶-۲۰۲۰)
Figure 3- Distribution of Iran's seasonal ET_0 using the FAO Penman Monteith 56 method 1976-2020

۵٪ است. در نواحی جنوب شرقی همه ایستگاه‌ها روند افزایشی ET_0 را نشان می‌دهند. در فصل زمستان در نواحی غرب و شمال غربی تمامی ایستگاه‌های مطالعاتی روند افزایشی میزان ET_0 را نشان می‌دهد. این در حالی است که این افزایش در ایستگاه سنج در سطح ۵٪ معنی‌دار است و ایستگاه‌های اردبیل و قزوین روند کاهشی تبخیر تعرق را نشان می‌دهند و در ایستگاه‌های رشت و زنجان معنی‌داری روند کاهشی در سطح ۵٪ مشاهده می‌شود. میزان تبخیر تعرق در بقیه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی است. ایستگاه بندر لنگه تنها ایستگاهی که روند کاهشی در میزان تبخیر تعرق مرجع را نشان داده و بقیه ایستگاه‌ها روند افزایشی در تبخیر تعرق را تجربه نموده‌اند. همچنین میزان تبخیر تعرق در ایستگاه‌های زابل، زاهدان و ایرانشهر دارای روند افزایشی است. نهایت نتایج کلی حاکی از آن است که در گستره ایران، گرچه ET_0 دارای روند افزایشی و کاهشی معنی‌دار ET_0 فصلی در ایران است. اما روند افزایشی بویژه در تابستان؛ بیشترین میزان را دارد. به بیانی دیگر میزان آب مورد نیاز گیاهان در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف کشور ایران افزایشی بوده است که نتایج این بخش از پژوهش با نتایج فروغی و همکاران (Foroghi et al., 2020) که اثر تغییر اقلیم بر روند تغییرات ET_0 در منطقه غرب ایران را با روش فائو پنمن مانیتث ۵۶ (۲۰۱۵-۱۹۸۰) بررسی کردند مطابقت دارد.

توزیع مکانی روند و شیب روند ET_0 در مقیاس فصلی

شکل ۴ توزیع مکانی روند ET_0 فصلی را با استفاده از آزمون آماری ناپارامتریک من-کندال بصورت سری‌های زمانی فصلی (۲۰۲۰-۱۹۷۶) ۴۰ ایستگاه همدید واقع در گستره ایران، نشان می‌دهد. در فصل بهار و در نواحی شمال غربی تمامی ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی هستند و این افزایش در ایستگاه‌های سقز و سنندج در سطح خطای ۵٪ معنی‌دار است. در ایستگاه‌های اردبیل، قزوین، شیراز و جزیره کیش روند معنی‌دار کاهشی ET_0 و ایستگاه‌های اردبیل، شیراز و بوشهر روند معنی‌دار افزایشی را در سطح ۵٪ نشان می‌دهند. تبخیر تعرق مرجع در نواحی مرکزی در تمامی ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی بوده و در ایستگاه‌های واقع در جنوب شرقی دارای روند افزایشی هستند و این افزایش در ایستگاه‌های زابل و ایرانشهر افزایشی معنی‌دار است. در فصل تابستان تمامی ایستگاه‌ها بطور کلی روند افزایشی در ET_0 را نشان می‌دهند. در بیشتر ایستگاه‌ها سطح معنی‌داری ۵٪ است و از الگوی خاصی تبعیت نمی‌کند بطور نایک‌نواخت در گستره ایران مشاهده می‌شوند. در فصل پاییز در ایستگاه‌های خوی و سقز روند افزایشی ET_0 در سطح ۵٪ معنی‌دار است و ایستگاه‌های قزوین و شیراز دارای روند معنی‌دار کاهشی و بقیه ایستگاه‌ها روند معنی‌دار افزایشی و شیب مثبت دارند. در ایستگاه‌های زنجان، شیراز، بوشهر و یزد معنی‌داری در سطح ۵٪ است. همچنین ایستگاه بندر لنگه روند معنی‌دار کاهشی را در میزان تبخیر تعرق مرجع نشان می‌دهد و بقیه ایستگاه‌ها روند افزایشی معنی‌دار دارند و در ایستگاه‌های یزد، بم و بندرعباس روند افزایشی در سطح معنی‌داری



شکل ۴- توزیع مکانی روند ET_0 فصلی (۱۹۷۶-۲۰۲۰)
Figure 4- Spatial distribution of seasonal ET_0 trend 1976-2020

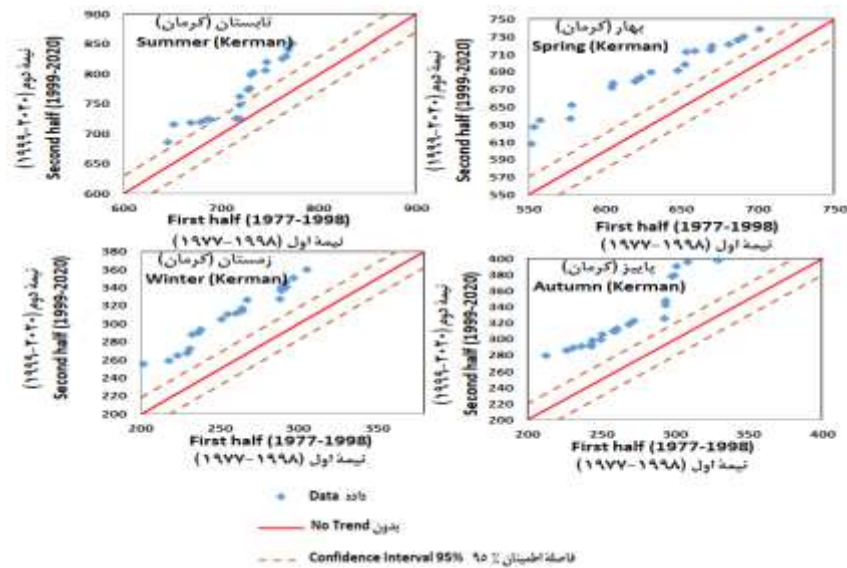
روند ET_0 در بازه زمانی بلند مدت و حاکی از افزایش نیاز آبی گیاهان در کشور ایران است.

تأثیر متغیرهای هواشناسی بر تغییر میزان ET_0 فصلی

تأثیر عناصر هواشناسی بر روی ET_0 در فصول مختلف سال در شکل ۷ قابل مشاهده است. در اینجا برای درک تأثیر متغیرهای مختلف هواشناسی در فصول چهارگانه بر ET_0 ، مقادیر متغیرهای هواشناسی به روش سبیل در محدوده ۴۰٪ تغییر داده شده‌اند. در شکل مذکور شیب بیشتر یک خط نشان دهنده تأثیر بیشتر در ET_0 به دلیل تغییر در یک متغیر هواشناسی و در نتیجه تأثیر بیشتر متغیر بر ET_0 است. همچنین در نمودارهای ارائه شده در این شکل، مقادیر منفی رطوبت نسبی بیانگر کاهش رطوبت و مقادیر مثبت سایر متغیرها بیانگر افزایش آنها و اثر بر ET_0 می‌باشد. بدین معنا که منفی بودن رطوبت نسبی حاکی از کاهش مقادیر آن است که چنین شرایطی سبب تأثیرگذاری بیشتر و به بیانی دیگر سبب افزایش میزان ET_0 شده و بالعکس. از طرفی مثبت بودن سایر پارامترها به معنی افزایش میزان آنها و به تبع آن تأثیرگذاری بیشتر آنها بر ET_0 است. در نتیجه با توجه به شکل ۷ در فصول بهار و تابستان تأثیرگذارترین پارامترها بر مقدار ET_0 به ترتیب ابتدا متوسط دما و سپس بیشینه دما هستند که نشان دهنده تأثیر بیشتر این دو پارامتر در مقایسه با سایر پارامترهای مؤثر بر میزان ET_0 می‌باشد.

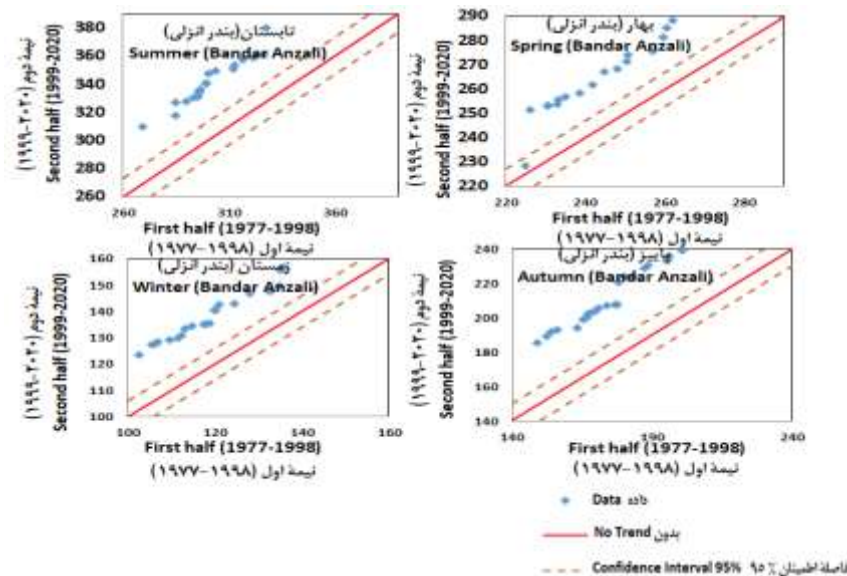
روند ET_0 فصلی با استفاده از تحلیل روند نوآورانه (ITA)

برای شناسایی روند سری زمانی ET_0 فصلی حاصل از روش فائو پنمن مانیت ۵۶ در کشور ایران از روند نوآورانه (ITA) استفاده شد. بدین صورت که سری زمانی به دو زیر سری؛ نیمه اول (۱۹۷۷-۱۹۹۸) و نیمه دوم (۱۹۹۹-۲۰۲۰) تقسیم شد. در پژوهش حاضر؛ از بین ۴۰ ایستگاه منتخب، دو ایستگاه (کرمان) و (بندر انزلی) به ترتیب با ارتفاع ۱۷۵۴ و ۲۳۶- به عنوان نماینده مناطق مرتفع و پست انتخاب شده‌اند. که شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب تحلیل کیفی روند ET_0 ، حاصل از روش ITA را بر حسب mm/year در مناطق مرتفع و پست نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ نتایج گرافیکی روند ET_0 به تفکیک فصول چهارگانه در مقیاس ۴۴ ساله ایستگاه کرمان نشان می‌دهد. تمامی نقاط داده‌ها در بالای خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که نشان دهنده روند افزایشی میزان ET_0 در مقیاس زمانی فصلی در ایستگاه منتخب کرمان در گستره ایران است. به همین ترتیب در شکل ۶ ایستگاه بندرانزلی نیز حاکی از افزایش روند در میزان ET_0 در بازه زمانی ۴۴ ساله است. ایستگاه بندرانزلی نماینده مناطق پست، در مقایسه با ایستگاه کرمان نماینده مناطق مرتفع، نشان می‌دهد که در این ایستگاه نیز روند افزایشی در میزان ET_0 در تمامی فصول مشاهده می‌شود. بنابراین بطور کلی هم در مناطق مرتفع و هم در مناطق پست در تمامی فصول روند افزایشی در میزان ET_0 مشاهده می‌شود. این امر نشان دهنده افزایش



شکل ۵- روند ITA برای فصلی ایستگاه کرمان (نماینده مناطق مرتفع)

Figure 5- ITA trend for seasonal ET_0 of Kerman station representative of high areas



شکل ۶- روند ITA برای فصلی ایستگاه بندرانزلی (نماینده مناطق پست)

Figure 6- ITA trend for seasonal ET_0 of Bandar Anzali station representative of lowland areas

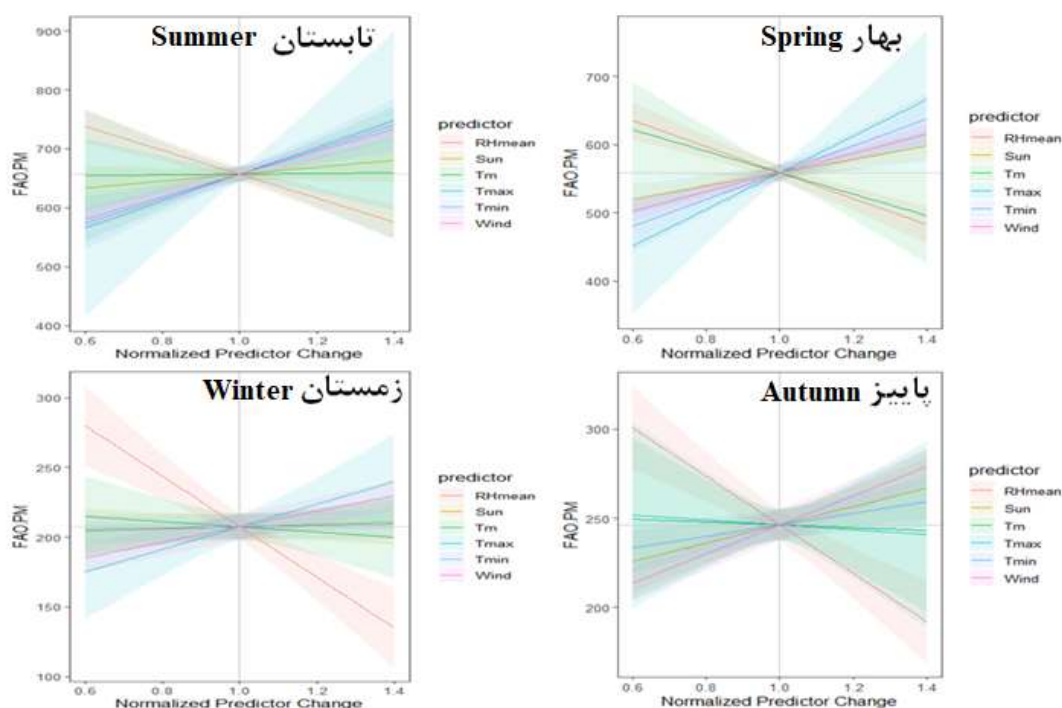
این جدول در فصل بهار تأثیر کمینه دما در افزایش میزان ET_0 در مقایسه با سایر متغیرهای هواشناسی بیشتر مشاهده می‌شود. تأثیر کمینه دما بر ET_0 (ستون ششم جدول ۲) ۱۸/۱٪ است و باعث افزایش ۲۱/۵٪ در ET_0 در این فصل شده است. براساس جدول ۲، پارامتر رطوبت نسبی با وجود اینکه از نظر عددی بالاترین عدد را با ضریب ۲۱/۵٪ در مقایسه با بقیه پارامترها نشان می‌دهد اما نکته حائز اهمیت در مورد رطوبت نسبی این است که به میزانی که ضریب رطوبت نسبی افزایش می‌یابد و عدد آن رو به سمت مثبت می‌رود سبب کاهش میزان ET_0 می‌شود در نتیجه در اینجا بالاترین نقش را در کاهش میزان ET_0 در فصل بهار

همچنین با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که در فصل پاییز سرعت باد بالاترین تأثیر را در میزان ET_0 داشته و بعد از آن رطوبت نسبی در رتبه بعدی قرار گرفته است. در نهایت در فصل زمستان به ترتیب متغیرهای هواشناسی متوسط دما و سپس سرعت باد رتبه‌های اول و دوم را به خود اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است که منفی یا مثبت بودن ضریب حساسیت (S) نشان‌دهنده کاهش یا افزایش پتانسیل تبخیر تعرق است (Gong et al., 2006).

ضریب حساسیت فصلی متغیرهای هواشناسی بر مقادیر ET_0 بر حسب درصد و با استفاده از روش سبل در جدول ۲ ارائه شده است. در

۶/۲٪ رسیده است که حاکی از افزایش تأثیر آن برافزایش ET_0 می‌باشد. در نهایت در فصل زمستان بیشینه دما با ضریب ۲۰/۴٪ به عنوان مهم-ترین و مؤثرترین عامل برافزایش میزان ET_0 است. رتبه‌بندی ضریب حساسیت مؤثرترین پارامتر هواشناسی برافزایش میزان ET_0 فصلی با بهره‌گیری از روش سبُل نشان می‌دهد که بطور کلی در فصل بهار کمینه دما بیشترین تأثیر را بر میزان تبخیر تعرق مرجع دارد. همچنین رتبه‌های بدست آمده در جدول ۳ در فصل تابستان حاکی از آن است که سرعت باد بیشترین تأثیر را بر میزان ET_0 داراست.

دارد. در فصل تابستان سرعت باد با ضریب تأثیرگذاری ۲۲/۵٪ بر ET_0 ، بیشترین میزان تأثیرگذاری را به خود اختصاص داده است بعد از آن کمینه دما با میزان ۱۹/۸٪ دومین نقش را از نظر تأثیرگذاری بر میزان ET_0 در فصل تابستان دارد. در فصل پاییز با اینکه سرعت باد همچنان عامل مهم تأثیرگذار درافزایش میزان ET_0 است و در عین حال در این فصل ضریب آن نسبت به فصل تابستان افزایش یافته و ضریب تأثیرگذاری آن بر ET_0 به میزان ۳۱/۹٪ رسیده است از طرفی مشاهده می‌شود که ضریب رطوبت نسبی کاهش چشمگیری یافته و به میزان



شکل ۷- حساسیت تبخیر تعرق مرجع به متغیرهای مختلف هواشناسی در فصول مختلف

Figure 7- Sensitivity of Reference Evapotranspiration to different meteorological variables in different seasons

جدول ۲- ضریب حساسیت متغیرهای هواشناسی (%) بر ET_0 فصلی در ایران ($\pm 40\%$) از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰

Table 2- Sensitivity coefficient of meteorological variables (%) on seasonal ET_0 in Iran ($\pm 40\%$) from 1976 to 2020

مقیاس زمانی Time	RH (%) رطوبت نسبی	Sun (h) ساعت آفتابی	Tmax (°C) بیشینه دما	Tm (°C) متوسط دما	Tmin (°C) کمینه دما	Wind (m/s) سرعت باد
	S	S	S	S	S	S
بهار Spring	21.5	12.4	17.5	13.6	18.1	16.9
تابستان Summer	13.8	13.4	17.3	13.3	19.8	22.5
پاییز Autumn	6.2	23.2	11.5	10.3	16.9	31.9
زمستان Winter	23.1	16.8	20.4	11.1	10.8	17.9

S = Sensitivity Analysis

جدول ۳- رتبه‌بندی ضریب حساسیت مؤثرترین پارامتر هواشناسی بر افزایش میزان ET_0 فصلیTable 3- Ranking of the sensitivity coefficient of the most effective meteorological parameter on the increase of seasonal ET_0

رتبه ششم Rank 6	رتبه پنجم Rank 5	رتبه چهارم Rank 4	رتبه سوم Rank 3	رتبه دوم Rank 2	رتبه اول Rank 1	مقیاس زمانی Time
رطوبت نسبی RH	ساعت آفتابی SUN	متوسط دما Tm	سرعت باد SUN	بیشینه دما Tmax	کمینه دما Tmin	بهار Spring
رطوبت نسبی RH	متوسط دما Tm	ساعت آفتابی SUN	بیشینه دما Tmax	کمینه دما Tmin	سرعت باد Wind	تابستان Summer
متوسط دما Tm	بیشینه دما Tmax	کمینه دما Tmin	ساعت آفتابی SUN	رطوبت نسبی RH	سرعت باد Wind	پاییز Autumn
رطوبت نسبی RH	کمینه دما Tmin	متوسط دما Tm	ساعت آفتابی SUN	سرعت باد Wind	بیشینه دما Tmax	زمستان Winter

ایستگاه‌ها دارای مقدار مثبت روند هستند. نتایج بررسی سری زمانی فصلی ET_0 با استفاده از روش ITA نشان داد که در ایستگاه نماینده مناطق مرتفع (ایستگاه کرمان)؛ ET_0 در تمامی فصول افزایش یافته و این نتایج در ایستگاه واقع در مناطق پست (ایستگاه بندرانزلی)؛ نیز مشاهده شد که روند فصلی ET_0 افزایشی می‌باشد. نتایج حاصل از نمودارهای تحلیل حساسیت نشان داد که بطور کلی رطوبت نسبی تأثیر منفی داشته که بیانگر کاهش آن و به تبع آن افزایش میزان ET_0 در منطقه است و نیز تأثیر مثبت سایر پارمترها حاکی از نقش هر یک از آنها در افزایش میزان ET_0 است. همچنین نتایج ضرایب تحلیل حساسیت متغیرهای هواشناسی و رتبه‌بندی آنها نشان داد که به ترتیب در فصول بهار، تابستان، پاییز و زمستان متغیرهای هواشناسی دمای کمینه، سرعت باد، سرعت باد و دمای بیشینه نقش بیشتری در افزایش ET_0 داشتند. یافته‌های پژوهش حاضر و نتایج رتبه‌بندی حساسیت عوامل مؤثر بر میزان ET_0 نشان داد که در هر دوره زمانی شرایط متفاوتی به لحاظ تأثیرگذار بودن عناصر هواشناسی بر میزان ET_0 حاکم است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر و با توجه به اینکه در حال حاضر بحران کمبود آب یکی از چالش‌های مهم جمعیت رو به رشد جهان بویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشکی مانند کشور ایران بوده و هست، از این‌رو شناخت هر یک از عناصر مؤثر بر میزان تغییرات ET_0 ، آگاهی از نیاز آبی گیاهان در زمان‌های مختلف و استفاده مناسب و بهینه از منابع آب برای مقابله با بروز تنش آبی و بحران کم‌آبی راهکار مناسبی خواهد بود. همچنین شناسایی میزان تأثیر هر یک از عناصر هواشناسی نسبت به تغییرات تبخیر تفرق مرجع حائز اهمیت فراوان بوده و می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب کشور نقش بسزایی داشته باشد. با در نظر گرفتن این مهم برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که تأثیر هر یک از عناصر هواشناسی را بر تبخیر تفرق مرجع در مناطق مختلف جغرافیایی و در زمان‌های مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار دهند.

در فصل پاییز نیز همچنان سرعت باد رتبه اول را در تأثیرگذاری میزان تبخیر تفرق به خود اختصاص داده است. در نهایت در فصل زمستان بیشینه دما در بین بقیه پارامترهای هواشناسی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار می‌باشد. بطور کلی بجز فصل پاییز در بقیه فصول رطوبت نسبی بالاترین نقش را در کاهش میزان ET_0 دارد و سایر عناصر در فصول مختلف سال با ضرایب مختلف بر افزایش میزان ET_0 نقش مؤثری ایفا می‌کنند.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، میزان تغییرات تبخیر تفرق مرجع بر اساس آمار بلند مدت هواشناسی از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۲۰ برای ۴۰ ایستگاه همدید شامل رطوبت نسبی، ساعت آفتابی، متوسط، بیشینه و کمینه دما و سرعت باد با استفاده از روش فائو پنمن مانیتیت ۵۶ برآورد شد و نتایج حاصل بصورت نقشه‌های پهنه‌بندی فصلی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای ارزیابی‌های آماری از آزمون‌های (مَن-کندال و روند نوآورانه) به منظور بررسی روند تغییرات ET_0 بررسی شد. سپس با استفاده از روش تحلیل حساسیت سُبُل و با بهره‌گیری از برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R تحلیل حساسیت ET_0 نسبت به عناصر مختلف هواشناسی ارزیابی شد و در نهایت ضریب حساسیت هر یک از متغیرهای تأثیرگذار بر میزان تغییرات ET_0 محاسبه و رتبه‌بندی شدند.

با توجه به نتایج حاصل از برآورد ET_0 فصلی می‌توان دریافت که در کشور ایران میزان ET_0 گرچه دارای افت و خیز بوده ولی بطور کلی در حال افزایش بوده است. بر اساس نتایج، برآورد ET_0 فصلی در گستره ایران افزایشی بوده و آرایش الگوی توزیع مکانی فصلی ET_0 حاکی از افزایش میزان آن از شمال به جنوب و از غرب به شرق می‌باشد. افزایش میزان ET_0 در نیمه شرقی ایران در سال‌های اخیر قابل توجه است. با استفاده از نتایج ارزیابی‌های آماری، روند تغییرات ET_0 نشان داد که طی دوره آماری مورد نظر؛ آزمون مَن-کندال داده‌های ET_0 بیشتر

1. Ahmad, M.U.D., Kirby, J.M., & Cheema, M.J.M. (2019). Impact of agricultural development on evapotranspiration trends in the irrigated districts of Pakistan: evidence from 1981 to 2012. *Water International*, 44(1), 51-73. <https://doi.org/10.1080/02508060.2019.1575110>
2. Ahmad, N.F.A., Askari, M., Harun, S., Fadhil, A.B., & Demun, A. S. (2017). Sensitivity analysis of a FAO Penman Monteith for potential evapotranspiration to climate change. *Jurnal Teknologi*, 79(7), 21-30. <http://dx.doi.org/10.11113/jt.v79.8377>
3. Ahmadi, M., Mirzaei, Z.S., & Dadashiroudbari, A. (2021). Investigation of seasonal distribution and abnormal trend of day and night surface temperature in Iran using MODIS sensor data. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(3), 351-364. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.323144.1007615>
4. Ahmadyan, M., Sobhani, B., & Jahanbakhsh Asl, S. (2023). Evapotranspiration changes of reference Crop during the growth stages of apple tree in Urmia and Semrom cities.. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 23(70), 21-36. (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1300.0.0.24.7>
5. 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. Rome: Fao.
6. Amiri, M., & Pourghasemi, H.R. (2019). Comparing different methods of potential evapotranspiration and studying temporal and spatial changes in the Mahalou Watershed using GIS. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19), 22-35. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22516174.1398.10.19.12.5>
7. Babaei, M. (2021). *Temporal and Spatial Assessment of Actual Evapotranspiration by Semi- Distributed Model and a Remote Sensing Method*. Ph.D. Dissertation in Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran. (In Persian with English abstract)
8. Blyth, E.M., Martinez-de la Torre, A., & Robinson, E.L. (2019). Trends in evapotranspiration and its drivers in Great Britain: 1961 to 2015. *Physical Geography: Earth and Environment*, 43(5), 666-693. <https://doi.org/10.1177/0309133319841891>
9. Cabral Junior, J.B., de Almeida, H.A., Bezerra, B.G., & Spyrides, M.H.C. (2019). Detecting linear trend of reference evapotranspiration in irrigated farming areas in Brazil's semiarid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1), 215-225. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-019-02816-w>
10. D'Andrea, M.F., Rousseau, A.N., Bigah, Y., Gattinoni, N.N., & Brodeur, J.C. (2019). Trends in reference evapotranspiration and associated climate variables over the last 30 years (1984–2014) in the Pampa region of Argentina. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3), 1371-1386. <https://doi.org/10.1002/wcc.316>
11. Dinpashoh, Y., & Foroghi, M. (2020). Application of Path Analysis in identification of dominant effective meteorological parameters on ET0 in West Azarbaijan. *Journal of Geographical Sciences*, 20(58), 163-180. (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1399.20.58.10.5>
12. Ebrahimi Haftcheshmeh, M. (2019). Zoning of potential reference crop evapotranspiration (ET0) in Kermanshah province. Master Thesis in Faculty of Science and Agricultural Engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
13. Fang, M. (2021). Variations and Sensitivity Analysis of Reference Evapotranspiration During 2010-2019 in the Zhangye Farmland Oasis, Northwest China. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-831426/v1>
14. Foroghi, M., Dinpashoh, Y., & Jahanbakhsh Asl, S. (2020). Impact of Climate Change on Reference Crop Evapotranspiration Trends in the west rejoin of Iran. *Journal of Climate Research*, 1398(37), 21-37. (In Persian with English abstract)
15. Gao, Z., He, J., Dong, K., & Li, X. (2017). Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.006>
16. Ghafouri-Azar, M., Bae, D.H., & Kang, S.U. (2018). Trend analysis of long-term reference evapotranspiration and its components over the Korean Peninsula. *Water*, 10(10), 1373. <https://doi.org/10.3390/w10101373>
17. Gong, L., Xu, C.Y., Chen, D., Halldin, S., Chen, Y.D. (2006). Sensitivity of the Penman–Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of hydrology*, 329(3-4), 620-629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>
18. Hu, S., Gao, R., Zhang, T., Bai, P., & Zhang, R. (2021). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and its climatic drivers over the Tibetan Plateau during 1970–2018. *Applied Sciences*, 11(17), 8013. <https://doi.org/10.3390/app11178013>
19. Hwang, J.H., Azam, M., Jin, M.S., Kang, Y.H., Lee, J.E., Latif, M., & Hashmi, M.Z. (2020). Spatiotemporal trends in reference evapotranspiration over South Korea. *Paddy and Water Environment*, 18(1), 235-259. <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00777-4>
20. Iran Meteorological Organization (2022). Product & Services Database.
21. Javan, K. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 138-119. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22034/hyd.2021.43326.1562>.

22. Kang, T., Li, Z., & Gao, Y. (2021). Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its determining climatic factors in the Taihang mountains, China. *Water*, 13(21), 3145. <https://doi.org/10.3390/w13213145>
23. Kazemi, M.H. (2020). Evaluation of different data driven methods in estimating reference evapotranspiration. Master Thesis in Faculty of Agriculture, Tabriz University, Tabriz. (In Persian with English abstract)
24. Kendall, M.G. (1948). Rank Correlation Methods. *New York*: Griffin.
25. Li, Y., Qin, Y., & Rong, P. (2022). Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman-Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmospheric Research*, 273, 106178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>
26. Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2018). Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: Historical trends and projected changes. *International Journal of Climatology*, 38(7), 2980-2993. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>
27. Lorestani, M. (2016). Evaluation and comparison of different (temperature based methods) for estimating reference evapotranspiration in different climates and that's Iran zoning with GIS. Master Thesis in Faculty of Agricultural sciences and engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
28. Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259. <https://doi.org/10.2307/1907187>
29. Mubialiwo, A., Onyutha, C., & Abebe, A. (2020). Historical rainfall and evapotranspiration changes over Mpologoma catchment in Uganda. *Advances in Meteorology*, 2020, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2020/8870935>
30. Niazi, Z. (2016). Evaluation and generalization of Mass transfer-based methods for calculating Reference Evapotranspiration across of Iran by GIS. Master Thesis in Faculty of Agricultural sciences and engineering, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
31. Nouri, M., & Bannayan, M. (2019). Spatiotemporal changes in aridity index and reference evapotranspiration over semi-arid and humid regions of Iran: trend, cause, and sensitivity analyses. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3), 1073-1084. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2543-0>
32. Piri, H., & Poozan, M. (2019). Evaluation of 24 models of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Iranian journal of Ecohedrility*, 6(3), 611-622. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2019.277302.1065>
33. Pour, S.H., Abd Wahab, A.K., Shahid, S., & Ismail, Z.B. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 246, 105096. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
34. Pravalie, R., Piticar, A., Roşca, B., Sfîca, L., Bandoc, G., Tiscovschi, A., & Patriche, C. (2019). Spatio-temporal changes of the climatic water balance in Romania as a response to precipitation and reference evapotranspiration trends during 1961–2013. *Catena*, 172, 295-312. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.028>
35. Rahman, M. A., Yunsheng, L., Sultana, N., & Ongoma, V. (2019). Analysis of reference evapotranspiration (ET₀) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131(3), 639-655. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0596-3>
36. Sadeghi, A., & Ahmadi, H. (2021). Evaluation of monthly reference evapotranspiration in Iran based on the output of CORDEX-MNA project downscaled dynamic models. *Physical Geography Research Quarterly*, 54(2), 185-202. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.332856.1007652>
37. Sobol, I.M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55 (1-3), 271-280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6)
38. Sobol, I.M. (1993). Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 4, 407-414.
39. Tavvoosi, T., Mansouri Daneshvar, M., & Movaqqari, A. (2012). The zonation of aridity intensity in Iran using Hargreaves- Samani evapotranspiration model based on digital elevation model (DEM). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(3), 95-110. (In Persian with English abstract). <https://sid.ir/paper/221119/en>
40. Wang, Q., Xu, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Xiang, J., Xu, Y., & Wang, J. (2020). Individual and combined impacts of future land-use and climate conditions on extreme hydrological events in a representative basin of the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 236, 104805. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104805>
41. Yahyavi Dizaj, A., Javan, K., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. (2023). Evaluation of changes in reference evapotranspiration in Iran over the last decades. *Desert Management*, 11(1), 39-58. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2023.2000984.1413>
42. Yamamoto, M. (2020). Ensemble simulations of the influence of regionally warm sea surface on moisture and rainfall in Tsushima Strait during August 2013. *Atmospheric Research*, 238, 104876. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104876>
43. Yang, L., Feng, Q., Adamowski, J. F., Yin, Z., Wen, X., Wu, M., & Hao, Q. (2020). Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration in northwest China based on CORDEX-EA. *Atmospheric Research*, 238, 104868. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104868>
44. Yang, Y., Chen, R., Song, Y., Han, C., Liu, J., & Liu, Z. (2019). Sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological factors and their elevational gradients in the Qilian Mountains, northwestern China. *Journal of*

- Hydrology*, 568, 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.069>
45. Zeraati Neyshabouri, S., Pourreza Bilondi, M., Khashei-Siuki, A., & Shahidi, A. (2022). Efficiency comparison of fuzzy regression models with the penman-monteith method in estimating of monthly reference evapotranspiration of Neyshabour plain. *Environment and Water Engineering*, 8(1), 205-217. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.283243.1555>.
46. Zhang, X., Wang, L., & Chen, D. (2019). How does temporal trend of reference evapotranspiration over the Tibetan Plateau change with elevation?. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2295-2305. <https://doi.org/10.1002/joc.5951>
47. Zhou, P., Liu, Z., & Cheng, L. (2020). An alternative approach for quantitatively estimating climate variability over China under the effects of ENSO events. *Atmospheric Research*, 238, 104897. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104897>

Contents

Evaluation of Irrigation Water Application and Water Footprint of Major Agricultural and Horticultural Crops in the Markazi Province	503
M. Goodarzi, F. Abbasi, A. Hedayatipour	
Estimation of Water Requirement of Different Phenological Stages of Green Cumin Plant in Different Regions of Isfahan Province	519
A.H. Jalali, H. Salemi	
Common Water Resources Conflict Analysis due to Agriculture Land Development Using Game Theory and GMCR+ (Case Study: Nazlouchay Basin in Urmia Lake Watershed)	531
M. Koohani, J. Behmanesh, V.R. Verdinejad, M. Mohammadpour	
Investigation on Phytoremediation Capability of Artiplex (<i>Atriplex</i> sp.) and Oleander (<i>Nerium oleander</i>) in Aradkooh Landfill for Cadmium and Lead	547
M. Rafati, M. Malekzade, M. Firoozi	
Evaluation of Different Levels of Nitrogen Fertilizer and Cow Compost on the Yield and Nitrate Uptake of <i>Allium hirtifolium</i> in FereydunShahr Region	561
Z. Khanmohammadi, A. Ahmadi	
The Effect of Rock Phosphate Acidification and Vermicompost on Phosphorus Release Kinetics in a Calcareous Soil	575
Z. Sokhanvar Mahani, N. Boroomand, M. Sarcheshmeh Pour	
Acid-modified Biochar Effect on Some Physiological Indicators and Micronutrient Availability of Quinoa (cv. Gizavan) in a Calcareous Soil	589
M. Bazi Abdoli, M. Barani Motlagh, A. Bostani, T. Nazar	
Comparing Soil Taxonomy and WRB Efficiency for the Classification of Gypsiferous-Calcareous Soils in the West of Kohgiluyeh-Boyerahmad Province	603
H.R. Owliaie	
Spatial-Temporal Analysis of Cloudiness Across the Iran	621
A. Gholami, H. Mir Mousavi, M. Jalali, K. Raispour	
Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN	643
A. Yahyavi Dizaj, T. Akbari Azirani, Sh. Khaledi, Kh. Javan	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 4

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).