

نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۳۸ شماره ۵

سال ۱۴۰۳

شماره پیاپی ۹۷

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

عنوان مقالات

- ۵۴۳ بررسی همدم‌های جذب نیترات توسط زغال‌های زیستی پوشش‌داده شده با آهن (III) و روی به کمک اولتراسونیک محمد رضا آلاشتی - مجتبی خوش‌روش - فردین صادق‌زاده - هازی محمد عظمت الله
- ۵۵۷ برآورد عمر مفید مخزن سد نگارستان با ترسیم منحنی هیپسومتریک به روش Strahler اصلاح‌شده و تصاویر ماهواره‌ای عبدالرضا ظهیری - خلیل قربانی - حامد فیض‌آبادی - حسین شریفان
- ۵۷۷ اثر کم‌آبیاری و کم‌آبیاری تنظیم شده بر عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه هندوانه نادیا بهره‌مند - حسین آروئی - احمد آیین
- ۵۹۳ ارتقاء کیفیت نقشه کاربری/پوشش اراضی با استفاده از برخی شاخص‌های طیفی در شهرستان سراب، آذربایجان شرقی علی سرابچی - حسین رضائی - فرزین شهبازی
- ۶۰۹ تأثیر بیوجار و کربن فعال حاصل از ضایعات آلی بر غیرمتحرک کردن فلزات سنگین (سرب، روی و کادمیوم) و رشد گیاه ذرت در خاک آلوده محمد ماله‌میر چگینی - احمد گلچین
- ۶۳۱ تحلیل روند دمای شمال غرب ایران بر اساس مقادیر فرین و ارتباط آن با گردش کلی جو خدیجه جوان - علیرضا موقری
- ۶۵۱ بررسی نقش پراوتفاع جنب‌حاره عربستان در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد ایران زمین هلاله فهیمی - عبدالله فرجی - بهلول علیجانی

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 38 شماره 5 آذر - دی سال 1403

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سرمدیر:

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

تقواییان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 543 بررسی همدماهای جذب نیترات توسط زغال‌های زیستی پوشش‌داده شده با آهن (III) و روی به کمک اولتراسونیک
محمد رضا آلاشتی - مجتبی خوش‌روش - فردین صادق‌زاده - هازی محمد عظمت الله
- 557 برآورد عمر مفید مخزن سد نگارستان با ترسیم منحنی هیپسومتریک به روش Strahler اصلاح‌شده و تصاویر ماهواره‌ای
عبدالرضا ظهیری - خلیل قربانی - حامد فیض‌آبادی - حسین شریفان
- 577 اثر کم‌آبیاری و کم‌آبیاری تنظیم شده بر عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه هندوانه
نادیا بهره‌مند - حسین آروئی - احمد آیین
- 593 ارتقاء کیفیت نقشه کاربری/پوشش اراضی با استفاده از برخی شاخص‌های طیفی در شهرستان سراب، آذربایجان شرقی
علی سراجی - حسین رضائی - فرزین شهبازی
- 609 تأثیر بیوجار و کربن فعال حاصل از ضایعات آلی بر غیرمتحرک کردن فلزات سنگین (سرب، روی و کادمیوم) و رشد گیاه ذرت در خاک آلوده
محمد ماله‌میر چگینی - احمد گلچین
- 631 تحلیل روند دمای شمال غرب ایران بر اساس مقادیر فرین و ارتباط آن با گردش کلی جو
خدیجه جوان - علیرضا موقری
- 651 بررسی نقش پرارتفاع جنب‌حاره عربستان در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد ایران زمین
هاله فهیمی - عبدالله فرجی - بهلول علیجانی

Investigation of Nitrate Adsorption Isotherms by Iron (III) and Zinc-coated Biochars Using Ultrasonic

M.R. Alashti¹, M. Khoshnavesh^{2*}, F. Sadegh-Zadeh³, H.M. Azamathulla⁴

1 and 2- Ph.D. Student of Irrigation and Drainage and Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.

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

3- Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Crop Sciences, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, The University of the West Indies, St. Augustine Campus, St Augustine, Trinidad and Tobago

Received: 01-02-2024	How to cite this article: Alashti, M.R., Khoshnavesh, M., Sadegh-Zadeh, F., & Azamathulla, H.M. (2024). Investigation of nitrate adsorption isotherms by iron(III) and zinc-coated biochars using ultrasonic assistance. <i>Journal of Water and Soil</i> , 38(5), 541-554. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86650.1379
Revised: 13-09-2024	
Accepted: 19-09-2024	
Available Online: 19-09-2024	

Introduction

The rapid growth and development of urban communities, coupled with the increased industrial and economic activities in recent years, have led to the production and release of various pollutants into the environment. These pollutants have adverse effects on human health, living organisms, and the overall environment. With limitations in water resources, insufficient rainfall, the looming risk of water crises in many countries, and the escalating pollution of surface and underground water, there is a pressing need for environmental solutions to mitigate these issues. It is important to acknowledge that wastewater often contains pollutants that may render it unsuitable for certain applications. The utilization of biochar derived from cost-effective materials and innovative technologies such as ultrasonics is one avenue that warrants exploration for enhancing water quality. In this approach, a nitrate solution is exposed to both an adsorbent and ultrasonic waves. This dual treatment induces changes in the physical and chemical properties of water, thereby offering potential improvements in water quality.

Materials and Methods

This study aimed to explore the impact of utilizing biochar derived from rice straw, which was coated with iron(III) and zinc cations, and subjected to ultrasonication, on the nitrate adsorption process from aqueous solutions. In order to produce biochar, cheap materials of rice straw were used. The chopped straw was placed in the electric furnace and heated for one hour to reach the desired temperature. Then it was kept at that temperature for 2 hours. After that, the obtained biochar was washed three times with distilled water at a ratio of 1:20 and dried in an oven at 70°C for 24 hours. In this study, two temperature levels, 350 °C and 650 °C, were used for biochar production. Based on the results from pre-tests, it was found that biochars produced at 650 °C exhibited higher nitrate removal efficiency. These biochars were then used for the continuation of the experiments. To optimize the adsorbent dose, pre-tests were conducted using doses of 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, and 1 gram of the adsorbent with 40 ml of nitrate solution. The concentrations of nitrate solution tested were 20, 45, 80, 100, 150, and 200 mg L⁻¹. The research involved conducting experiments to determine the optimal parameters for each treatment, with three repetitions conducted in the water quality laboratory of Sari agricultural sciences and Natural Resources University during the years 2021 and 2022. The treatments comprised biochar (B), biochar and ultrasonic (BU), biochar with iron(III) coating (BF), biochar



with iron(III) coating and ultrasonic (BFU), biochar with zinc coating (BZ), and biochar with zinc coating and ultrasonic (BZU). In this investigation, Langmuir and Freundlich adsorption isotherms were examined.

Results and Discussion

The results indicated that the BF and BFU treatments exhibited a higher maximum adsorption capacity. The Freundlich isotherm demonstrated higher correlation coefficients for BF, BFU, BZ, and B, suggesting a superior fit of the Freundlich model in these treatments. The better fit of the Freundlich adsorption isotherm indicates the heterogeneity of biochar surface adsorption sites, which means that the adsorption process is not confined to a single constituent layer. Nitrate adsorption on biochar surface is probably influenced by electrostatic adsorption and ion exchange. Conversely, the BZU and BU treatments showed a better fit with the Langmuir model. In the analysis of the Freundlich isotherm, n_f values revealed that BF, BFU, and BZ treatments exhibited a favorable adsorption state with a desirable curve shape. The B treatment displayed a normal adsorption state with a linear curve shape, while BU and BZU treatments showed a weak adsorption state with an unfavorable curve shape. The elevated values of adsorption capacity (K_F) obtained for BF, BFU, and BZ, namely 1909.414, 1484.22, and 386.63 ((mg g⁻¹)(L mg⁻¹)^{1/n}), respectively, underscore the high nitrate adsorption capacity of these treatments. Also, biochars coated with iron(III) and with iron solution concentration of 10000 mg L⁻¹ had a very good performance in removing nitrate from aqueous solutions. The new ultrasonic technology was able to improve the performance of the tested adsorbents in a period of 5 minutes without the need to stir the mixture of biochar and nitrate solution in the obtained equilibrium times, which were between 60 and 120 minutes. Application of this technology can be effective and useful in increasing the economic benefits of using limited water resources and increasing the efficiency of water consumption.

Conclusion

The utilization of cost-effective biochars derived from rice straw, along with the application of ultrasonic technology, can substantially decrease nitrate levels in aqueous solutions. In the case of biochar with iron(III) coating, biochar with iron(III) coating combined with ultrasonic treatment, and biochar combined with ultrasonic treatment, there is a notable affinity for nitrate to be adsorbed onto the surface of the adsorbent.

Keywords: Adsorbent, Adsorption capacity, Freundlich, Linear isotherm

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر - دی ۱۴۰۳، ۵۵۴-۵۴۱

بررسی همدماهای جذب نیترات توسط زغال‌های زیستی پوشش داده شده با آهن (III) و روی به کمک اولتراسونیک

محمد رضا آلاشتی^۱ - مجتبی خوش‌روش^{۲*} - فردین صادق‌زاده^۳ - هازی محمد عظمت الله^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹

چکیده

نیترات یکی از مهم‌ترین آلاینده‌ها در منابع آبی می‌باشد که سبب بروز مشکلات زیست‌محیطی و بهداشتی می‌شود. این پژوهش با هدف بررسی همدماهای جذب لانگمویر و فروندلیچ، در توصیف جذب نیترات توسط اشکال مختلف زغال‌های زیستی انجام شد. در این پژوهش پس از انجام پیش‌آزمایشات بهینه‌سازی دوز جاذب در نسبت‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۸ و ۱ گرم از جاذب و ۴۰ میلی‌لیتر محلول نیترات، غلظت‌های ۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر محلول نیترات (از منبع نیترات پتاسیم) مورد بررسی قرار گرفت. تیمارهای آزمایشی شامل زغال زیستی (B)، زغال زیستی و اولتراسونیک (BU)، زغال زیستی با پوشش آهن (III) (BF)، زغال زیستی با پوشش روی (BFU)، زغال زیستی با پوشش آهن (III) و اولتراسونیک (BZU) و اولتراسونیک (BZ) و زغال زیستی با پوشش روی و اولتراسونیک (BZU) و تعداد تکرار ۳ عدد بود. نتایج نشان داد تیمارهای BF و BFU به‌ترتیب با مقادیر جذب ۳/۳۴ و ۳/۶۶ میلی‌گرم بر گرم دارای ماکزیمم ظرفیت جذب بود. همدمای فروندلیچ، با توجه به مقادیر ضرایب تعیین بالاتر و RMSE کمتر برازش بهتری را برای داده‌های جذب نشان داد. در بررسی همدمای فروندلیچ، مقادیر n (درجه‌ی همگنی سطوح جذب‌کننده)، برای تیمارهای BF و BFU (با مقادیر بین ۲ تا ۱۰) نشان‌دهنده‌ی همدمای از نوع مطلوب بود. مقادیر بالای ظرفیت جذب (K_F) به‌دست آمده برای BF و BFU که به‌ترتیب ۱۹۰۹/۴۱۴ و ۱۴۸۴/۲۲ $(\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n}$ است، نشان‌دهنده‌ی ظرفیت جذب بالای این جاذب‌ها برای نیترات است. مقایسه‌ی مقادیر به‌دست آمده برای درصد حذف نیترات از محلول، ضریب تعیین همدمای نیترات جذب‌شده در واحد وزن ماده‌ی جذب‌کننده (Q_e)، نشان داد اولتراسونیک اثرات مثبتی بر فرآیند جذب نیترات توسط بیوجار دارد.

واژه‌های کلیدی: جاذب، ظرفیت جذب، فروندلیچ، همدمای خطی

مقدمه

آب‌های سطحی و زیرزمینی از طرف دیگر، تلاش‌ها برای یافتن راه‌حل‌های زیست‌محیطی برای حذف آلاینده‌ها از منابع آبی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند (Abd-Elaty et al., 2022). تخمین‌های اولیه نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که بیش از یک میلیارد و صد میلیون نفر در جهان به نوعی با مشکل تأمین آب سالم روبه‌رو هستند (Westlund, 2014). اثرات آلودگی آب‌های زیرزمینی و سطحی به

صنعتی شدن و افزایش جمعیت در طول سالیان متمادی، سبب وخیم شدن سطح کیفیت آب شده است (Sainan & Sartaj, 2016). محدودیت‌های موجود در منابع آب، کمبود بارش‌ها، خطر بحران آب در کشورها و اهمیت بازیابی مجدد آب از یک طرف و افزایش آلودگی

۱ و ۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.khoshnavesh@sanru.ac.ir)

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

۴- استاد گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه هند غربی، ترینیداد و توباگو

گرفته شده است (Tang et al., 2019). جذب سطحی فرایندی می باشد که در طی آن مولکول های ماده ی جذب شونده موجود در یک محلول به سمت سطوح داخلی و خارجی یک ماده ی جاذب کشیده شده و تجمع می یابند. محققان همواره به دنبال انتخاب موادی ارزان قیمت برای جاذب ها هستند که بتوانند به عنوان جایگزین های ارزان، در دسترس و دوستدار محیط زیست مورد استفاده قرار گیرند. زغال زیستی^۶ نوعی ماده ی آلی سیاه رنگ مقاوم به تجزیه، دانه ریز و غنی از کربن است، که به وسیله ی حرارت دادن زیست توده هایی مانند پسماندهای آلی، بقایای گیاهی، چوب، کود دامی، فاضلاب و غیره در شرایط محدود یا عاری از اکسیژن تولید می شود. نام های دیگر این ماده کربن سیاه و اگرچار^۷ می باشد (Miler et al., 2011). با توجه به هم نامی و منفی بودن بار زغال های زیستی و نیترا، استفاده از پل های کاتیونی نظیر آهن سه ظرفیتی، روی، منگنز و غیره می تواند در پژوهش های مربوط به جذب نیترا و دیگر آلاینده های آنیونی با بار منفی مورد استفاده قرار گیرد. فراستی و صیادی (Farasati & Saiadi, 2023) در ارزیابی توانایی کربن فعال به عنوان جاذب در خارج سازی نیترا از آب، به بررسی اثر زمان تماس در زمان های ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه پرداختند و بیان کردند که میزان جذب نیترا، در ۶۰ و ۱۲۰ دقیقه به حداکثر میزان خود رسید. همچنین این محققان نشان دادند حداکثر جذب نیترا توسط کربن فعال در pH=2 رخ داد و با افزایش غلظت اولیه ی نیترا، راندمان حذف افزایش یافت به نحوی که بیشترین راندمان در غلظت ۱۰۰ میلی گرم بر لیتر برابر با ۸۸/۸۶ درصد تعیین شد. قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2022) کارایی سه جاذب زغال زیستی باگاس نیشکر، سرامیک شکسته شده و کوکوپیت در جذب نیترا از محلول آبی را بررسی کردند. در این تحقیق از روش سطح پاسخ بر مبنای طرح باکس بنکن جهت ارزیابی اثر متغیرهای مستقل pH، دما و مقدار جاذب بر عملکرد پاسخ (جذب نیترا) استفاده شد که نتایج حاکی از آن بود که با افزایش مقدار جاذب و زمان تماس میزان جذب نیترا افزایش یافته در حالی که با افزایش pH و غلظت اولیه ی نیترا کارایی حذف آن کاهش می یابد. همچنین نتایج بررسی هم دماهای آن ها نشان داد که هر ۳ جاذب مورد مطالعه، سازگاری بیشتری با مدل لانگمویر داشتند. دهقان و همکاران (Dehgan et al., 2021) کارایی حذف نیترا توسط جاذب برگ راش در آزمایش های پیوسته (روش استفاده از ستون های جاذب) و ناپیوسته (سنتیک جذب) را مورد بررسی قرار دادند. در طی آزمایش های ناپیوسته، اثرات pH، زمان تماس، جرم

نیترا در بسیاری از مناطق دنیا به صورت یک مشکل جدی مطرح است. این موضوع در قرن گذشته به دلیل وجود مواد مغذی ناشی از فعالیت های کشاورزی فشرده و تخلیه ی فاضلاب شهری تشدید شده است، که منجر به بروز اتروفیکاسیون^۱ (غنی شدن محیط های آبی از ترکیبات محلول است که رشد بیش از اندازه ی برخی جانداران زنده را سبب می شود (Serediak et al., 2014)) و هیپوکسی^۲ (کمی اکسیژن) در اکوسیستم های آبی شده است (Reusch et al., 2018). یون نیترا نسبتاً غیرسمی است اما احیای آن توسط میکروارگانیسم ها به نیتريت می تواند خطرات بهداشتی جدی را برای انسان ایجاد نماید. از جمله بیماری متهموگلوبینی^۳ (اختلال خونی که در آن گلوبول های قرمز با هموگلوبین غیرطبیعی تولید می شود) که به دلیل اتصال نیتريت به هموگلوبین خون ایجاد می شود می تواند دارای اثر کشندگی به ویژه برای نوزادان باشد (Alashti et al., 2024)، علاوه بر این تشکیل نیتروزامین توسط نیتريت می تواند خطر ابتلا به سرطان دستگاه گوارش را افزایش دهد (Mook et al., 2012). از دیگر اثرات نیترا می توان به بیماری سندروم کودک آبی^۴ (این سندروم در نوزاد و در اثر کاهش میزان هموگلوبین در خون نوزاد ایجاد می شود و در نتیجه ی آن پوست بدن نوزاد در برخی نواحی کبود و به رنگ آبی در می آید)، اختلال در تیروئید، گواتر، افزایش فشار خون، کمبود ویتامین A، اختلالات تولید مثل، سقط جنین و کاهش شیر در دام اشاره نمود (Shakeri et al., 2017). تمامی این موارد حذف نیترا را از آب برای مطابقت با محدودیت مجاز سازمان بهداشت جهان (WHO) که به میزان ۴۵ میلی گرم در لیتر در آب آشامیدنی می باشد، برای رفع نگرانی های بهداشتی ضروری می کند (Caravelli et al., 2012). بنابراین حذف یون های نیترا از آب به دلیل نگرانی های بهداشتی آن ضروری است. در این راستا آرایه ی روش هایی به منظور کاهش نیترا از آب های آلوده، امری لازم و اجتناب ناپذیر می باشد.

تبادل یونی^۵، اسمز معکوس^۶، دنیتریفیکاسیون بیولوژیکی^۷ و احیای شیمیایی^۸ از جمله روش هایی هستند که تاکنون برای حذف نیترا از آب مورد استفاده قرار گرفته اند. روش های ذکر شده ضمن آن که اثرات احتمالی جانبی بر روی آب دارند از نظر اقتصادی نیز بعضاً گران قیمت هستند (Karimi et al., 2010). در میان این روش ها، جذب سطحی به ویژه با استفاده از زغال زیستی در سال های اخیر به دلیل کارایی بالاتر، مقرون به صرفه بودن، سهولت استفاده و سازگاری با محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. زغال زیستی به عنوان یک ماده ی امیدوارکننده برای حذف نیترا و آمونیوم در نظر

6- Reverse Osmosis
7- Biological Denitrification
8- Chemical Reduction
9- Biochar
10- Agrichar

1- Eutrophication
2- Hypoxia
3- Methemoglobinemia
4- Blue Baby
5- Ion-exchange

محلول‌ها مخلوط شدند. سپس مخلوط به مدت ۲۴ ساعت بر روی شیکر تکان داده شد. پس از آن جاذب‌های پوشش داده شده سه بار با آب مقطر به نسبت ۱:۲۰ شسته و در آن با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند (Zameni et al., 2016). با توجه به عملکرد بهتر زغال زیستی پوشش داده شده‌ی آهن (III) با غلظت محلول ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر و زغال زیستی پوشش داده شده روی با غلظت محلول ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر در حذف نیترات، از این ۲ پوشش برای ادامه‌ی آزمایش‌ها استفاده شد.

آماده‌سازی محلول نیترات

برای تهیه‌ی غلظت‌های مختلف نیترات (۲۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر) از نمک نیترات پتاسیم (KNO_3) ساخت شرکت مرک آلمان استفاده شد. تنظیم pH محلول‌ها نیز در مقادیر ۲، ۴، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ توسط هیدروکسید سدیم ۱ نرمال و اسید هیدروکلریک ۱ نرمال انجام شد.

دستگاه اولتراسونیک

در این پژوهش از دستگاه اولتراسونیک مدل FS-450 با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و توان ۴۵۰ وات برای تولید امواج فراصوت استفاده شد. به منظور بررسی اثر اولتراسونیک بر فرآیند جذب نیترات با زغال زیستی، در طول آزمایش‌های مربوط به فراصوت، نمونه‌های مخلوط شده با جاذب به مدت ۵ دقیقه در معرض امواج اولتراسونیک قرار گرفتند.

اعمال تیمار

در این پژوهش، با در نظر گرفتن نوع جاذب و اعمال یا عدم اعمال اولتراسونیک در مجموع ۶ تیمار برای جذب نیترات به شرح ذیل در نظر گرفته شد:

۱. زغال زیستی (B)
۲. زغال زیستی با پوشش آهن (III) (BF)
۳. زغال زیستی با پوشش روی (II) (BZ)
۴. زغال زیستی به همراه اولتراسونیک (BU)
۵. زغال زیستی با پوشش آهن (III) به همراه اولتراسونیک (BFU)
۶. و زغال زیستی با پوشش روی (II) به همراه اولتراسونیک (BZU)

در تمامی آزمایش‌ها تعداد تکرارها ۳ در نظر گرفته شد و مقادیر بهینه‌ی زمان تعادل، pH و دوز جاذب بدست آمده برای هر تیمار در پیش‌آزمایش‌ها، در آزمایش نهایی لحاظ شده‌است که در جدول ۱ ذکر شده‌است.

جاذب و غلظت‌های اولیه‌ی نیترات بر حذف نیترات بررسی شد. نتایج بیانگر این موضوع بود که با افزایش pH، بازدهی و ظرفیت جذب کاهش می‌یابد. مدل‌های توماس^۱، دوز-پاسخ^۲ و یون-نلسون^۳ بر نتایج حاصل از آزمایش‌های پیوسته برازش داده شدند و مدل توماس با دقت بالایی بر داده‌های آزمایشگاهی برازش یافت. الماسی و همکاران (Almasi et al., 2017) با بررسی حذف فنل از محلول‌های آبی توسط عوامل اکساینده‌ی پراکسید هیدروژن، پرسولفات و پریدات (یک اکسی‌آنیون از عنصر ید) فعال‌سازی شده با امواج فراصوت نشان دادند فرایند توام اولتراسونیک و پرسولفات در شرایط بهینه‌ی بهره‌برداری نسبت به دو فرآیند دیگر (پراکسید هیدروژن و پریدات فعال‌سازی شده با امواج فراصوت) دارای بیشترین راندمان بوده و پرسولفات می‌تواند به‌عنوان اکسیدکننده‌ای مناسب به همراه اولتراسونیک در حذف فنل در محیط‌های آبی مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته تاکنون پژوهشی در رابطه با بررسی و مقایسه‌ی همدماهای جذب لانگمویر و فروندلیچ در فرآیند جذب نیترات در حضور اولتراسونیک توسط زغال‌های زیستی پوشش داده شده با آهن (III) و روی انجام نشده‌است؛ لذا این تحقیق با هدف بررسی تأثیر کاربرد زغال زیستی، زغال زیستی با پوشش‌های آهن (III) و روی (II) بر کاهش نیترات از محلول آبی و اثر اولتراسونیک بر فرآیندهای مذکور انجام شد.

مواد و روش‌ها

ساخت زغال زیستی

به منظور تولید زغال زیستی، مواد ارزان قیمت کاه برنج خرد شده با اندازه‌ی متوسط قطعات ۲ تا ۳ سانتی‌متر، درون کوره‌ی برقی و بدون حضور اکسیژن قرار داده شد و به مدت یک ساعت حرارت داده شد تا به دمای ۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد رسید (پرولیز کامل) و پس از آن به مدت ۲ ساعت در این دما نگهداری شد. بعد از آن زغال زیستی به دست آمده ۳ بار توسط آب مقطر با نسبت ۱:۲۰ شسته شد و در آن با دمای ۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک گردید.

پوشش‌دار کردن زغال‌های زیستی

با هدف ایجاد پل‌های کاتیونی در ساختمان زغال زیستی، محلول‌هایی با حل کردن کلرید روی ($ZnCl_2 \cdot 4H_2O$) و کلرید آهن (III) ($FeCl_3 \cdot 6H_2O$) در آب مقطر تهیه شد. غلظت‌های ۱۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای Fe^{3+} و ۱۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰ و ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر برای Zn^{2+} استفاده شد. پس از آماده شدن محلول‌ها، زغال‌های زیستی به نسبت یک گرم جاذب به ۵۰ میلی‌لیتر محلول در

جدول ۱- شرایط بهینه‌ی به دست آمده در پیش‌آزمایش‌ها برای تیمارهای مختلف
Table 1- Optimal conditions obtained in pre-tests for different treatments

پارامتر Parameter	BZU	BZ	BFU	BF	BU	B
زمان تعادل Equilibrium time (min)	5.0	120.0	5.0	60.0	5.0	60.0
pH	10.0	2.0	7.0	4.0	2.0	2.0
دوز جاذب Adsorbent dose (g l ⁻¹)	7.5	25.0	25.0	25.0	7.5	25.0
ظرفیت جذب نیترات Nitrate adsorption capacity (mg g ⁻¹)	5.8	1.0	3.1	3.0	4.1	0.9

B: زغال زیستی، BU: اولتراسونیک و زغال زیستی، BZ: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر،

BZU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر،

BF: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

BFU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر.

B; Biochar, BU; Ultrasonic and biochar, BZ; Biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹,

BZU; Ultrasonic and biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹,

BF, biochar (650 °C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹,

BFU, ultrasonic and biochar (650°C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹.

درجه‌ی سانتی‌گراد انجام شد. پس از پایان زمان تماس جاذب و جذب‌شونده، نمونه‌ها با استفاده از کاغذ صافی و فیلتر سرنگی با اندازه‌ی منافذ ۰/۲۲ میکرومتر (Econofilter 0.22 μm PTFE) صاف شدند و غلظت نیترات باقی‌مانده در آن مطابق روش زیر اندازه‌گیری گردید.

روش‌های اندازه‌گیری نیترات

روش ارائه شده توسط کاتالدو و همکاران (Cataldo et al., 1975) برای اندازه‌گیری مقدار باقیمانده‌ی نیترات در محلول‌های آزمایش استفاده شد. در این روش پس از آماده‌سازی نمونه‌های آزمایش‌ها، شاهد و استاندارد، ۰/۵ میلی‌لیتر از نمونه‌ها را درون فالکون‌های ۵۰ میلی‌لیتری ریخته و به آن ۱ میلی‌لیتر از اسید سالیسیک ۵ درصد (که با نسبت ۵ گرم اسید سالیسیک در ۹۵ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ ۹۶ درصد ساخته می‌شود) افزوده شد. نمونه‌ها محکم تکان داده شدند و به مدت ۱۵ دقیقه بر روی شیکر با سرعت ۲۵۰ دور بر دقیقه قرار داده شدند. در این مرحله نمونه‌ها به رنگ صورتی تا قرمز کم‌رنگ دیده می‌شوند. سپس به محلول‌ها میزان ۱۰ میلی‌لیتر هیدروکسید سدیم ۴ نرمال اضافه شده و پس از تکان دادن با دست، برای حدود ۳۰ دقیقه بر روی شیکر قرار داده شد که در این مرحله نمونه‌ها بسته به میزان نیترات آن‌ها به رنگ‌های زرد تا فسفری دیده می‌شوند. با توجه به تعداد نمونه‌ها و سرد شدن نمونه‌ها و امکان رسوب و تخریب آن‌ها می‌توان زمان ملدن نمونه‌ها در ۲

با توجه به نتایج پیش‌آزمایش‌ها مقدار نیترات جذب‌شده با کاهش pH محلول برای تیمارها افزایش یافت و به حداکثر جذب در سطوح pH ۲ و ۴ رسید. در مقادیر pH بالاتر، به دلیل افزایش مکان‌های دارای بار منفی روی سطح جاذب که ناشی از برهمکنش‌های الکترواستاتیکی می‌باشد، جذب کمتر یا دافعه‌ی بیشتری وجود دارد. کیلیما و همکاران (Kilpimaa et al., 2015) نیز خاطرنشان کردند که سطح جاذب در شرایط قلیایی دارای بار منفی است که منجر به دفع بین نیترات و بار سطحی جاذب می‌شود و در نتیجه از جذب نیترات جلوگیری می‌کند. برای انجام آزمایش‌ها ابتدا با توجه به دوز جاذب بهینه‌ی به دست آمده برای هر تیمار، مقدار مورد نیاز از هر یک از جاذب‌ها درون لوله‌ی سانتریفیوژ ۵۰ میلی‌لیتری ریخته شد و ۴۰، ۴۵، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر به لوله‌ها افزوده شد و در مدت زمان تعادل مورد نظر برای هر جاذب، شیک شدند. در تیمارهای همراه با اولتراسونیک به همین نسبت جاذب و محلول نیترات مخلوط شده و به مدت ۵ دقیقه تحت امواج فراصوت قرار گرفتند. در تیمارهای توام با اولتراسونیک از دستگاه اولتراسونیک FS-450 استفاده شد. این دستگاه دارای این قابلیت می‌باشد که علاوه بر گسیل امواج به صورت پیوسته، امواج مافوق صوت را به صورت غیرپیوسته و با فاصله‌ی زمانی چند ثانیه مکث نیز گسیل دهد که با انتخاب حالت غیرپیوسته به دلیل فاصله‌ی زمانی اعمال شده دمای محلول تغییرات محسوسی نداشت. در این پژوهش کلیه‌ی آزمایش‌ها در دمای ۲۵

جدول ۲- مقادیر مختلف R_L
Table 2- Different values of R_L

وضعیت جذب سطحی Surface adsorption state	مقادیر R_L R_L values
نامطلوب Undesirable	$R_L > 1$
خطی Linear	$R_L = 1$
مطلوب Desirable	$0 < R_L < 1$
برگشت‌پذیر Reversible	$R_L = 0$

همدمای فروندلیچ

از مدل فروندلیچ برای توصیف جذب سطحی در چند لایه و در سطوح ناهمگن استفاده می‌شود. در مدل مذکور فرض شده است که سطح از نظر انرژی دارای توزیع غیریکنواختی می‌باشد. فرم غیرخطی و خطی معادله‌ی فروندلیچ در معادلات (۵) و (۶) ارائه شده‌است. در این پژوهش از فرم خطی معادله‌ی فروندلیچ استفاده شد.

$$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

$$\log q_e = \log k_f + \frac{1}{n} (\log C_e) \quad (6)$$

در روابط فوق، $K_F ((\text{mg g}^{-1})(\text{L mg}^{-1})^{1/n})$ و n (بدون بعد)، به‌ترتیب ثابت‌هایی هستند که با ظرفیت جذب و شدت جذب مرتبط هستند (Yazdani Sheldarreh et al., 2018). ظرفیت جذب K_F داده‌های جذب را در حالت عملی به خوبی توصیف کرده و می‌توان بر اساس آن ظرفیت جذب جاذب‌ها را برای آلاینده‌های مورد نظر بررسی نمود. به این صورت که هر چه K_F بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده بالاتر بودن ظرفیت جذب جاذب برای ماده‌ی جذب‌شونده می‌باشد. درحالی که n بیان‌کننده‌ی نحوه‌ی توزیع ذرات مواد جذب‌شونده به سطح ماده‌ی جاذب می‌باشد و هر چه مقدار آن به صفر نزدیک‌تر باشد ناهمگنی سطح افزایش یافته و نشان‌دهنده‌ی شرایط جذب آلاینده در سطح جاذب است. بازه‌ی مقادیر پارامتر n در جدول ۳ نشان داده شد (Jaafarzadeh et al., 2012). در بررسی مدل فروندلیچ با رسم نمودار (بر روی محور عمودی نمودار) بر حسب $\log(C_e)$ (بر روی محور افقی نمودار) خط مستقیمی به‌دست آمده که از شیب و عرض از مبدأ آن به‌ترتیب $1/n$ و $\log(K_F)$ حاصل می‌شود.

مرحله‌ی قبلی بر روی شیکر را کوتاه‌تر در نظر گرفت. پس از انجام مراحل مذکور برای خواندن نمونه‌ها و تعیین میزان جذب نیترات از محلول‌ها از اسپکتروفتومتر مدل SP-UV 300SRB در طول موج ۴۱۰ نانومتر استفاده شد. برای محاسبه‌ی درصد جذب نیترات توسط زغال‌های زیستی از معادله‌ی زیر استفاده شد. در این معادله، C_0 غلظت اولیه‌ی نیترات در محلول (میلی گرم بر لیتر)، C_e غلظت تعادلی نیترات در محلول (میلی گرم بر لیتر) و R درصد حذف نیترات می‌باشد.

$$\%R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

همدمای لانگمویر

این همدمای در زمینه‌ی جذب سطحی تک‌لایه معتبر بوده و در آن فرض شده است که مناطق جذب واقع بر سطح جاذب به‌صورت یکنواخت می‌باشد و همگی دارای قدرت جذب مشابه هستند. فرم خطی و غیرخطی همدمای لانگمویر در رابطه‌های (۲) و (۳) بیان شده است که در آن q_e میزان نیترات جذب شده در واحد جرم جاذب (mg g^{-1})، Q_m ماکزیمم ظرفیت جذب، C_e غلظت نیترات تعادلی در محلول بعد از رسیدن به حالت تعادل (mg L^{-1})، و K_L شدت جذب تعادلی همدمای لانگمویر (L mg^{-1}) می‌باشد. با رسم نمودار $\frac{1}{q_e}$ (بر روی محور عمودی) در برابر $\frac{1}{C_e}$ (بر روی محور افقی) خط راستی به‌دست می‌آید که از عرض از مبدأ و شیب این نمودار به‌ترتیب $\frac{1}{Q_m \times K_L}$ و $\frac{1}{Q_m}$ به‌دست آمده و از این مقادیر، مقدار پارامترهای K_L و Q_m به‌دست می‌آید. در این پژوهش از فرم خطی همدمای لانگمویر استفاده شد.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{k_f Q_m} \times \left(\frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{Q_m} \quad (2)$$

$$q_e = \left(\frac{Q_m \times k_f \times C_e}{1 + k_f C_e} \right) \quad (3)$$

ضریب K_L به انرژی جذب وابسته بوده و با تخمین آن می‌توان پارامتر تعادلی^۱ یا فاکتور جداسازی^۲ را که معیار مناسبی برای تعیین کارایی مدل در توصیف داده‌های جذب می‌باشد، طبق رابطه‌ی ۴ محاسبه کرد. بازه‌ی مقادیر این پارامتر در جدول ۲ نشان داده شد. مطابق جدول فقط مقادیر R_L بین صفر و یک بیانگر این موضوع می‌باشد که جذب سطحی آلاینده بر روی جاذب در وضعیت مطلوبی قرار دارد.

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e} \quad (4)$$

جدول ۳- مقادیر مختلف n

Table 3- Different values of n

شکل منحنی	وضعیت جذب	مقادیر n
Curved Shape	Adsorption Status	The Values of n
نامطلوب	ضعیف	$n < 1$
Undesirable	Weak	
خطی	معمولی	$1 < n < 2$
Linear	Normal	
مطلوب	خوب	$2 < n < 10$
Desirable	Good	

آخرین منحنی همدمای نوع ششم تقسیم‌بندی آیوپاک می‌باشد که یک مورد خاص بوده که جذب گام به گام لایه‌ها را روی سطح یکنواخت و غیرمتخلخل، خصوصاً سطوح نامتقارن کروی شکل و غیرقطبی نشان می‌دهد. مقدار تیزی هر مرحله جذب به میزان دما و همگن بودن سطح جاذب بستگی دارد (Farrokhphey et al., 2019).

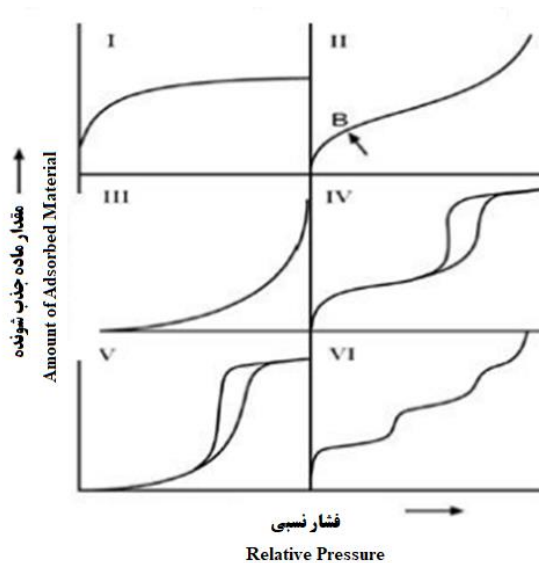
نتایج و بحث

مقدار نیترات جذب‌شده توسط تیمارهای آزمایش از محلول‌ها در غلظت‌های تعادلی به‌دست‌آمده در شکل ۲ نشان داده‌شده‌است. همدمای L شکل برای BF، BFU و BU نشان می‌دهد که نیترات میل نسبتاً بالایی برای جذب روی سطح جاذب از خود نشان می‌دهد که با یافته‌های ولنگ و همکاران (Wang et al., 2007) مطابقت دارد.

کرینی و بادوت (Crini & Badot, 2008) نیز اشاره کردند که منحنی L شکل نشان‌دهنده تمایل زیاد نیترات به جذب بر روی سطح جاذب در غلظت‌های پایین است و با افزایش غلظت پوشش روی سطح جاذب، شیب منحنی کاهش می‌یابد. با توجه به شکل منحنی در تیمار BF، این همدمای برگشت‌پذیر نوع اول بوده که در فشار نسبی موجود، مقدار جذب‌شونده، مقداری مشخص است و مربوط به همدمای جذب مواد میکروخفزه می‌باشد. تیمار BFU مطابق با همدمای نوع دوم است که به‌طور معمول برای مواد غیرمتخلخل و یا جاذب‌های ماکروخفزه که حاوی تعداد نامحدودی از لایه‌های جذب‌شونده هستند، می‌باشد. این تفاوت شکل منحنی و تغییر همدمای نوع اول به همدمای نوع دوم در این جاذب، ناشی از اثر اولتراسونیک در فرآیند جذب نیترات می‌باشد. منحنی تیمارهای BZ و BU که مشابه با همدمای نوع ششم تقسیم‌بندی آیوپاک می‌باشد، یک مورد خاص بوده که جذب گام به گام لایه‌ها را روی سطح یکنواخت و غیرمتخلخل، خصوصاً سطوح نامتقارن کروی شکل و غیرقطبی نشان می‌دهد (Farrokhphey et al., 2019).

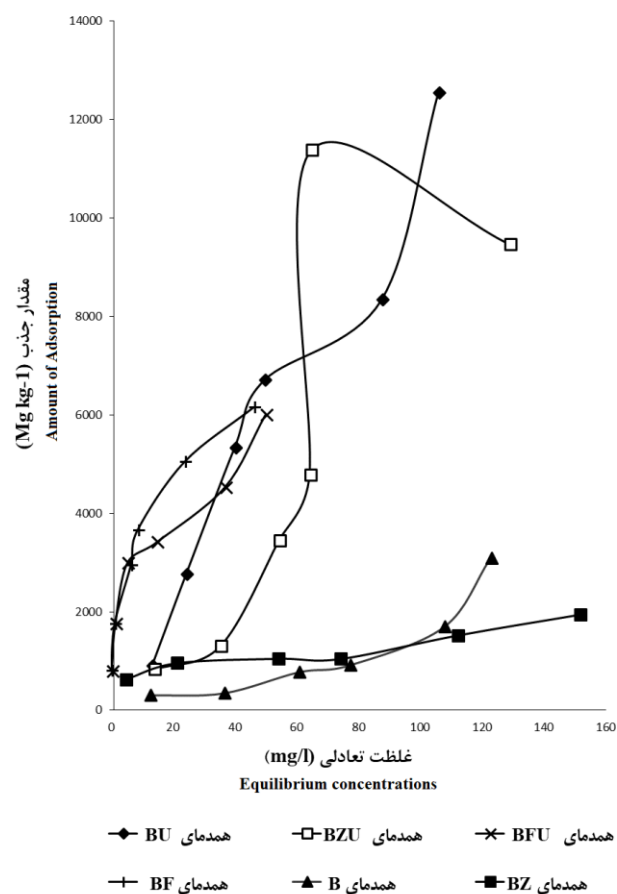
تقسیم‌بندی همدماهای جذب به روش آیوپاک

براساس مطالعات گسترده‌ی (Brunauer et al., 1938) در سال ۱۹۸۵ آیوپاک همدماهای جذب را به شش دسته تقسیم‌بندی کرد. با توجه به شکل ۱ منحنی اول همدمای برگشت‌پذیر نوع اول بوده که نمودار مقدار جذب‌شونده بر حسب گرادیان (فشار) نسبی آن مقعر است و در فشار نسبی موجود، مقدار جذب‌شونده، مقداری مشخص است. این نوع نمودار، در جذب فیزیکی همدمای جذب مواد میکروخفزه دیده می‌شود. پر شدن میکروخفزه‌ها و در نهایت جذب بالا، در فشارهای نسبی پایین مشاهده شده و در این نوع همدما، تنها چند لایه جذب اتفاق می‌افتد. منحنی دوم همدمای نوع دوم بوده که به‌طور معمول برای مواد غیرمتخلخل و یا جاذب‌های ماکروخفزه که حاوی تعداد نامحدودی از لایه‌های جذب‌شونده هستند، می‌باشد. نقطه‌ی پیچ که نقطه‌ی تغییر جهت تقعر نمودار است، در واقع نقطه‌ای است که در آن اولین لایه‌ی جذب‌شونده کامل شده و جذب لایه‌های بعدی شروع می‌شود. منحنی سوم همدمای برگشت‌پذیر نوع سوم بوده و نمودار مقدار جذب‌شونده بر حسب فشار نسبی به‌صورت محدب می‌باشد که در واقع نشان‌دهنده برهمکنش نسبتاً ضعیف بین جاذب و جذب‌شونده بوده و برهمکنش بین جذب‌شونده-جذب‌شونده نقش بسیار مهمی را بازی می‌نماید. این نوع همدما خیلی مرسوم نیست اما جذب نیتروژن روی پلی‌اتیلن و یا جذب بخار آب روی صفحه‌ی گرافیتی، نمونه‌هایی از این نوع همدما هستند. همدمای نوع چهارم در رابطه با به مواد مزوخره می‌باشد و مهمترین مشخصه‌ی آن، هیستریزس لوپ است که مربوط به میعان‌ات خفزه‌ها است. جذب محدود در فشارهای نسبی بالا، منجر به مسطح شدن همدما می‌شود که نشان‌دهنده‌ی پر بودن کامل خفزه‌ها است. قسمت اول این همدما شبیه به همدمای نوع دوم است. پنجمین نمودار، منحنی نوع پنجم تقسیم‌بندی آیوپاک بوده که همدمای نوع پنجم نیز در میعان‌ات خفزه‌ها و هیستریزس مشاهده می‌شود. اگر چه برخلاف همدمای نوع چهارم، قسمت اول شاخه‌ی جذب شبیه به همدمای نوع سوم است که نشان‌دهنده برهمکنش ضعیف بین جاذب و جذب‌شونده می‌باشد.



شکل ۱- انواع همدماهای جذب براساس مقدار ماده‌ی جذب‌شونده برحسب فشار نسبی

Figure 1- Types of adsorption isotherms based on the amount of adsorbed material in terms of relative pressure



شکل ۲- مقدار نیترات جذب‌شده توسط تیمارهای آزمایش از محلول‌ها در غلظت‌های تعادلی به‌دست‌آمده

Figure 2- The amount of nitrate adsorbed by the test treatments from solutions at Equilibrium concentrations obtained

تعادلی برای تیمارهای آزمایشی در شکل ۲ ارائه شده است. علاوه بر این، درصد جذب نیترات در زمان تعادل، pH بهینه و دوز جاذب برای غلظت‌های مختلف محلول‌های نیترات در جدول ۴ نشان داده شده است. با افزایش غلظت نیترات محلول، نسبت بارگذاری یون‌ها بر روی سطح جاذب به دلیل دسترسی بیشتر و برخورد بیشتر یون‌ها با سطح جاذب افزایش می‌یابد و در نتیجه ظرفیت جذب افزایش می‌یابد (Amininejad et al., 2019). در غلظت‌های پایین، یون‌های نیترات به‌طور مؤثری با مکان‌های روی سطح جاذب برهمکنش می‌کنند که منجر به درصد بالاتری از جذب می‌شود. در غلظت‌های بالاتر، راندمان جذب به دلیل اشباع مکان‌های جذب کاهش می‌یابد که با نتایج قربانی و همکاران (Ghorbani et al., 2022) همخوانی دارد. با افزایش غلظت اولیه، ظرفیت جذب نیز افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل گرا دیان غلظت و نیروی محرکه‌ی بالاتر در غلظت‌های بالاتر است که این موضوع با نتایج درویشی و همکاران (Darvish et al., 2021) همخوانی دارد. با این حال، این امر منجر به اشباع تمام مکان‌های جذب شده و در نتیجه مقدار نیترات کل جذب‌شده کاهش می‌یابد (Thorneby & Persson, 1999). برای تعیین غلظت بهینه با در نظر گرفتن راندمان حذف و جذب مطلوب، باید حدی در نظر گرفته شود که حداکثر مقدار آلایند را با کمترین هزینه (مثلاً استفاده از جاذب کمتر، رقیق کردن منابع آلوده و غیره) حذف نماید (Yazdani et al., 2018). بر این اساس، غلظت بهینه برای 100 BFU میلی گرم در لیتر می‌باشد که مقادیر راندمان حذف و ظرفیت جذب متناظر آن به ترتیب ۸۵/۲۶ درصد و $3/41 \text{ mg g}^{-1}$ بود. به‌طور مشابه، غلظت بهینه برای BF، 100 میلی گرم در لیتر، با مقادیر راندمان حذف و ظرفیت جذب به ترتیب ۹۱/۴۲ درصد و $3/65 \text{ mg g}^{-1}$ تعیین شد.

منحنی تیمار B همدمای برگشت‌پذیر نوع سوم بوده و نشان‌دهنده برهمکنش نسبتاً ضعیف بین جاذب و جذب‌شونده بوده و برهمکنش بین جذب‌شونده-جذب‌شونده نقش بسیار مهمی را بازی می‌نماید. همچنین منحنی تیمار BZU مشابه منحنی نوع پنجم تقسیم‌بندی آیوپاک بوده که در میعانات حفره‌ها و هیستریزیس مشاهده می‌شود (Brunauer et al., 1938). همچنین مطابق شکل ۲، منحنی همدمای جذب برای BZU، S شکل است. همدماهای نوع S نشان می‌دهد که با افزایش غلظت ماده‌ی جذب‌شده (آلایند)، در ابتدا شیب افزایش می‌یابد، اما در نهایت با پر شدن محل‌های خالی جذب، شیب کاهش می‌یابد و به صفر می‌رسد (Alashti et al., 2024). به‌صورت کلی با توجه به مقادیر به‌دست آمده برای پارامترهای درصد حذف نیترات از محلول و جذب بالای نیترات در تیمارهای BF و BFU، این تیمار به‌عنوان بهترین تیمارها انتخاب شدند.

غلظت اولیه‌ی محلول یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در فرآیند جذب نیترات توسط جاذب‌ها می‌باشد. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۵ تیمارهای BF و BFU با مقادیر $3/34$ و $3/66 \text{ mg g}^{-1}$ دارای بیشترین مقادیر ماکزیم ظرفیت جذب (Q_m) بوده و تیمارهای BZ و B با به‌ترتیب با مقادیر $1/34$ و $1/63 \text{ mg g}^{-1}$ دارای کمترین مقادیر Q_m می‌باشند که می‌توان علت این امر در زغال‌های زیستی با پوشش آهن را به این واقعیت نسبت داد که بیشتر سطح زغال زیستی حامل بار منفی است، در حالی که آهن (III) با بار مثبت خود روی سطح زغال زیستی جذب می‌شود و به‌عنوان رابطی برای اتصال نیترات به آنیون‌ها و افزایش میزان جذب عمل می‌کند که با یافته‌های سامسوری و همکاران (Samsuri et al., 2013) همخوانی دارد. نمودار تغییرات مقادیر جذب نیترات در ۶ غلظت مختلف در مقابل تغییرات غلظت

جدول ۴- درصد جذب نیترات در زمان تعادل، pH بهینه و دوز جاذب برای غلظت‌های مختلف محلول‌های نیترات

Table 4- Nitrate adsorption efficiency at equilibrium time, optimum pH and adsorbent dosage for different concentrations of nitrate solutions

درصد جذب نیترات Percentage of nitrate adsorption						
غلظت اولیه نیترات Initial nitrate concentration	BF	BFU	BZ	BZU	B	BU
20	99.81	99.04	77.55	30.90	37.58	33.76
45	97.40	96.95	53.01	21.59	19.02	46.03
80	91.90	93.41	32.66	32.23	24.06	50.01
100	91.42	85.26	25.99	35.81	22.79	50.32
150	84.14	75.45	25.29	56.85	28.16	41.67
200	76.92	75.01	24.24	35.48	38.60	47.05

B زغال زیستی، BU: اولتراسونیک و زغال زیستی، BZ: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر،

BZU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر،

BF: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر

BFU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر.

B; Biochar, BU; Ultrasonic and biochar, BZ; Biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹,

BZU; Ultrasonic and biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹,

BF, biochar (650 °C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹,

BFU, ultrasonic and biochar (650 °C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹.

لازم به ذکر است که در تیمار BFU مدت زمان تماس جاذب با نیترات و انجام فرآیند اولتراسونیک تنها ۵ دقیقه بوده است و در این مدت، میزان حذف نیترات از ۷۵/۰۱ تا ۹۹/۰۴ درصد در غلظت‌های مختلف محلول نیترات رسیده است و حاکی از قابلیت بالای این شرایط آزمایشگاهی در فرآیند جذب نیترات می‌باشد. نتایج نشان داد که استفاده‌ی ترکیبی از اولتراسونیک در فرآیند تجزیه و تخریب آلاینده دارای راندمان بیشتری می‌باشد که با نتایج الماسی و همکاران (Almasi et al., 2017) و عسگری و همکاران (Asgari et al., 2013) مطابقت دارد. علت این موضوع می‌تواند با افزایش یون هیدرونیوم در محلول آبی که در pHهای اسیدی بیشتر وجود دارد در ارتباط باشد. با توجه به کاهش میزان نیترات در محلول آبی در حضور اولتراسونیک می‌توان علت را در این نتایج به فرآیند تولید هیدروژن که از محصولات اولتراسونیک در محلول‌های آبی و در فرکانس‌های بیشتر از ۲۰ کیلوهرتز است نسبت داد که سبب احیای یون‌های نیترات می‌شود (Rashwan et al., 2019). علاوه بر این رادیکال‌های OH[•] تولیدشده در فرآیند میکرواستریمینگ، دما و فشار بالای میکروحباب‌ها در فاز میکرو و انرژی بسیار بالای اولتراسونیک (Shirsath et al., 2012) می‌توانند در شکستن پیوندها تأثیرگذار باشند. در فرآیند اولتراسونیک درون حفره‌های مولکول‌های آب فرآیند پیرولیز اتفاق افتاده که سبب تولید رادیکال‌های هیدروکسیل و اتم هیدروژن در فاز گازی شده و در هنگام برخورد آلاینده‌ها با امواج اولتراسونیک، آلاینده‌ها با رادیکال هیدروکسیل واکنش داده و یا در اثر حرارت تجزیه می‌شوند. ادامه‌ی واکنش‌ها سبب ترکیب مجدد رادیکال‌های هیدروکسیل و تولید پراکسید هیدروژن (H₂O₂) می‌شود (Chowdhury & Viraraghavan, 2009). پراکسید هیدروژن در واکنش‌های اکسیداسیون-احیا شرکت و به‌عنوان یک احیاکننده یا اکسیدکننده عمل می‌کند (Asgari et al., 2013).

داده‌های به‌دست آمده از جذب نیترات توسط تیمارهای آزمایش در مدل همدمای جذب فروندلیچ و لانگمویر قرار گرفت و برازش داده‌های جذب با معادلات همدمای لانگمویر و فروندلیچ به‌ترتیب با رسم منحنی $1/q_e$ در مقابل $1/C_e$ و $\log q_e$ در مقابل $\log C_e$ مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای همدمای جذب که از طریق شیب و عرض از مبدا نمودار خطی، با استفاده از فرم خطی لانگمویر و فروندلیچ همراه با RMSE و ضریب تعیین (r^2) محاسبه شده و در جدول ۵ آمده است.

نتایج نشان داد میزان جذب نیترات، با گذشت زمان افزایش می‌یابد که با نتایج فراسات و صیادی (Farasat & Saiadi, 2023) مطابقت دارد. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اولیه‌ی نیترات از ۲۰ به ۲۰۰ میلی گرم در لیتر، در تیمارهای BF، BZ و BFU، میزان جذب نیترات افزایش و درصد حذف نیترات کاهش یافته است و در تیمار B میزان جذب نیترات افزایش و درصد حذف نیترات در ابتدا کاهش و سپس افزایش یافته است که نشان می‌دهد نیترات در غلظت‌های پایین میل بسیار بالایی برای جذب بر سطح جاذب دارد و با افزایش غلظت پوشش سطح جاذب کم شده و شیب منحنی کاهش می‌یابد (Crini & Badot, 2008). در تیمار BZU میزان جذب نیترات و درصد حذف نیترات تا غلظت ۱۵۰ میلی گرم در لیتر افزایش یافته است و با افزایش غلظت اولیه‌ی نیترات از ۲۰ تا ۱۵۰ میلی گرم در لیتر غلظت نهایی نیترات بعد از جذب از ۱۳/۸۱ به ۶۴/۷۱ میلی گرم در لیتر رسیده است و کمترین میزان جذب نیترات در غلظت اولیه ۲۰ میلی گرم در لیتر (۰/۸۲ میلی گرم بر گرم) و بیشترین میزان جذب نیترات نیز در غلظت اولیه‌ی ۱۵۰ میلی گرم در لیتر (۱۱/۳۷ میلی گرم بر گرم) حاصل شد و سپس کاهش می‌یابد که در این صورت غلظت اولیه‌ی ۱۵۰ میلی گرم در لیتر به‌عنوان بهترین غلظت برای حذف نیترات انتخاب می‌شود که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد. در BU میزان جذب نیترات افزایش و درصد حذف نیترات در ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته و در ادامه مجدداً افزایش می‌یابد و به‌صورت کلی دارای روند افزایشی است. در جدول ۴ و شکل ۲ همدمای جذب نیترات در غلظت‌های نهایی محلول‌های نیترات توسط تیمارهای مختلف نشان داده شده است. در تیمار BF میزان جذب افزایش می‌یابد و روند افزایشی دارد و در نقطه‌ای به ثبات نمی‌رسد که این موضوع بیانگر ادامه‌دار بودن افزایش میزان جذب در غلظت‌های بیشتر محلول بوده و حاکی از قابلیت بالای این جاذب در فرآیند جذب نیترات می‌باشد. همچنین با بررسی نتایج در تیمار BZ، BFU و BU نتایج نشان داده شد که با افزایش غلظت اولیه‌ی نیترات از ۲۰ تا ۲۰۰ میلی گرم در لیتر غلظت نهایی نیترات بعد از جذب به‌ترتیب از ۴/۴۸ به ۱۵۱/۵۱، ۱۲/۴۸ به ۱۲۲/۷۹، ۰/۱۹ به ۴۹/۹۶ و ۱۳/۲۴ به ۱۰۵/۸۸ میلی گرم در لیتر برای این ۴ تیمار رسیده است و میزان جذب نیز از ۰/۶۲ به ۱/۹۳، ۰/۳ به ۳/۰۸، ۰/۷۹ به ۶ و ۰/۹ به ۱۲/۵۴ میلی گرم بر گرم افزایش می‌یابد و روند افزایشی داشته‌اند و در نقطه‌ای به ثبات و شیب منحنی کم نرسیده‌اند که این موضوع بیانگر ادامه‌دار بودن افزایش میزان جذب در غلظت‌های بیشتر محلول بوده و بیانگر تداوم روند جذب برای این جاذب‌ها در فرآیند جذب نیترات می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر پارامترهای همدمای جذب لانگمویر و فروندلیچ، ضرایب r^2 و RMSE
Table 5- The values of Langmuir and Freundlich isotherms parameters and R^2 and RMSE

پارامترهای مدل‌های همدمای جذب نیترات Parameters of isothermal models of nitrate adsorption								
لانگمویر Langmuir					فروندلیچ Freundlich			
تیما	Qm (mg/g)	K _L (L mg ⁻¹)	r ²	RMSE	K _F ((mg g ⁻¹)(L mg ⁻¹) ^{1/n})	n	r ²	RMSE
BF	3.345	8.491	0.894	0.122	1909.41	3.641	0.985	0.036
BFU	3.664	1.405	0.950	0.083	1484.22	2.942	0.981	0.039
BZ	1.341	0.184	0.806	0.152	386.63	3.562	0.856	0.059
BZU	-	-	0.886	4.469	26.24	0.795	0.799	0.187
B	1.632	0.016	0.713	0.606	18.49	1.047	0.806	0.157
BU	-	-	0.946	0.082	56.48	0.852	0.944	0.087

B: زغال زیستی، BU: اولتراسونیک و زغال زیستی، BZ: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، BZU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، BF: زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر، BFU: اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با آهن ۳ ظرفیتی با غلظت ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
BZ; Biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹, B; Biochar, BU; Ultrasonic and biochar
BZU; Ultrasonic and biochar (650 °C) coated with zinc with a concentration of 40,000 mg L⁻¹,
BF, biochar (650 °C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹,
BFU, ultrasonic and biochar (650°C) coated with trivalent iron at a concentration of 10,000 mg L⁻¹.

بودن شکل منحنی آن‌ها می‌باشد (جدول ۳). در تیمار B، مقدار n که بین ۱ و ۲ باشد، حالت جذب طبیعی را نشان می‌دهد و شکل منحنی خطی است (جدول ۳). برای BU و BZU، مقادیر n کمتر از ۱ حالت جذب ضعیف و شکل منحنی نامطلوب را نشان می‌دهد (جدول ۳). مقادیر ظرفیت جذب (K_F) به‌دست آمده برای BF، BFU و BZ که به‌ترتیب ۱۹۰۹/۴۱۴، ۱۴۸۴/۲۲ و ۳۸۶/۶۳ ((mg/g)(L/mg)^{1/n}) بود، نشان‌دهنده‌ی ظرفیت جذب بالای این جاذب‌ها برای نیترات است.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی در این پژوهش استفاده از زغال‌های زیستی ارزان‌قیمت کاه برنج و به‌کارگیری فناوری اولتراسونیک سبب کاهش قابل توجه نیترات در محلول آبی که یکی از چالش‌های مهم در استفاده از پساب‌های کشاورزی می‌باشد، گردید. از میان زغال‌های زیستی، زغال پوشش‌دار شده با آهن (III) و با غلظت محلول آهن ۱۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر (BF) دارای عملکرد بسیار خوبی در حذف نیترات از محلول‌های آبی بود. فناوری جدید اولتراسونیک توانست در مدت زمان ۵ دقیقه عملکرد جاذب‌های مورد آزمایش را بدون نیاز به شیک شدن مخلوط زغال زیستی و محلول نیترات بهبود بخشد به‌نحوی که در این مدت درصد جذب نیترات در تیمار اولتراسونیک و زغال زیستی (BU) تا حداکثر ۵۰/۳۲ درصد، در تیمار اولتراسونیک و زغال زیستی (۶۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد) پوشش داده شده با روی با غلظت ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (BZU) ۵۶/۸۵ درصد و در تیمار BFU ۹۹/۰۴ درصد به‌دست آمد. در تیمارهای BF و زغال زیستی با

در تجزیه و تحلیل دو همدمای مورد مطالعه، مشاهده شد که همدمای فروندلیچ RMSE پایین‌تر و ضرایب تعیین (r^2) بالاتری برای BF، BFU، BZ و B دارند که نشان‌دهنده‌ی برازش بهتر مدل فروندلیچ در این تیمارها است که با نتایج فراسی و صیادی (Farasat & Saiadi, 2023) همخوانی دارد. تناسب بهتر همدمای جذب فروندلیچ ناهمگنی مکان‌های جذب سطحی زغال زیستی را نشان می‌دهد، که به این معنی است که فرآیند جذب به یک لایه‌ی تشکیل‌دهنده محدود نمی‌شود. جذب نیترات بر روی سطح زغال زیستی احتمالاً تحت تأثیر جذب الکترواستاتیک و تبادل یونی قرار دارد (Bhatnagar et al., 2008). از سوی دیگر، در تیمار BZU مقادیر RMSE و ضریب تعیین (r^2) در همدمای فروندلیچ کمتر از مقادیر متناظر آن در همدمای لانگمویر می‌باشد و در تیمار BU نیز با وجود تفاوت اندک با توجه به مقادیر ضریب تعیین (r^2) بالاتر و RMSE کمتر، مدل لانگمویر برازش بهتری نشان داد. این موضوع بیانگر این است که در تیمار BU سطوح جذب احتمالاً دارای یکنواختی بیشتری هستند و فرآیند جذب در مناطق همگن روی سطوح جاذب انجام می‌شود. علاوه بر این، واکنش بین مواد جاذب حداقل است و پس از جذب تک‌لایه روی سطح جاذب، یون‌های نیترات تمام مکان‌های موجود را اشغال می‌کنند و منجر به عدم جذب بیشتر روی سطح جاذب می‌شوند. در بررسی همدمای فروندلیچ، مقادیر n که نشان‌دهنده‌ی توزیع ذرات مواد جذب‌شده بر روی سطح ماده‌ی جاذب است برای تیمارهای BF، BFU و BZ (مقادیر بین ۲ تا ۱۰) وضعیت جذب مطلوبی را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی مطلوب

با آن و بار مثبت ایجاد شده توسط آهن بر روی جاذب زغال زیستی در ارتباط می‌باشند. به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از فناوری اولتراسونیک می‌تواند در کاهش آلودگی نیترات در محلول‌های آبی و افزایش مزایای اقتصادی استفاده از منابع آبی محدود و افزایش بهره‌وری مصرف آب، مؤثر و مفید واقع شود. این مزایا شامل کاهش در زمان مورد نیاز برای تصفیه، انرژی مصرفی، جاذب و دیگر هزینه‌های سیستم تصفیه می‌باشد.

پوشش آهن توام با اولتراسونیک (BFU) که بهترین عملکرد در حذف نیترات را داشتند مدل فروندلیچ دارای برآزش بهتری نسبت به مدل لانگمویر بود. در بررسی مدل فروندلیچ، تیمارهای BF و BFU وضعیت جذب مطلوبی را نشان دادند. همچنین با استناد به نتایج مربوط به این مدل، دو تیمار مذکور دارای ظرفیت جذب بالایی برای جذب نیترات می‌باشند که با تولنایی اولتراسونیک در ایجاد تماس بیشتر آلاینده با سطح جاذب و واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی مرتبط

References

1. Abd-Elaty, I., Kuriqi, A., & Shahawy, A.E. (2022). Environmental rethinking of wastewater drains to manage environmental pollution and alleviate water scarcity. *Natural Hazards*, 110(3), 2353-2380. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05040-w>
2. Alashti, M.R., Khoshraresh, M., Sadeghzadeh, F., & Azamathulla, H.M. (2024). Evaluation of the effect of ultrasonic waves in the removal of nitrate from aqueous solution by activated carbon coated with zinc and iron. *PhD thesis at Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources*, Page 6. (In Persian with English abstract)
3. Almasi, H., Asgari, G., Leili, M., Sharifi, Z., & Seid-Mohammadi, A. (2017). The study of phenol removal from aqueous solutions using oxidizing agents of peroxide hydrogen, persulfate and periodate activated by ultrasound. *Scientific journal of Rafsanjan University of Medical Sciences*, 15(9), 835-848. (In Persian with English abstract)
4. Amininejad, M., Maroosi, A., Broomandnasab, S., Moazed, H., & Farasat, M. (2019). Evaluation of nitrate removal from aqueous solution by nanostructure of Conocarpus. *Irrigation and Water Engineering*, 10(1), 166-179. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/IWE.2019.95882>
5. APHA. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22nd Edition, American Public Health Association, Washington DC.
6. Asgari, G., Seid Mohammadi, A., Chavoshani, A., & Rahmani, A.R. (2013). Microwave/ H₂O₂ efficiency in pentachlorophenol removal from aqueous solutions. *Journal of Research in Health Sciences*, 14(1), 36-39.
7. Bhatnagar, A., Ji, M., Choi, Y.H., Jung, W., Lee, S.H., Kim, S.J., Lee, G., Suk, H., & Kim, H.S. (2008). Removal of nitrate from Water by adsorption onto zinc chloride treated activated carbon. *Separation Science and Technology*, 43, 886-907. <https://doi.org/10.1080/01496390701787461>
8. Brunauer, S., Emmett, P., & Teller, E. (1938). *Journal of the American Chemical Society*, 60(2), 309-319. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>
9. Caravelli, A.H., De. Gregorio, C., & Zaritzky, N.E. (2012). Effect of operating conditions on the chemical phosphorus removal using ferric chloride by evaluating orthophosphate precipitation and sedimentation of formed precipitates in batch and continuous systems. *Chemical Engineering Journal*, 209, 469-477. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.08.039>
10. Cataldo, D.A., Maroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissues by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
11. Chowdhury, P., & Viraraghavan, T. (2009). Sonochemical degradation chlorinated organic compounds, phenolic compounds and organic dyes-a review. *Science of the Total Environment*, 407(8), 2474-2492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.031>
12. Crini, G.G., & Badot, P.M. (2008). Application of chitosan, a natural aminopolysaccharide, for dye removal from aqueous solutions by adsorption processes using batch studies: A review of recent literature. *Progress in Polymer Science*, 33, 399-447. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.11.001>
13. Darvish, M., Taghavi, L., Moradi Dehaghi, S., & Karbassi, A.R. (2021). Fixed-bed column studies of nitrate ion adsorption using modified montmorillonite adsorbent. *Applied Research in Chemical – Polymer Engineering*, 4(4), 89-105. (In Persian with English abstract)
14. Dehghan, T., Gholami Sefidkouhi, M.A., Khoshraresh, M., & Samadani Langroudi, N. (2021). Use of modified nano particles of beech leaves for nitrate removal from aqueous solutions in the column system. *Journal of Water and Soil Science*, 25(1), 205-217. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.47176/jwss.25.1.12491>
15. Farasat, M., & Saiadi, M. (2023). Removal of nitrate, ammonium and phosphate from water using activated carbon. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(2), 127-137. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.384829.1035>
16. Farrokhphey, F., Mofarah, E., & Nik Khasal, R. (2019). Introduction with surface analyses based on physical adsorption-desorption. *Iranian Journal of Laboratory Knowledge*, 4(6), 7-12.
17. Ghorbani, M., Broomandnasab, S., & Houshmand, A. (2022). Nitrate absorption from aqueous solution using

- sugarcane bagasse biochar, broken ceramic and Cocopit. *Wetland Ecobiology Scientific Journal*, 14(51), 35-48. (In Persian with English abstract)
18. Jaafarzadeh, N., Ahmadi, M., Amiri, H., Yassin, M.H., & Martinez, S.S. (2012). Predicting Fenton modification of solid waste vegetable oil industry for arsenic removal using artificial neural networks. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 43, 873-878. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2012.05.008>
19. Karimi, M., Entezari, M.H., & Chamsaz, M. (2010). Sorption studies of nitrate ion by a modified beet residue in the presence and absence of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17(4), 711-717. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2009.12.002>
20. Kilpimaa, S., Runtti, H., Kangas, T., Lassi, U., & Kuokkanen, T. (2015). Physical activation of carbon residue from biomass gasification: Novel sorbent for the removal of phosphates and nitrates from aqueous solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 1354-1364.
21. Miler, M.P., Duvall, M., & Sohi, S. (2011). Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Journal of Soil Biology and Biochemistry*, 43, 2243-2246. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.07.019>
22. Mook, W.T., Chakrabarti, M.H., Aroua, M.K., Khan, G.M.A., Ali, B.S., Islam, M.S., & Abu Hassan, M.A. (2012). Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. *Desalination*, 285, 1-13.
23. Rashwan, S.S., Dincer, I., Mohany, A., & Pollet, B.G. (2019). The Sono-Hydro-Gen process (Ultrasound induced hydrogen production): Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 14500-14526. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.115>
24. Reusch, T.B.H., Dierking, J., Andersson, H.C., Bonsdorff, E., Carstensen, J., Casini, M. (2018). The Baltic Sea as a time machine for the future coastal ocean. *Science Advances*, 4, 8195. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar8195>
25. Sainan, D., & Sartaj, M. (2016). Statistical analysis and optimization of ammonia removal from landfill leachate by sequential microwave/aeration process using factorial design and response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.10.029>
26. Samsuri, W.A., Sadegh-Zadeh, F., & She-Bardden, J.B. (2013). Adsorption of as(III) and as(V) by Fe coated biochars and biochars produced from empty fruit bunch and rice husk. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 981-988. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.009>
27. Serediak, N.A., Prepas, E.E., & Putz, G.J. (2014). *Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 11, 305-323. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00908-6>
28. Shakeri, N., Ghorbani, H., & Ghaffarian Moqarrab, M.E. (2017). Investigating the effect of acidity and humic acid on the removal efficiency of nitrate from water by zero iron nanoparticles. *Bi-Monthly Scientific-Research Journal of Water and Sewage*, 28(3), 63-55.
29. Shirsath, S.R., Sonawane, S.H., & Gogate, P.R. (2012). Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations—a review of current status. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 53, 10-23. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.01.003>
30. Smith, J.M. (1981). *Chemical Engineering Kinetics*. Mc Graw- Hill Chemical Engineering Series, 3rd edition. New York.
31. Tang, Y., Alam, M.S., Konhauser, K.O., Alessi, D.S., Xu, S., Tian, W., & Liu, Y. (2019). Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 209, 927-936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.268>
32. Thorneby, L., & Persson, K. (1999). Treatment of liquid effluents from dairy cattle and pigs using reverse osmosis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74, 159-170.
33. Wang, Y., Gao, B., Yue, W.W., & Yue, Q.Y. (2007). Adsorption kinetics of nitrate from aqueous solutions onto modified wheat residue. *Physicochemical and Engineering Aspects*, 308, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.05.014>
34. Westlund, H. (2014). Social Capital and Governance for Efficient Water Management: Chapter 5. In K. Kobayashi, I. Syabri, I.R.D. Ari, & H. Jeong (Eds). *Community Based Water Management and Social Capital*. London: IWA Publishing, 59-68.
35. Yazdani Sheldarreh, M., Gholami Sefidkahi, M.A., & Ziatabar Ahmadi, M. (2018). Purification of nitrate-contaminated water using micro and nano absorbent structures made of rice and wheat. *Irrigation and drainage master's thesis*. Agricultural Engineering Faculty, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian with English abstract)
36. Zameni, L., Sadeghzadeh, F., & Jalili, B. (2016). Nitrate leaching in soil amended with biochar and biochar with iron coating. *Master's thesis in soil science, majoring in soil chemistry and fertility*. Faculty of Agricultural Sciences, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian with English abstract)

Assessment of Useful Life of Negarestan Reservoir Dam Using Hypsometric Curve by Modified Strahler Method and Satellite Imagery

A. Zahiri^{1*}, Kh. Ghorbani¹, H. Feiz Abady², H. Sharifan¹

1 and 2- Associated Professor and Ph.D Student, Water Engineering Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, respectively.

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

Received: 31-08-2024

Revised: 28-10-2024

Accepted: 02-11-2024

Available Online: 02-11-2024

How to cite this article:

Zahiri, A., Feiz Abady, H., Ghorbani, Kh., & Sharifan, H. (2024). Assessment of useful life of Negarestan reservoir dam using hypsometric curve by modified Strahler method and satellite imagery. *Journal of Water and Soil*, 38(5), 555-573. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89646.1432>

Introduction

Reservoirs are crucial for water supply to human societies, making their proper and planned management essential. Dams serve multiple purposes, including urban water supply, agricultural irrigation, flood control, and hydroelectric power generation. In order to properly manage and monitor the consumption of these important reserves, it is inevitable to know their capacities. Using water stage and the reservoir's initial volume-area-elevation curve, which is prepared with the hydrographic operations, is a common method for estimating the storage capacity of reservoirs at different water levels. Over time, the occurrence of numerous sedimentations, often due to factors such as floods, can alter the initial volume-area-elevation curve of a reservoir, requiring it to be updated. Hydrographic operations, using tools like eco-sounders, are conventional methods for updating this curve; however, these methods are both expensive and time-consuming. In recent years, various studies have focused on remote sensing techniques aimed at estimating the volume of water stored in reservoirs, using water levels to establish the surface area-elevation curve. The basis of these studies is the separation of water-land masks using spectral indices, the calculation of water levels, and the development of reservoir surface area-elevation curves through linear or polynomial relationships. However, the main limitation of these methods is the inaccuracy of linear or polynomial relationships in fitting the surface area-elevation curves at the beginning and end points of the water stage change interval, which correspond to the empty or full states of the reservoir. This inaccuracy arises due to factors such as drought or flood events. In this research, the limitation of linear and polynomial relationships in accurately predicting the points of the reservoir surface area-elevation curves, where observational data are unavailable due to non-occurrence, was addressed by using the Modified Strahler method to draw the hypsometric curve. This method allows for the calculation of the storage capacity of the reservoir between successive water levels and the determination of the final volume of water stored in the reservoir. By comparing the volumes of water stored at the present and initial reservoir capacities, the sedimentation rate and the useful life of the Negarestan Dam reservoir were estimated.

Material and Methods

Negarestan Dam (Kabudval) is located on the Qarasu (Zarin Gol) river, 45 km east of Gorgan in the Golestan Province. This dam is used for purposes such as supplying urban water to Aliabad city and supplying water needed for the agricultural irrigation network of Qarasu. In this study, landsat8 satellite images were used to estimate the useful life of the Negarestan reservoir. The required images of the ROI were downloaded through the USGS database and pre-processed in Envi5.3 software. Using visible and infrared spectral bands, water indices NDWIMCFeters, NDWIGao, MNDWI, AWEISH and TCWet were calculated to separate land-water masks. After evaluating the accuracy of the obtained water level results by comparing it with the initial volume-area-elevation curve of Negarestan reservoir, the MNDWI index was used as the most accurate index to calculate water levels. In this study,



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89646.1432>

the modified Strahler method was used to obtain the hypsometric curve of the surface area-elevation of the reservoir, which has high accuracy in extrapolating the beginning and end points of the curve. By using the hypsometric curve, water levels were extracted for arbitrary water levels, and with the help of the prismoidal method, the volume between consecutive water levels was calculated. The sum of these volumes equaled the current storage capacity of the reservoir. To estimate the sedimentation rate of the Negarestan Dam reservoir, the current storage capacity was compared with the initial storage capacity in 2015. Based on this comparison, the useful life of the reservoir was accurately predicted.

Results and Discussion

Validation results for calculating water surface areas using NDWIMCFeters, NDWIGao, MNDWI, AWEISH and TCWet water indices showed that the MNDWI index with an average water surface areas calculation error equal to 5% is more accurate than other indices. Therefore, the MNDWI index was used in this study. Additionally, the comparison of the volume of water stored in the Negarestan reservoir with its initial storage capacity at the time of operation revealed that, over a period of 9 years, the storage capacity of the reservoir (at a water level of approximately 189.5 meters), which is close to the overflow crest level, had significantly decreased. It has decreased from about 24 to 20 million cubic meters, based on which the average annual sedimentation rate of the reservoir was estimated, to about 1.6%. The results showed that in a period of 9 years, the average level of the bathymetry of Negarestan reservoir has increased by 10 meters due to the accumulation of sediments, and the minimum level of the bathymetry has reached from 160 to about 170 meters. According to the statistics of the International Commission on Large Reservoirs (ICOLD), the average annual sedimentation rate of the world's reservoirs is reported to be about 0.95%, and the results show that this amount in the Nagaristan Dam reservoir is almost 2 times the average rate. It is universal. According to the results obtained from this research and assuming constant climatic conditions, the useful life of the Nagarestan dam reservoir was estimated to be about 53 years from the beginning of 2024.

Conclusion

Considering the increasing importance of water resources management, including dam reservoirs, this study employed a fast and cost-effective method based on remote sensing to calculate the volume of water stored in dam reservoirs and estimate their useful life. In addition to providing appropriate accuracy, this method was able to overcome the limitations of previous approaches in estimating the volume of accumulated sediment in the deeper parts of the reservoir. As a result, it offers a reliable tool for the effective management of water resources.

Keywords: Dam reservoir, Landsat8, Remote sensing, Sedimentation rate, Storage capacity

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۳، ۵۷۳-۵۵۵

برآورد عمر مفید مخزن سد نگارستان با ترسیم منحنی هیپسومتریک به روش Strahler اصلاح شده و تصاویر ماهواره‌ای

عبدالرضا ظهیری^{۱*} - خلیل قربانی^۱ - حامد فیض آبادی^۲ - حسین شریفان^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲

چکیده

مخازن سدها از منابع حیاتی تأمین آب جوامع بشری محسوب می‌شوند که آگاهی داشتن از مقدار حجم آب ذخیره‌شده در آن‌ها امری ضروری است. استفاده از اشل و منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن که به کمک عملیات نقشه‌برداری تهیه می‌شود، روش معمول برای تخمین ظرفیت ذخیره‌سازی مخازن می‌باشد. با گذشت زمان و وقوع رسوب‌گذاری‌های متعدد، منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن تغییر می‌کند که استفاده مجدد از آن نیازمند تصحیح این منحنی است. عملیات هیدروگرافی مخازن با استفاده از ابزاری مثل اکوساندر روشی مرسوم برای تصحیح این منحنی است که علاوه بر پرهزینه بودن، زمان‌بر نیز می‌باشد. در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی بر مبنای سنجش‌ازدور با هدف تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخازن، به محاسبه سطوح آب برای ترسیم منحنی حجم-سطح-ارتفاع پرداخته‌اند. اساس کار این مطالعات تفکیک پهنه‌های آب‌وخشکی به کمک شاخص‌های طیفی، محاسبه سطوح آب و ترسیم منحنی‌های سطح-ارتفاع مخازن با استفاده از روابط خطی یا چندجمله‌ای‌ها می‌باشند. محدودیت این روش‌ها عدم دقت مناسب روابط خطی یا چندجمله‌ای در برازش منحنی سطح-ارتفاع مخزن برای نقاط ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات عمق آب است. در این پژوهش با هدف رفع محدودیت روابط خطی و چندجمله‌ای برای پیش‌بینی دقیق نقاطی از منحنی سطح-ارتفاع مخزن که داده‌های مشاهداتی به دلیل عدم وقوع موجود نیستند، از ترسیم منحنی هیپسومتریک به روش استرالر اصلاح‌شده استفاده شده است. با استفاده از منحنی هیپسومتریک می‌توان ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن بین سطوح آب متوالی را محاسبه کرد و حجم‌نهایی آب ذخیره‌شده در آن‌را به دست آورد. بر این اساس با مقایسه حجم آب ذخیره‌شده در زمان فعلی و ظرفیت ذخیره‌سازی طراحی مخزن در زمان شروع بهره‌برداری، نرخ رسوب‌گذاری و عمر مفید مخزن سد نگارستان برآورد شد. نتایج نشان داد که در بازه زمانی ۹ ساله، ظرفیت ذخیره مخزن در تراز سطح آب حدود ۱۸۹/۵ متر که معادل تراز تقریبی تاج سرریز می‌باشد، از حدود ۲۴ به ۲۰ میلیون متر مکعب کاهش یافته است که بر این اساس نرخ متوسط رسوب‌گذاری سالانه مخزن حدود ۱/۶ درصد برآورد شد. همچنین در این مدت، تراز کف مخزن سد نگارستان به دلیل انباشته شدن رسوبات به طور متوسط حدود ۱۰ متر افزایش داشته است و کمترین تراز کف مخزن از ۱۶۰ به حدود ۱۷۰ متر رسیده است. مطابق نتایج به دست آمده از این پژوهش و با فرض ثابت بودن شرایط اقلیمی، عمر مفید مخزن سد نگارستان از ابتدای سال ۱۴۰۳ حدود ۵۳ سال برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: سنجش‌ازدور، ظرفیت ذخیره، لندست ۸، مخزن سد، نرخ رسوب‌گذاری

مقدمه

سدها یکی از پروژه‌های مدیریت و حفاظت از منابع آب می‌باشند که برای کنترل سیلاب، تأمین آب شرب، تولید انرژی برق‌آبی و آبیاری اراضی کشاورزی استفاده می‌شوند. بیش از ۲/۸ میلیون سد متوسط و بزرگ در دنیا وجود دارد که رژیم‌های جریان رودخانه‌ها و

نحوه انشعاب آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده و باعث جلوگیری از مهاجرت موجودات آبی مثل ماهی‌ها، تله‌اندازی رسوبات و همچنین تغییر شدید مورفولوژی رودخانه در بازه‌های بالادست و پایین‌دست شده‌اند (Kondolf & Yi, 2022). مخازن سدها از سیستم‌های پیچیده رسوبی به‌شمار می‌آیند که موانعی را برای انتقال طبیعی رسوبات رودخانه‌ها ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، رسوب‌گذاری در

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

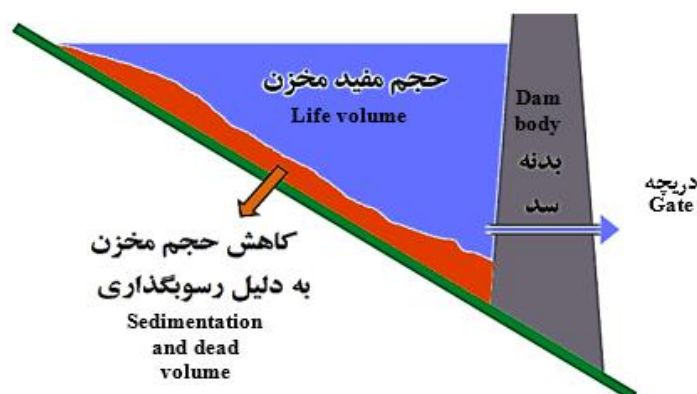
(*)- نویسنده مسئول: (Email: zahiri@gau.ac.ir)

مخازن باعث ایجاد مشکلات جدی در مدیریت عملیاتی آن‌ها می‌شود (شکل ۱) که علت اصلی آن تجمع تدریجی بار رسوبی حمل‌شده توسط رودخانه‌ها است (Ren et al., 2021).

با توجه به تنوع گسترده شکل کف مخازن، تغییرات دبی رودخانه‌ها، مقدار و نوع رسوبات حمل‌شده و تغییرات ظرفیت ذخیره آب مخازن، ارائه مدل‌های رسوب‌گذاری در مخازن کاری دشوار و هزینه‌بر است (Sedlacek et al., 2022). اهمیت تخمین حجم رسوب‌گذاری مخازن سدها باعث استفاده از روش‌های اندازه‌گیری مختلفی شده‌است که باتوجه به شرایطی مثل دسترسی به داده‌ها، هدف اندازه‌گیری، بودجه و زمان در دسترس، مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Gonzalez et al., 2023). اندازه‌گیری توپوگرافی کف مخزن با استفاده از سیگنال‌های صوتی و فناوری‌های مکان‌یابی یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تعیین حجم رسوب انباشته‌شده است (Banasić et al., 2021). گاه‌شماری یکی دیگر از تکنیک‌های معمولی برای اندازه‌گیری نرخ رسوب‌گذاری در بازه‌های ۱۰۰ تا ۱۵۰ ساله است (Chen et al., 2020). علاوه بر این می‌توان با توجه به نوع، کیفیت و فراوانی داده‌های موجود هیدرولوژیکی از مدل‌ها و روابط ریاضی برای تخمین نرخ رسوب‌گذاری مخازن سدها استفاده کرد (Lemma et al., 2024). روش‌های مرسوم برای تعیین حجم رسوب‌گذاری در مخازن سدها به‌صرف زمان و تأمین منابع مالی کافی نیاز دارند که این امر در شرایط اقتصادی کنونی و به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه مثل ایران می‌تواند باعث کاهش میزان اندازه‌گیری‌های میدانی شود. در سال‌های اخیر ماهواره‌های بسیاری با سنجنده‌های کیفی پیشرفته برای تصویربرداری از پدیده‌های زمینی در مدار خود قرار گرفته‌اند که این امر باعث شده تصویربرداری ماهواره‌ای و استفاده از فناوری سنجش‌ازدور برای بررسی سری‌های زمانی تغییرات هیدرولوژیکی آب‌های سطحی از جمله تخمین حجم آب ذخیره‌شده در مخازن و دریاچه‌ها، تعیین مساحت گستره‌های آبی و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها مورد توجه قرار گیرد (Droujko et al., 2023). مزیت اصلی تصویربرداری ماهواره‌ای نسبت به روش‌های مرسوم اندازه‌گیری هیدروگرافی مخازن، علاوه بر هزینه بسیار کم غلبه بر دشواری‌های جمع‌آوری، انتقال و به‌اشتراک‌گذاری حجم بالایی از داده‌های عمق‌سنجی حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی می‌باشد (Wagh & Manekar, 2021).

جورجولیس و همکاران (Gourgouletis et al., 2022) به‌منظور تخمین تراز سطح آب، مساحت گستره آبی و نیز تغییرات حجم آب در مخازن سدها، روش جدیدی را بر مبنای مشاهدات درمحل و قابلیت داده‌های سنجش‌ازدور توسعه دادند. آنها این روش را در مخزن Yliki

کشور یونان با استفاده از شاخص NDWI (Normalized difference water index) و تصاویر ماهواره Sentinel2 ارزیابی کردند که مطابق نتایج، خطای این روش در محاسبه تغییرات حجم آب مخزن ۳/۸۶ درصد گزارش شد. تسفایه و همکاران (Tesfaye et al., 2022) به کمک سنجش از دور و نرم‌افزار GIS به مطالعه تغییرات دینامیکی آب ذخیره شده در مخازن سدهای کوگا^۱، شینا^۲ و سلمکو^۳ واقع در حوضه آبریز نیل آبی کشور اتیوپی پرداختند. برای این منظور آن‌ها با پیش‌پردازش تصاویر ماهواره Landsat8 و شبیه‌سازی و مدل‌سازی پیکسل‌های آب، تغییرات ظرفیت ذخیره مخازن مورد مطالعه را به کمک شاخص NDWI) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه بین سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ نشان داد که ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن کوگا از ۸۳/۱۰ میلیون متر مکعب به ۸۱/۱۷ میلیون متر مکعب کاهش یافته است که نرخ رسوب‌گذاری سالانه آن ۰/۳۳ درصد به‌دست آمد. یولیانتو و همکاران (Yulianto et al., 2022) با استفاده از داده‌های ماهواره Landsat8 و پلتفرم (Google Earth Engine) GEE روش بهبودیافته‌ای برای استخراج خودکار مناطق آب و خشکی با استفاده از شاخص AWEI ارائه کردند. آن‌ها با استفاده از روش SBA در دریاچه توبا واقع در استان سوماترای کشور اندونزی به یک آستانه تشخیص خودکار مناطق آبی رسیدند. آستانه محاسبه‌شده برای شاخص AWEI با روش SBA برابر ۰/۲۳- و دقت ۹۹/۴ درصد و آستانه نرمال برای شاخص AWEI برابر با ۰/۰۰ با دقت ۹۷/۴ درصد گزارش شد که نتایج به‌دست آمده ۲ درصد بهبود دقت در محاسبات را نشان داد. قنبری و همکاران (Ghanbari et al., 2024) در کشور ایران با استفاده از ماهواره‌های Sentinel2 و Sentinel3 و معادله هرون به بررسی تغییرات تراز سطح آب، مساحت سطح آب و تغییرات حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد درودزن شیراز پرداختند. بر اساس نتایج به‌دست آمده محاسبه مساحت سطح آب، مقدار RMSE نسبی ۵/۳۹ درصد و همبستگی مساحت‌های محاسبه شده ۹۷/۳۰ درصد گزارش شد. با ارزیابی نتایج به‌دست آمده از این مطالعه، همبستگی بین تغییرات تراز سطح و حجم آب ۹۸/۸۶ درصد، همبستگی بین تغییرات مساحت سطح و حجم آب ۸۴/۹۷ درصد و همبستگی بین تراز سطح و مساحت سطح آب ۸۷/۲۳ درصد برآورد شد. یائو و همکاران (Yao et al., 2023) برای محاسبه نرخ رسوب‌گذاری در مخازن سدها، هشت سد را به‌عنوان منطقه مطالعاتی در ایالات متحده آمریکا انتخاب کرده و با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel2 مساحت پهنه آب را به ازاء تمام ترازهای سطح آب در محدوده حداکثر و حداقل برآورد نمودند.



شکل ۱- انباشته شدن تدریجی رسوبات در کف مخزن.

Figure 1. Gradual sedimentation in reservoir.

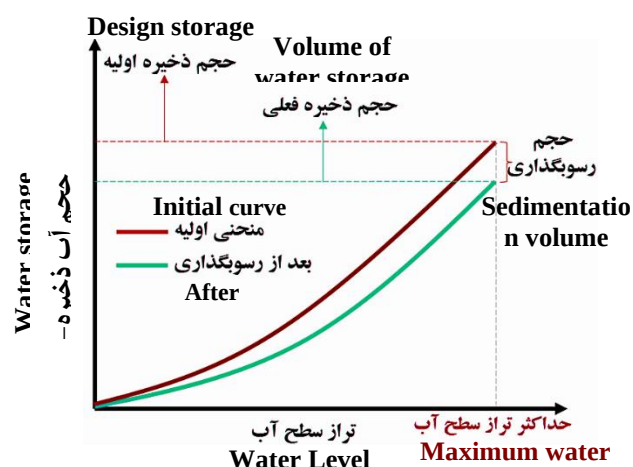
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

سد نگارستان

سد نگارستان (کبودال) با طول جغرافیایی $53^{\circ} 53' 15''$ شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 53' 49''$ شمالی بر روی رودخانه قره‌سو (زرین‌گل) و در کنار جنگل کبودال در نزدیکی شهر علی‌آباد کتول و در ۴۵ کیلومتری شرق شهر گرگان در استان گلستان قرار دارد. این سد یکی از چهار سد مخزنی مهم استان گلستان می‌باشد. سد نگارستان از نوع خاکی همگن و در سال ۱۳۹۳ با ارتفاع حداکثر ۳۳ متر از پی، طول تاج ۱۳۷۰ متر، عرض تاج ۱۰ متر، عرض سرریز ۵ متر و حجم مفید $23/20$ میلیون متر مکعب در تراز سطح آب ۱۸۹ متر بهره‌برداری شد. آب سد نگارستان از دو منبع رودخانه زرین‌گل و آبشار کبودال تأمین می‌شود. این سد برای اهدافی مثل تأمین آب شرب شهرستان علی‌آباد، تأمین آب مورد نیاز برای شبکه آبیاری کشاورزی قره‌سو و گردشگری احداث شده است. شکل ۳ موقعیت جغرافیایی مخزن سد نگارستان را نشان داده است.

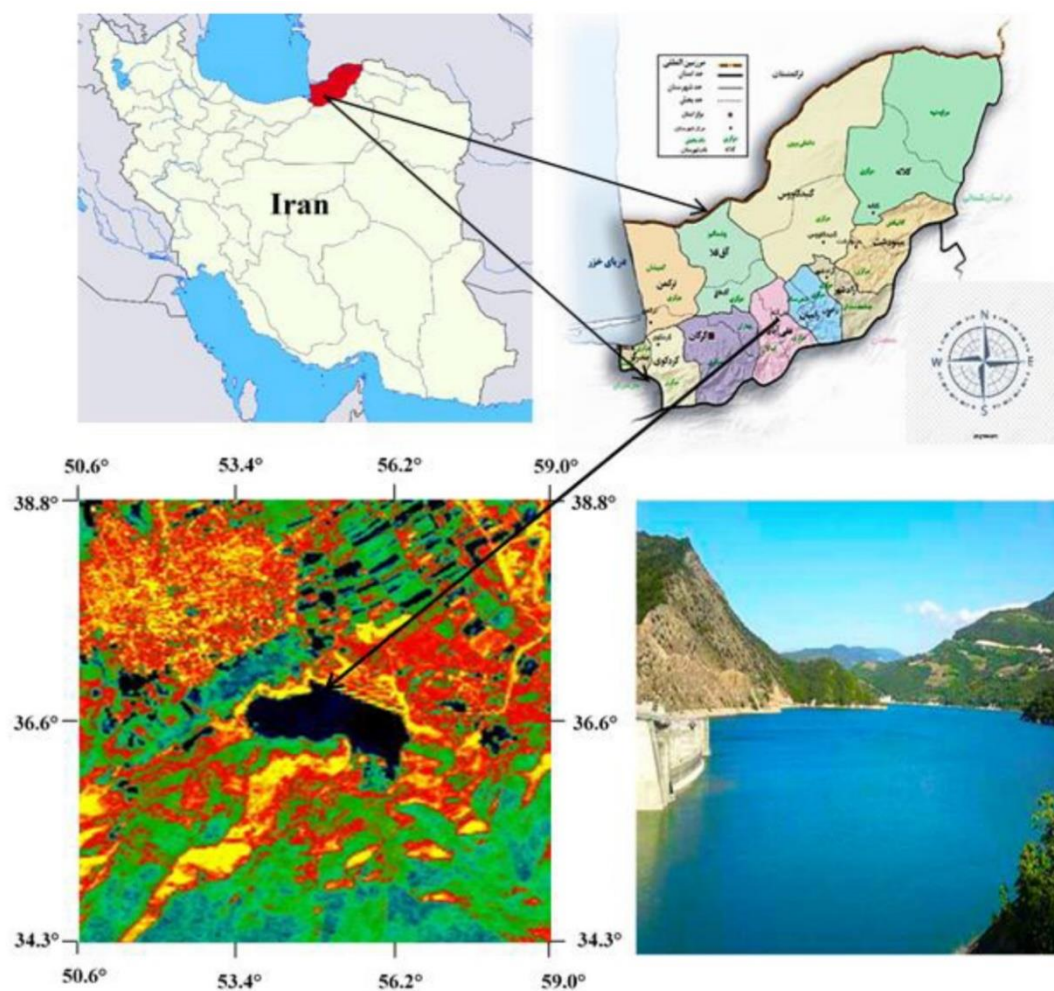
سپس با انتگرال‌گیری از مساحت‌های به‌دست آمده بین دو تراز سطح آب، حجم ذخیره آب را محاسبه نمودند. آن‌ها با مقایسه حجم ذخیره به‌دست آمده نسبت به حجم اولیه مخزن در زمان بهره‌برداری برای یک تراز ثابت، به سرعت رسوب‌گذاری با میزان خطای ۰/۰۵ درصد در سال دست‌یافتند.

مطالعات گذشته با استفاده از منحنی‌های خطی و چندجمله‌ای توانی به محاسبه منحنی سطح-ارتفاع مخزن پرداخته‌اند که باعث می‌شود در ترازهای سطح آب نزدیک به کف مخزن و یا در ترازهای نزدیک به تاج سرریز که مقادیر تراز سطح آب مشاهداتی به علت عدم وقوع وجود ندارند، برازش منحنی سطح-ارتفاع مخزن با خطای نسبی زیادی در برون‌یابی همراه باشد و دقت در نتایج تخمین ظرفیت ذخیره مخزن کاهش یابد. در این پژوهش به کمک تصاویر ماهواره Landsat8 OLI از روش جدید استرالر اصلاح‌شده^۱ برای ترسیم منحنی هیپسومتریک سطح-ارتفاع مخزن با هدف برآورد دقیق ظرفیت ذخیره‌سازی و تخمین نرخ رسوب‌گذاری در آن استفاده شده است. روش ارائه‌شده می‌تواند خطای مطالعات قبلی را با ترسیم چندمنحنی هیپسومتریک برای مخزن با استفاده از داده‌های کالیبراسیون ثابت و انتخاب منحنی سطح-ارتفاع بهینه کاهش دهد و با محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن در زمان فعلی و مقایسه آن با زمان شروع بهره‌برداری (شکل ۲)، حجم و نرخ رسوب‌گذاری و همچنین عمر مفید مخزن را پیش‌بینی کند. برای این منظور مخزن سد نگارستان در استان گلستان به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب و مورد ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۲- تغییر منحنی اولیه حجم-ارتفاع مخزن بر اثر رسوب-

Figure 2. Change of initial volume-water level curve of reservoir due to



شکل ۳- موقعیت جغرافیایی مخزن سد نگارستان

Figure 3- Geographical location of Negarestan reservoir dam

تصاویر ماهواره‌ای

ماهواره Landsat8 با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر و تفکیک زمانی ثبت تصاویر در هر ۱۶ روز یکبار در ۱۱ فوریه ۲۰۱۳ وارد مدار فضایی خود شد. این ماهواره شامل تصویرساز عملیاتی OLI و سنسور مادون قرمز حرارتی TIRS می‌باشد (Sekerterkin et al., 2018). تصاویر ماهواره Landsat8 شامل مجموعه‌ای از بلندهای مرئی، مادون قرمز، سیروس، پانکروماتیک و حرارتی می‌باشند که دسترسی به آن‌ها به صورت رایگان در آرشیو سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۱ (USGS) قرار دارد. در این پژوهش از تصاویر Level2 Collection2 این ماهواره که به صورت پیش فرض مورد تصحیحات اتمسفری قرار گرفته‌اند استفاده شده است (Teixeira Pinto et al., 2020).

داده‌های مخزن سد

برای اعتبارسنجی و مقایسه نتایج روش پیشنهادی ارائه‌شده، از منحنی حجم-سطح-ارتفاع اولیه مخزن سد نگارستان که در سال ۱۳۹۳ با استفاده از عملیات نقشه‌برداری کف مخزن توسط اداره آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه و تنظیم شده است و همچنین ترازهای سطح آب روزانه ثبت‌شده به کمک اشل استفاده شد. در شکل ۴ منحنی حجم-سطح-ارتفاع اولیه سد نگارستان نشان داده شده است.

پایگاه داده

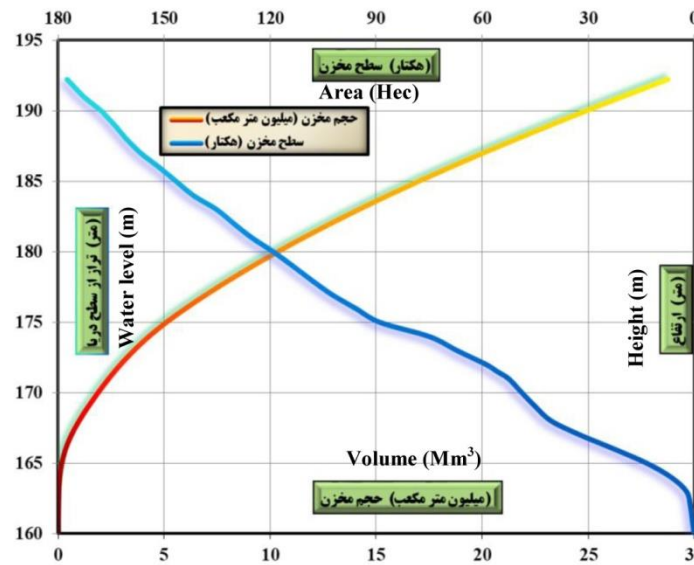
کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ^۲ (ICOLD) مجموعه‌ای از اطلاعات و داده‌های مربوط به مخازن با ظرفیت بیش از سه میلیون مترمکعب را در سراسر جهان گردآوری کرده است. این مؤسسه در سال ۱۹۲۸ تأسیس شد و هم‌اکنون دارای ۳۷ کمیسیون فنی با مشارکت حدود ده‌هزار نفر عضو از بیش از ۱۰۰ کشور دنیا است که در زمینه مدیریت و توسعه منابع آب فعالیت می‌کند. در این پژوهش برای مقایسه نرخ رسوب‌گذاری مخزن سد نگارستان با مخازن نقاط مختلف جهان از نمودار تهیه‌شده توسط (ICOLD) که میانگین نرخ رسوب‌گذاری سالانه برخی کشورهای دنیا را نشان می‌دهد استفاده شده است (شکل ۵).

ترسیم منحنی هیپسومتری به کمک داده‌های سطح-ارتفاع و روش استرالر اصلاح‌شده

سنجنده‌های سنجش‌ازدور از نظر منبع انرژی به دو دسته تقسیم می‌گردند. دسته اول خود منبع انرژی هستند که به آن‌ها سنجنده فعال می‌گویند و به سه دسته رادار، لیدار و سونار تقسیم می‌شوند. دسته دوم

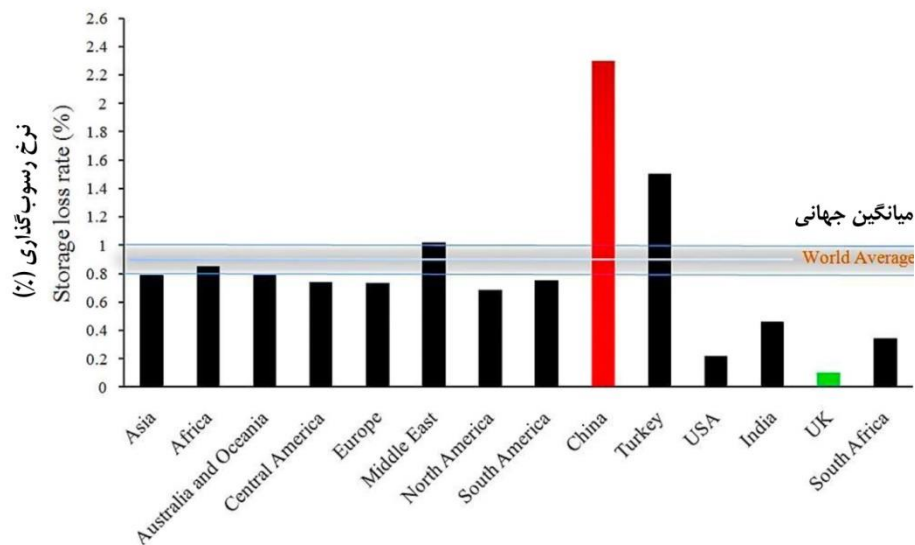
سنجنده‌های غیرفعال هستند که منبع انرژی آنها نور خورشید بوده و به دو دسته نوری و حرارتی تقسیم می‌گردند. در این مطالعه از تصاویر نوری استفاده شده‌است که شامل طیف‌های مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی می‌باشند. روش تفکیک و استخراج مناطق آب و خشکی به کمک سنجش‌ازدور مبتنی بر ایجاد یک آستانه تشخیص ناشی از تفاوت در بازتابش نور از سطح پدیده‌ها، یکی از پرکاربردترین روش‌ها محسوب می‌شود. برای ترسیم منحنی سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان تصاویر مورد مطالعه ماهواره Landsat8 OLI در بازه زمانی ۱۳۹۹-۱۴۰۲ به شکلی که تغییرات تراز سطح آب مخزن بین کم‌ترین و بیش‌ترین تراز مشاهداتی بیشینه شود و همچنین فواصل بین این ترازها دارای توزیع مناسبی در بازه تغییرات عمق آب باشند، دانلود شدند. پس از پیش‌پردازش رادیومتریکی، باندهای طیفی مرئی و مادون قرمز مربوط به هر تصویر استخراج و به کمک این باندها پنج شاخص طیفی آبی برای تعیین آستانه نهایی بین مناطق آب و خشکی در نرم‌افزار Env5.3 محاسبه شد. با ترکیب این پنج شاخص و تفکیک مناطق آب و خشکی می‌توان مساحت گستره‌های آبی را برای مناطق ابری، برفی و سایه‌دار شهری و غیرشهری با دقت بسیار بالا محاسبه کرد (Feiz abady et al., 2024). در سال‌های گذشته شاخص‌های آبی بسیاری برای تشخیص پیکره‌های آبی معرفی شده‌اند اما هیچ شاخص قطعی و بهینه‌ای برای استفاده در تمام مناطق جغرافیایی وجود ندارد. برای مثال در نزدیکی سواحل شاخص‌های آبی حساسیت متفاوتی را نشان می‌دهند. برای استفاده از خصوصیات شاخص‌های مختلف در این پژوهش، پنج شاخص آبی در مخزن سد نگارستان مورد ارزیابی قرار گرفتند که به‌طور مختصر شرح داده می‌شوند:

- شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDWIMcFeeters).
 - شاخص آب تفاضلی نرمال شده (NDWIGao).
 - شاخص اصلاح شده آب تفاضلی نرمال شده (MNDWI).
 - شاخص استخراج خودکار آب برای مناطق سایه‌دار (AWEIsh).
 - شاخص Tasseled Cap for Wetness (TCwet).
- شاخص NDWIMcFeeters در سال ۱۹۹۶ برای شناسایی و نظارت بر تغییرات آب درون بندنه‌های آبی مثل دریاچه‌های کوچک و بزرگ و مخازن ارائه شد. شاخص NDWI به خوبی نمی‌تواند برخی پیکسل‌های تصویر ماهواره‌ای مثل خاک تیره، مناطق با پوشش گیاهی کم، سایه‌ها و غیره را حذف کند و ممکن است مساحت پهنه‌های آبی را بیش از مقدار واقعی تخمین بزند (McFeeters., 1996).



شکل ۴- منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان در زمان شروع بهره‌برداری، سال ۱۳۹۳

Figure 4- Original Elevation-area-volume curve of negarestan reservoir dam at start time, 2015



شکل ۵- نمودار مقایسه نتایج میانگین نرخ رسوب‌گذاری سالانه مخازن کشورهای مختلف

Figure 5- Chart comparing the average annual sedimentation rate of reservoirs in different countries

در سال ۱۹۹۴ ارائه شد و از آن برای تشخیص رطوبت مناطق با پوشش‌های گیاهی استفاده شد. نام دیگر این شاخص NDMI است که از کاربردهای آن می‌توان به بررسی وجود آب در برگ‌های گیاهان نیز اشاره کرد. مطابق رابطه ۲ این شاخص با استفاده از باندهای مادون قرمز نزدیک و کوتاه محاسبه می‌شود (Gao & Goetz, 1994).

رابطه ۱ نحوه محاسبه این شاخص را با استفاده از باندهای طیفی مرئی سبز و مادون قرمز نزدیک بیان می‌کند:

$$NDWI_{McFeeters} = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR} \quad (1)$$

شاخص NDWI_{Gao} نیز برای تشخیص مناطق مرطوب اولین بار

(1994):

$$NDWI_{Gao} = \frac{NIR - SWIR_1}{NIR + SWIR_2} \quad (2)$$

شاخص MNDWI بهبود یافته شاخص NDWI می باشد (Xu, 2006) که در آن باند SWIR1 جایگزین باند NIR شده است و بازه تغییرات آن بین -۱ تا +۱ می باشد. عدد صفر می تواند آستانه مناسبی برای تعیین مرز بین آب و خشکی باشد ولی همیشه بهترین آستانه نیست. فرم ریاضی این شاخص با رابطه ۳ بیان شده است:

$$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR_1}{GREEN + SWIR_2} \quad (3)$$

شاخص AWEI_{sh} برای مناطق سایه دار شبیه شاخص AWEI_{sh} عمل می کند با این تفاوت که برای مناطق تیره وسیع مثل سایه در دره ها بهتر عمل می کند و علاوه بر باندهای استفاده شده در شاخص AWEI_{sh} باند آبی هم به آن اضافه شده و وزن شاخص ها تغییر پیدا کرده است (Feyisa et al., 2014). فرم ریاضی این شاخص در رابطه ۴ نشان داده شده است:

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR_1) - 0.25 \times SWIR_2 \quad (4)$$

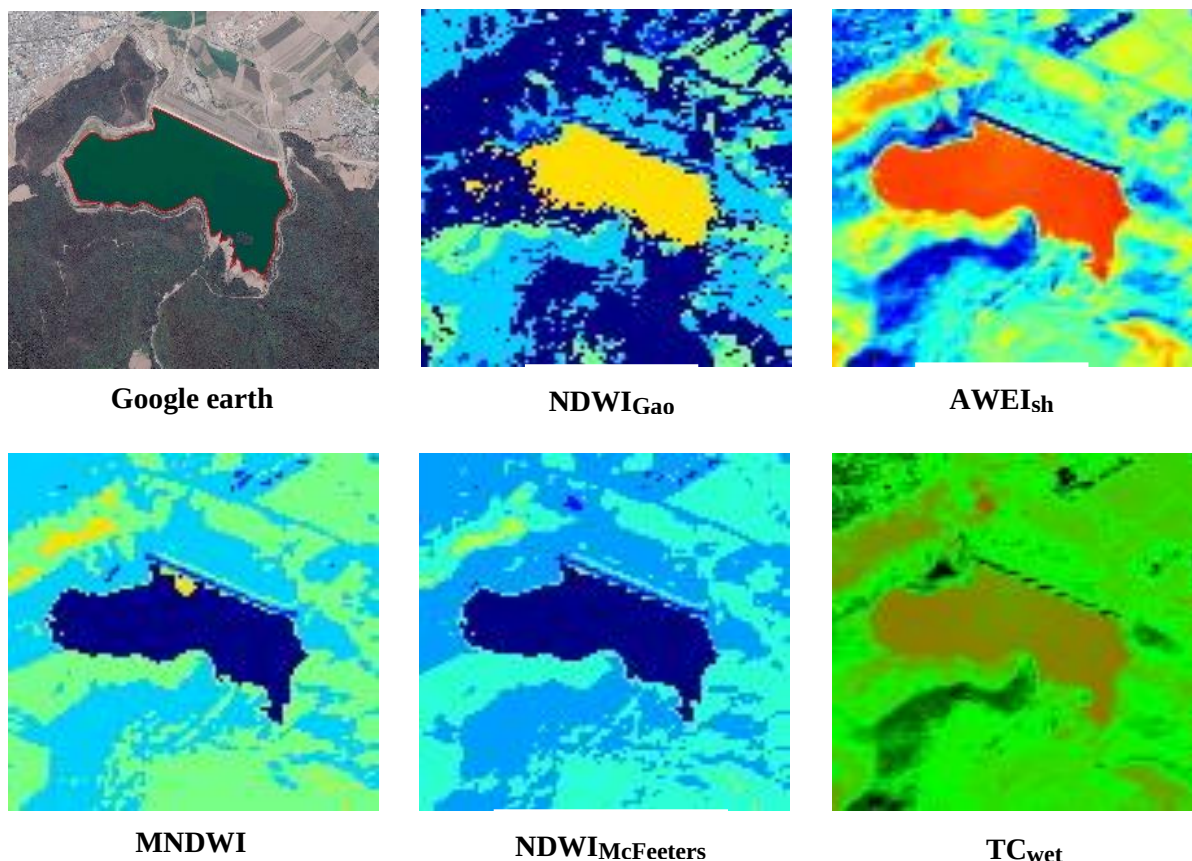
$$TC_{wet} = 0.1509 \times Blue + 0.1973 \times Green + 0.3273 \times Red + 0.3406 \times NIR - 0.7112 \times SWIR_1 - 0.4572 \times SWIR_2 \quad (5)$$

شاخص Tasseled Cap Wetness (TC_{wet}) با استفاده از ۶ باند طیفی و وزن دادن به هر کدام محاسبه شده است که شامل سه نوع مختلف روشنایی، پوشش گیاهی و مناطق مرطوب می باشد (Crist, 1985) که در این روش از نوع شاخص مناطق مرطوب برای تشخیص پهنه آب های سطحی طبق رابطه ۵ استفاده شده است:

شاخص های طیفی در روابط ۱ تا ۵ می توانند به تنهایی محدوده آب داخل مخزن را تا حد قابل قبولی مشخص کنند، اما برای یک تخمین دقیق از مساحت گستره آب مخزن در هر زمان دلخواه، نیاز است که دقت شاخص ها و ترکیب آن ها مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور تصویر مخزن سد نگارستان در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ کمی پس از شروع بهره برداری (عدم رسوب گذاری در کف مخزن) دانلود شد تا نتایج به دست آمده از محاسبه مساحت سطح آب آن با آمار ثبت شده توسط اداره آب منطقه ای گلستان مقایسه و مورد ارزیابی قرار گیرد. مطابق گزارش آب منطقه ای گلستان و نمودار سطح-ارتفاع اولیه مخزن (شکل ۴)، در تاریخ مورد مطالعه تراز سطح آب و مساحت

سطح آب مخزن به ترتیب ۱۸۲/۶۳ متر و ۱/۳۳ کیلومتر مربع ثبت و گزارش شده است. تصویر مورد مطالعه از پایگاه USGS و به فرمت Level2 Collection2 که به صورت پیش فرض تصحیحات اتمسفری بر آن اعمال شده، دانلود و در نرم افزار Envi5.3 مورد تصحیحات رادیومتریکی قرار گرفت. سپس یک Layer stack متشکل از ترکیب باندهای طیفی مورد نیاز برای محاسبه شاخص های طیفی آبی ساخته شد و با استفاده از روابط ۱ تا ۵ عملیات Band math بر روی تصویر انجام شد. شکل ۶ تصاویر پردازش شده برای هر شاخص طیفی را در مقایسه با تصویر واقعی دانلود شده از گوگل ارث برای مخزن سد نگارستان نشان داده است.

هر تصویر مورد مطالعه در محدوده مخزن سد شامل ۲۱۲۶ پیکسل ۳۰×۳۰ متر ماهواره Landsat8 است که مساحت حداکثری برابر با ۱/۹۱ کیلومتر مربع را تشکیل می دهد. این مساحت متناظر با حداکثر تراز سطح آب ۱۹۴ متر می باشد (مطابق شکل ۴) که از تراز تاج سرریز سد (۱۹۲/۲۵ متر مطابق گزارش آب منطقه ای گلستان) بالاتر بوده و در عمل اتفاق نخواهد افتاد. برای محاسبه مساحت سطح آب ابتدا پیکسل های تصویر برای شاخص های ارائه شده از کم ترین تا بیش ترین مقدار در نمودار تجمعی خود مرتب می شوند و در شاخص MNDWI شماره پیکسلی که مقدار آن برابر صفر باشد به عنوان پیکسل آستانه اولیه بین مناطق آب و خشکی در نظر گرفته می شود، سپس دودرصد از تعداد پیکسل ها به صورت ۱- تا ۱+ درصد نسبت به پیکسل آستانه اولیه به عنوان محدوده اطمینان برای جلوگیری از خطاهای احتمالی سنجنده در ارسال اطلاعات انتخاب می شوند و به نمودار فراوانی داده های هر شاخص انتقال می یابند تا با میانگین گیری در این بازه مقدار نهایی آستانه آب و خشکی برای شاخص مورد نظر مشخص شود. شماره پیکسلی که مقدار آن برابر با میانگین به دست آمده در محدوده اطمینان باشد به عنوان پیکسل آستانه نهایی برای شاخص مورد نظر انتخاب می شود و این روند برای تمام شاخص های طیفی مورد مطالعه صورت می گیرد تا پنج پیکسل آستانه بین مناطق آب و خشکی تعیین گردد. با محاسبه مجموع مساحت پیکسل هایی که آب تشخیص داده می شوند مساحت به دست آمده به کمک هر شاخص طیفی تخمین زده می شود. با این روش بهترین آستانه برای تفکیک مناطق آب و خشکی حتی برای روزهای ابری و یا مناطق با سایه های وسیع محاسبه می شود که پیش تر به صورت کامل توضیح داده شده است و در اینجا به بیان خلاصه ای از آن اکتفا شد (Feizabady et al., 2024). در جدول ۱ نتایج محاسبه مساحت سطح آب برای مخزن سد نگارستان در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۲۱ با استفاده از پنج شاخص طیفی آبی ارائه شده نشان داده شده است.



شکل ۶- تفکیک مناطق آب و خشکی در محدوده سد نگارستان با استفاده از شاخص‌های طیفی
Figure 6. Separation Land-water masks in region of Negarestan reservoir using spectral water indices.

جدول ۱- مقادیر سطح آب و خطای محاسبات در محدوده سد نگارستان با استفاده از شاخص‌های طیفی آبی، ۱۳۹۳/۱۰/۲۱
Table 1- Water surface areas and calculating errors of Negarestan reservoir using spectral indices, 2015/01/11

	TCwet	AWEI _{sh}	MNDWI	NDWI _{Gao}	NDWI _{McFeeters}
پیکسل آستانه‌نهایی Final threshold pixel	770	782	758	903	772
سطح آب Water surface area (km ²)	1.22	1.21	1.23	1.10	1.22
سطح خشکی Land area (km ²)	0.69	0.70	0.68	0.81	0.69
خطای محاسبه سطح (%) Area calculate error (%)	8	9	7	9	8

منحنی سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان، از شاخص طیفی MNDWI با میانگین خطای حدود ۵ درصد در محاسبه سطوح آب استفاده شد. بنابراین ۱۰ تصویر از مخزن نگارستان در بازه زمانی ابتدای سال ۱۳۹۹ تا انتهای ۱۴۰۲ به شکلی که محدوده ترازهای سطح آب، کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار مشاهداتی را پوشش دهند و در این بازه توزیع تقریباً یکنواختی داشته باشند دانلود شدند و مطابق با

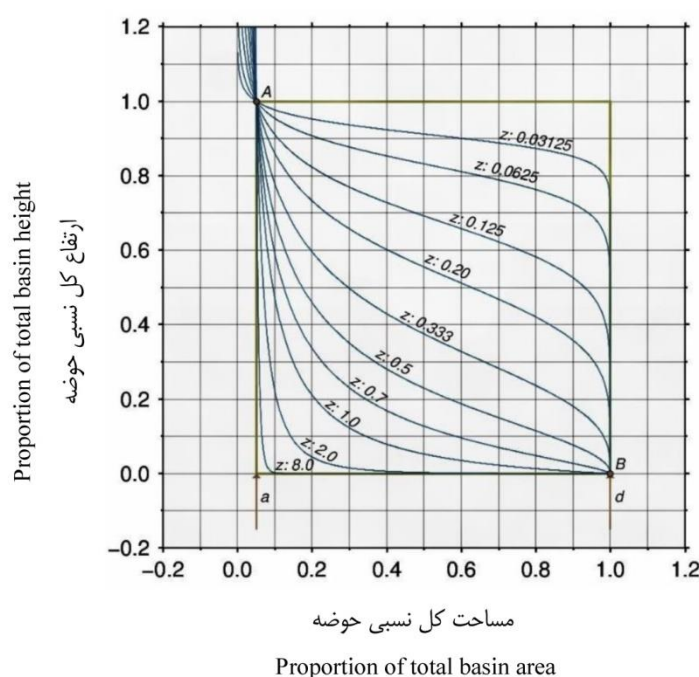
مطابق نتایج به دست آمده در جدول ۱، بین شاخص‌های طیفی ارائه شده، شاخص MNDWI در محاسبه سطح آب دقت بیشتری دارد و خطای آن در حدود ۷ درصد می باشد. همچنین نتایج محاسبه سطوح آب برای ۶ تصویر ماهواره‌ای مختلف دیگر (نزدیک به زمان شروع بهره‌برداری مخزن) ارزیابی و با منحنی حجم-سطح-ارتفاع اولیه مقایسه شد که براساس نتایج به دست آمده به منظور ترسیم

مورد استفاده قرار گرفت (Schwatke et al., 2020). استرالر برای تطبیق بهترین منحنی هیپسومتریک از یک رابطه با سه متغیر (a, d, z) استفاده کرد (رابطه ۶). در رابطه ۶، متغیر X نشان‌دهنده مساحت نرمال‌شده حوضه و متغیر Y نشان‌دهنده ارتفاع نرمال‌شده حوضه می‌باشند.

$$Y = \left[\frac{d-x}{x} \times \frac{a}{d-a} \right]^z \quad (6)$$

رابطه اصلی استرالر (رابطه ۶) بر اساس دو عدد ثابت a و d که در آن $d > a$ و $z > 0$ باشد برقرار است. تمام توابعی که برای توان‌های مختلف z نوشته می‌شوند نقاط A(a,1) و B(d,0) را مطابق شکل ۷ قطع می‌کنند. بنابراین بازه تغییرات متغیرهای محور X و Y به ترتیب بین (0,1) و (a,d) خواهد بود. شکل ۷ منحنی هیپسومتریک بر پایه رابطه اصلی استرالر برای توان‌های مختلف z و همچنین مقادیر a و d به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۱ را نشان داده است.

روش بیان‌شده تعیین سطح آب در آن‌ها انجام شد تا به‌عنوان نقاط واسنجی در ترسیم منحنی هیپسومتری مخزن استفاده شوند. منحنی هیپسومتریک نموداری است که با رسم مساحت‌نسبی در برابر ارتفاع‌نسبی، نسبت مساحت پدیده‌ها را در ارتفاعات مختلف نشان می‌دهد (Strahler, 1952). هر دریاچه یا مخزن دارای یک رابطه سطح-ارتفاع مشخص است که تغییرات آن به تغییرات توپوگرافی مخزن بستگی دارد (Schwatke et al., 2020). در مطالعات قبلی برای ترسیم منحنی سطح-ارتفاع مخزن از توابع خطی و چندجمله‌ای استفاده شده است که نمی‌توانند تمام تغییرات سطح-ارتفاع ناشی از تغییرات توپوگرافی را به‌خوبی نشان دهند. باتوجه به توپوگرافی کف‌وجانی مخزن یک تابع هیپسومتریک باید به‌طور یکنواخت در حال افزایش باشد (Duan & Bastiaanssen., 2013 ; Arsen et al., 2013). در سال ۱۹۵۲ استرالر یک منحنی هیپسومتری ترسیم کرد که سطح مقطع افقی یک حوضه‌زهکشی را به ارتفاع آب بالای دهانه آن مرتبط می‌ساخت و برای تحلیل فرسایش توپوگرافی حوزه‌ها



شکل ۷- منحنی هیپسومتری با رابطه استرالر اصلی

Figure 7- Hypsometric curve using original Strahler approach

مساحت سطح آب حداقل و حداکثر مشخص نباشد. دلیل آن‌هم این است که در بازه زمانی مورد مطالعه در هیچ‌زمانی مخزن خالی از آب نشده و همچنین رویدادهای شدید مثل سیلاب‌ها اتفاق نیفتاده‌است تا تراز سطح آب مخزن به‌حداکثر مقدار خود برسد. بنابراین روش استرالر مطابق رابطه ۷ برای تخمین منحنی هیپسومتریک مخزن اصلاح شد

روش اصلی استرالر که به آن اشاره‌شد می‌تواند برای تجزیه و تحلیل همه حوضه‌های زهکشی که در آن‌ها مساحت و ارتفاع حداقل و حداکثر مشخص است استفاده شود. به‌طور کلی می‌توان فرض کرد که توپوگرافی دریاچه‌ها و مخازن دارای ویژگی‌هایی مشابه حوضه‌های زهکشی است، با این تفاوت که در مطالعه ما ممکن است

تا بتواند نقاط ابتدایی و انتهایی بازه مورد نظر را پوشش دهد.

$$Y = \left[\frac{(x_{min} - x)}{(x_{min} - x_{ip})} \times \frac{(x_{max} - x_{ip})}{(x_{max} - x)} \right]^z \times Y_{Scale} + Y_{min} \quad (7)$$

رابطه ۷ دارای ۶ پارامتر است که در آن X_{min} و X_{max} به ترتیب مساحت حداکثر و حداقل منحنی هیپسومتری می باشند و مقدار آن ها می تواند بین ۰ تا مساحت سطح آب حداکثر در زمان پر بودن مخزن تغییر کند. حداقل تراز سطح آب مشاهداتی برابر با Y_{min} و تغییرات عمق آب برابر با Y_{scale} می باشد. در این رابطه نمای z فرم کلی منحنی را نشان می دهد و مقدار آن با واسنجی کردن رابطه ۷ و با استفاده از نتایج تخمین مساحت سطح آب به کمک شاخص MNDWI محاسبه می شود. X_{ip} مساحت متناظر با تراز سطح آب $Y + Y_{scale}$ است. بدیهی است که هر چه مقدار مساحت مشاهداتی متناظر با تراز سطح آب Y_{min} به صفر نزدیک تر باشد ($X_{min} = 0$) نتایج محاسبات با دقت بیشتری به دست خواهد آمد. از آنجایی که عمق آب مخازن به راحتی قابل تشخیص نیست باید یک فرض مناسب تا حد امکان دقیق برای Y_{min} در نظر گرفته شود تا بتوان ظرفیت ذخیره مخزن را بین کف و پایین ترین تراز سطح آب مشاهداتی با دقت بیشتری تخمین زد. به منظور حل این مشکل ابتدا منحنی هیپسومتریک برای مساحت های محاسباتی ترسیم شد و با استفاده از چندجمله ای توانی و در نظر گرفتن این نکته که منحنی هیپسومتریک باید به طور یکنواخت افزایش یابد تراز سطح آب متناظر با مساحت صفر تخمین زده شد و در نهایت این نقطه به عنوان شروع منحنی هیپسومتریک در نظر گرفته شد.

محاسبه ظرفیت ذخیره سازی مخزن

با برازش منحنی هیپسومتریک می توان برای هر سطح آب دلخواه تراز سطح آب متناظر با آن را به دست آورد و با استفاده از رابطه منشوری (Jain et al., 2002) که برای محاسبه حجم آب مخازن بین دو تراز متوالی ارائه شده است می توان ظرفیت ذخیره سازی جدید مخزن را مطابق رابطه ۸ محاسبه کرد:

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{3} \{ (A_1 + A_2) + \sqrt{A_1 \times A_2} \} \quad (8)$$

که در آن ΔV ظرفیت ذخیره مخزن بین دو تراز متوالی (H_1 و H_2) در دو زمان متفاوت، A_1 و A_2 به ترتیب مساحت پهنه آب در ترازهای H_1 و H_2 ، و ΔH اختلاف تراز سطح آب بین دو تراز متوالی H_1 و H_2 می باشد. در رابطه منشوری (رابطه ۸) هر چقدر فاصله بین سطح های متوالی کمتر باشد دقت محاسبات افزایش خواهد یافت (Vidya et al., 2023).

محاسبه نرخ رسوب گذاری و عمر مفید مخزن

پس از محاسبه حجم بین ترازهای مختلف آب و به دست آوردن ظرفیت ذخیره سازی نهایی مخزن، نرخ رسوب گذاری سالانه (SR) در یک دوره زمانی مشخص از رابطه ۹ به دست می آید (Haregeweyn et al., 2012)، که در آن N تعداد سال های دوره مورد نظر و V_1 و V_2 به ترتیب ظرفیت ذخیره مخزن در ابتدا و انتهای دوره می باشند:

$$SR_{(year)} = \frac{1}{N} \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1} \right) \times 100 \quad (9)$$

هم چنین عمر مفید مخزن بر حسب سال مطابق رابطه ارائه شده توسط (Haregeweyn et al., 2012) از رابطه ۱۰ قابل محاسبه خواهد بود:

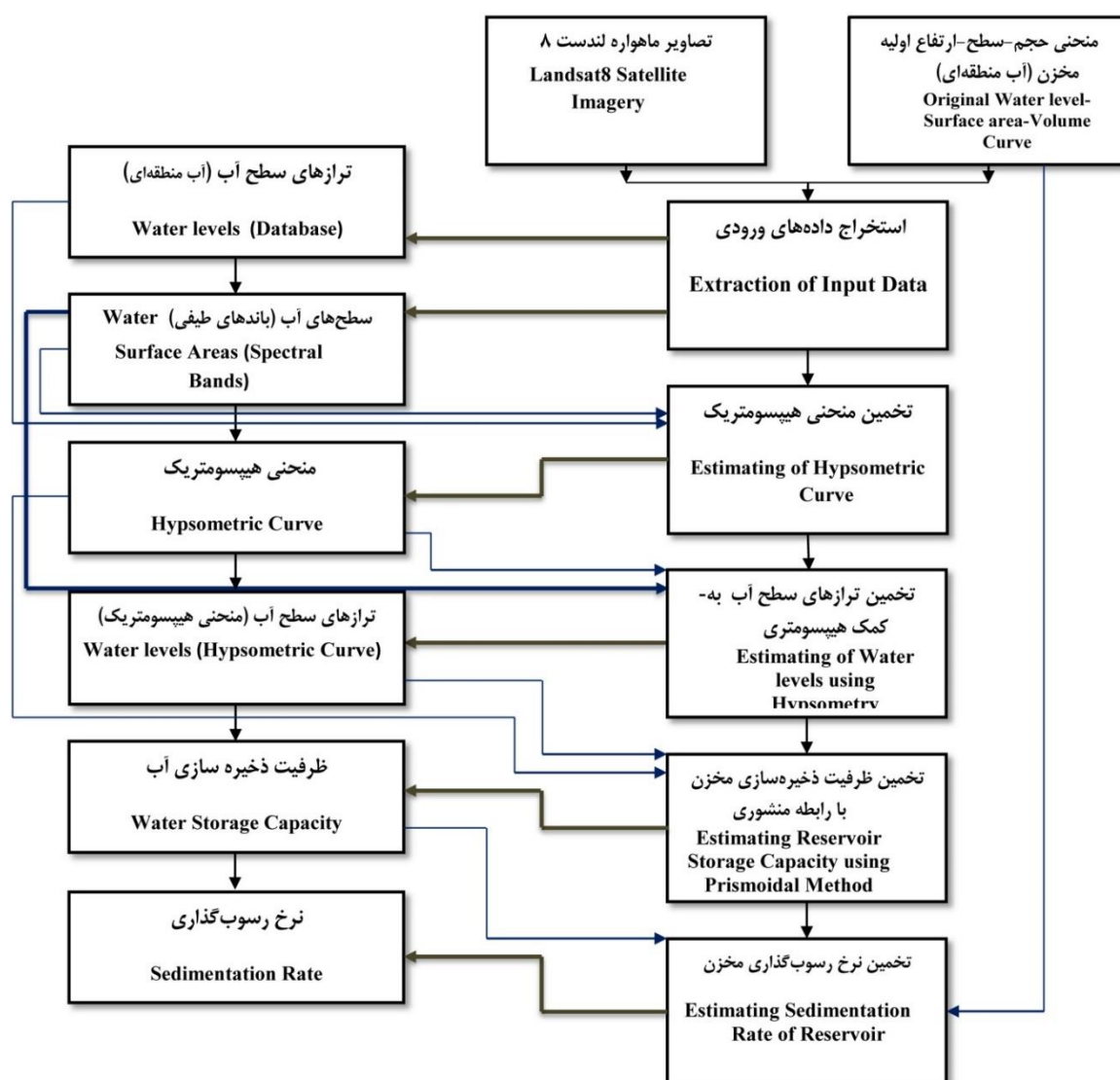
$$LE_{(year)} = \frac{UV}{SR} \quad (10)$$

در این رابطه LE عمر مفید مخزن به سال، UV ظرفیت مفید باقی مانده مخزن بر حسب درصد (مطابق نتایج به دست آمده در این مطالعه) و SR نرخ رسوب گذاری سالانه می باشد.

نتایج و بحث

با توجه به ترازهای گزارش شده توسط آب منطقه ای گلستان از انتهای سال ۱۳۹۸ تا سال ۱۴۰۳ ده تصویر از مخزن سد نگارستان برای واسنجی کردن منحنی هیپسومتری دانلود و تعیین سطح آب در آن ها انجام شد که در جدول ۲ مقادیر به دست آمده ارائه شده است. تاریخ های انتخاب شده در جدول ۲ به شکلی در نظر گرفته شدند که علاوه بر ایجاد یک بازه تغییرات عمق آب حداکثری، توزیع تقریباً یکنواختی بین کم ترین و بیش ترین عمق آب مشاهداتی داشته باشند تا در ترسیم منحنی هیپسومتری دقت بالاتری به دست آید. همچنین سعی شد تاریخ تصاویر انتخابی به زمان حاضر نزدیک تر باشد تا در بازه زمانی مورد ارزیابی، اثرات رسوب گذاری بر توپوگرافی کف مخزن نسبت به گذشت زمان کاهش یابد. با این حال محدودیت هایی نیز وجود دارد. برای ترسیم منحنی هیپسومتری استرالر اصلاح شده ترازهای سطح آب مشاهداتی و مساحت های محاسبه شده به عنوان نقاط کالیبراسیون در نظر گرفته شدند و با استفاده از رابطه ۷ منحنی هیپسومتریک برای مقادیر مختلف نمایی z ترسیم شد تا نزدیک ترین منحنی به مقادیر واقعی به دست آید. شکل ۹ منحنی های هیپسومتریک مخزن سد نگارستان را برای مقادیر مختلف z نشان داده است.

در شکل ۹ نقاط واسنجی برای کمک به انتخاب بهترین نمای z که بتواند منحنی هیپسومتری بهینه را برازش دهد نشان داده شده است. نتایج نشان داد z برابر با ۰/۶۵ می تواند بهترین نما برای رابطه استرالر اصلاح شده (رابطه ۷) باشد. مطابق آن چه پیش بینی شد منحنی هیپسومتریک بهینه به طور یکنواخت روند صعودی دارد.



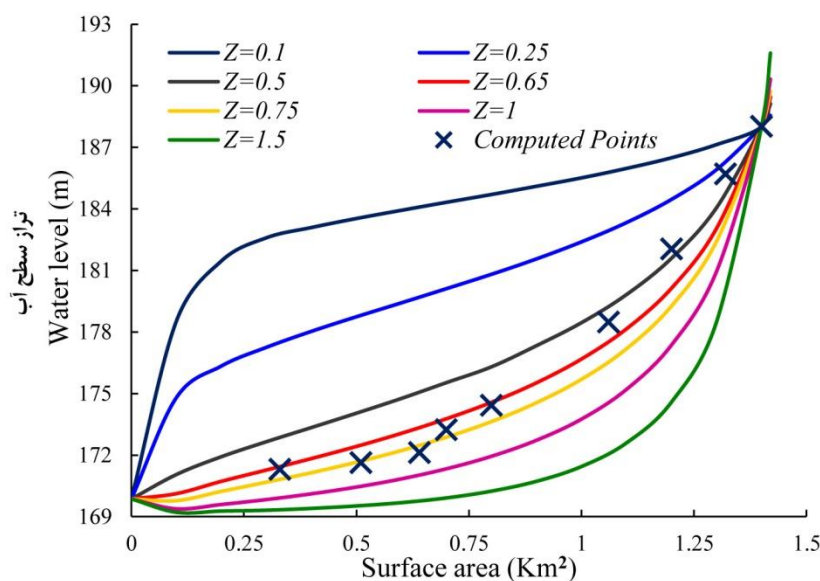
شکل ۸- فلوچارت مراحل انجام فرآیند تخمین نرخ رسوبگذاری مخزن

Figure 8- Flowchart of applied processing steps of estimating sedimentation rate of reservoir

جدول ۲- نتایج محاسبه مساحت سطح آب با استفاده از شاخص MNDWI برای مخزن نگارستان

Table 2- The results of computed water surface areas using MNDWI index of Negarestan reservoir.

تاریخ Date	تراز سطح آب Water level (m)	مساحت محاسبه شده Computed Surface area (Km ²)	مساحت اولیه Original surface area (Km ²)
2018.06.11	188.00	1.40	1.60
2020.01.28	171.62	0.51	0.56
2020.10.14	173.22	0.70	0.75
2021.09.23	171.29	0.33	0.56
2022.03.30	182.03	1.17	1.30
2022.07.17	178.47	1.06	1.10
2022.08.25	174.41	0.79	0.81
2022.10.05	171.69	0.64	0.57
2023.04.30	185.69	1.32	1.77
2024.02.15	175.60	0.89	0.94



شکل ۹- منحنی‌های هیپسومتریک به ازاء مقادیر مختلف نمای z برای مخزن نگارستان

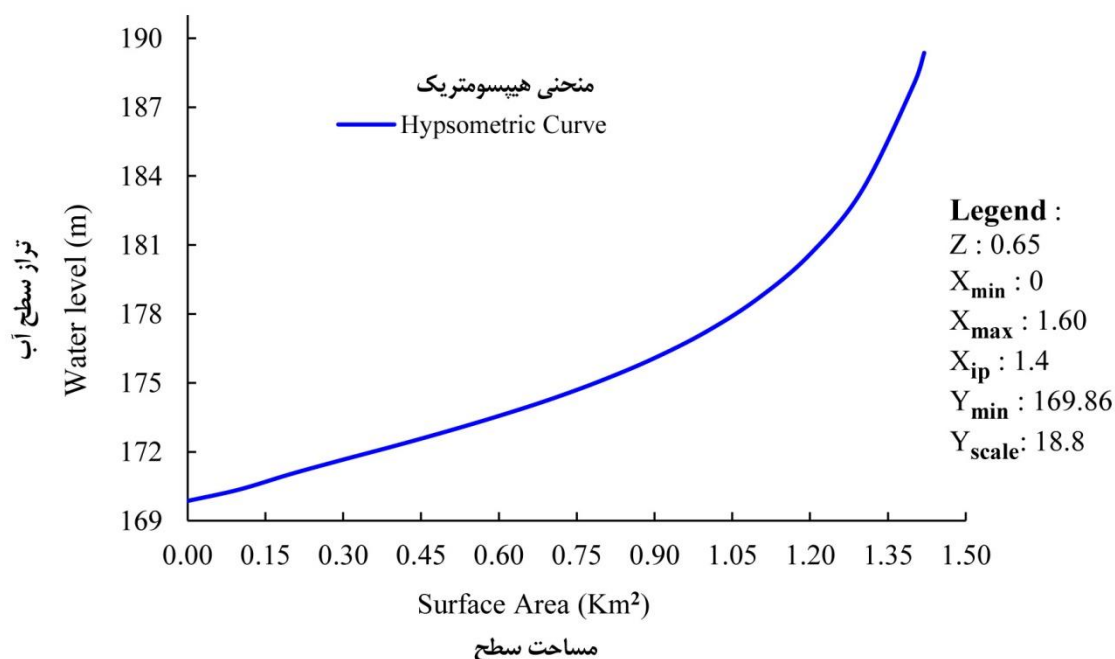
Figure 9- Hypsometric curves of Negarestan reservoir for different exponent z

جای گذاری شدند. شکل ۱۱ منحنی حجم-ارتفاع به دست آمده از رابطه منشوری و اولیه مخزن نگارستان را در بازه زمانی ۹ ساله نشان داده است.

باتوجه به شکل ۱۱ حجم رسوب انباشته شده در مخزن از اختلاف منحنی محاسباتی و اولیه مخزن در زمان شروع بهره برداری قلیل محاسبه است. منحنی محاسباتی حجم-ارتفاع مخزن نشان می دهد که در تراز حدود ۱۷۰ متر ظرفیت ذخیره سازی مخزن به صفر رسیده است. در حالی که منحنی اولیه مخزن تراز متناظر با حجم آب ذخیره شده صفر یا خالی بودن مخزن را برابر ۱۶۰ متر در سال ۱۳۹۳ گزارش می کند. به کمک رابطه منشوری و شکل ۱۱ می توان مقدار ظرفیت ذخیره از دست رفته مخزن بین دو تراز سطح آب دلخواه متوالی را نیز محاسبه کرد. مطابق با داده های منحنی اولیه آب منطقه ای گلستان (شکل ۴)، ظرفیت ذخیره سازی مخزن بین تراز ۱۶۰ (تراز کف اولیه مخزن) و تراز ۱۸۹/۴۷ متر (تراز سرریز) حدود ۲۳/۹۰ میلیون متر مکعب گزارش شده است که براساس نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی (شکل ۱۱) این ظرفیت در پایان سال ۱۴۰۲ به حدود ۲۰/۲۵ میلیون متر مکعب کاهش یافته است. با استفاده از رابطه ارائه شده برای محاسبه نرخ رسوب گذاری در مخازن (رابطه ۹) نرخ رسوب گذاری سالانه مخزن سد نگارستان از انتهای سال ۱۳۹۳ تا انتهای سال ۱۴۰۲ حدود ۱/۶ درصد محاسبه شد. نرخ رسوب گذاری به دست آمده بیان می کند که مخزن سد نگارستان به طور میانگین، سالانه حدود ۱/۶ درصد از ظرفیت ذخیره سازی آب خود را بر اثر ته نشینی رسوبات از دست می دهد.

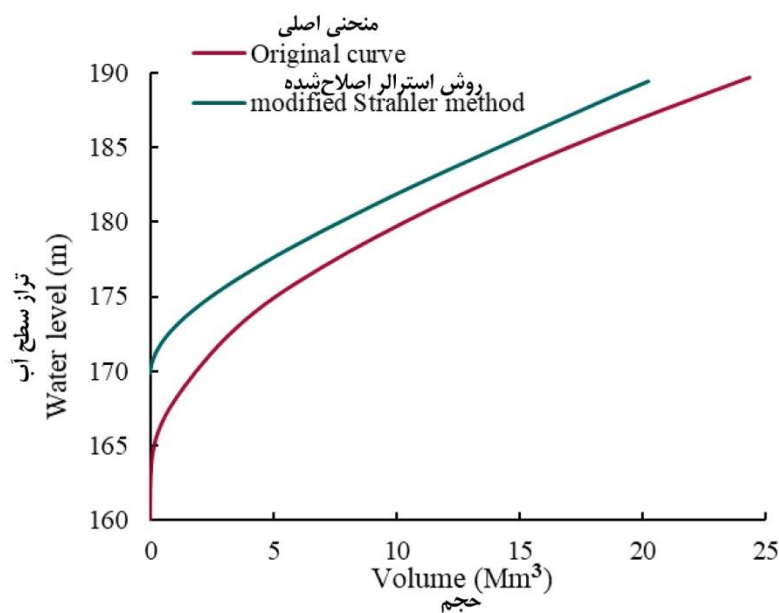
مطابق منحنی هیپسومتریک (شکل ۱۰) نقاط تقاطع کم ترین (صفر) و بیش ترین (۱/۴۲ کیلومتر مربع) مساحت محاسبه شده با ترازهای سطح آب به ترتیب ۱۶۹/۸۶ و ۱۸۹/۴۷ متر می باشد. همچنین شکل ۹ نشان می دهد در صورتی که مقادیر z افزایش یابد، سطح زیر منحنی هیپسومتریک کاهش پیدا می کند که نتیجه آن کاهش ظرفیت ذخیره مخزن خواهد بود. بنابراین انتخاب مناسب نمای z مسئله ای مهم در ترسیم این منحنی است. شکل ۱۰ منحنی هیپسومتریک استرالر اصلاح شده با z برابر ۰/۶۵ را برای نتایج مساحت های سطح آب به دست آمده به کمک شاخص MNDWI نشان داده است.

با برازش منحنی هیپسومتریک نهایی مخزن (شکل ۱۰) می توان در هر سطح آب دلخواه تراز آب متناظر با آن را با دقت بالایی محاسبه کرد. مزیت اصلی این منحنی نسبت به منحنی چندجمله ای، پیش بینی دقیق حداکثر و حداقل سطح آب مخزن در زمانی است که بازه تغییرات داده های مشاهداتی بین کم ترین و بیش ترین تراز سطح آب محدود باشد، برای مثال سطح آب مخزن کاهش یا افزایش قابل توجهی بر اثر عواملی مثل خشکسالی ها و یا سیلاب ها نداشته باشد. همچنین این منحنی به کمک نماهای z متفاوت این امکان را می دهد که بتوان با دقت قابل قبولی رابطه ای مناسب بین مقادیر واقعی و محاسباتی برقرار کرد. برای محاسبه ظرفیت ذخیره مخزن به کمک منحنی هیپسومتریک، ترازهای سطح آب بین تراز کمینه و بیشینه ۱۶۹/۸۶ تا ۱۸۹/۴۷ متر به فاصله های متوالی ۰/۵ متری انتخاب شدند و مساحت های متناظر با آن ها از روی نمودار سطح-ارتفاع جدید محاسبه و نتایج در رابطه محاسبه حجم آب منشوری (رابطه ۸)



شکل ۱۰- منحنی هیپسومتریک نهایی مخزن نگارستان در z برابر با ۰/۶۵

Figure 10- Final hypsometric curve of Negarestan reservoir in $z=0.65$



شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های حجم-ارتفاع اولیه و محاسباتی به کمک منحنی هیپسومتریک مخزن نگارستان، بازه ۹ ساله

Figure 11- Comparing of original and computed hypsometric method water level-volume curves of Negarestan reservoir, at 9 years' time range

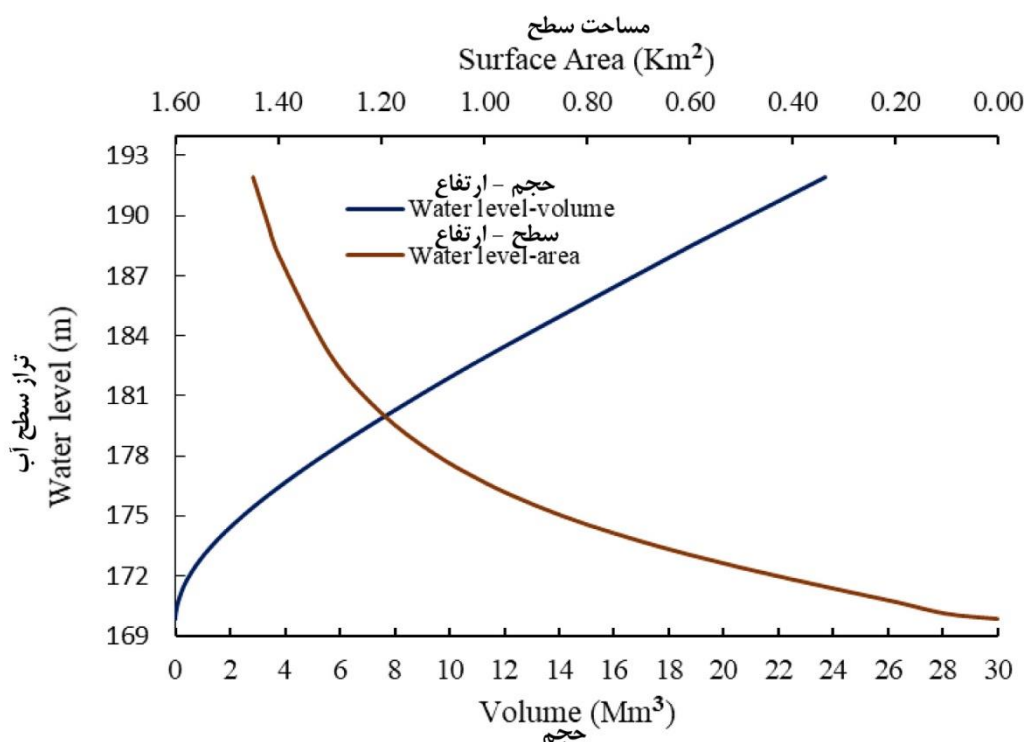
نگارستان تا سال ۱۴۲۵ حدود نیمی از ظرفیت ذخیره‌سازی خود را از دست خواهد داد. در تخمین عمر مفید مخزن فرض بر این است که

بنابراین عمر مفید مخزن با استفاده از رابطه ۱۰ حدود ۵۳ سال به دست آمد. بر این اساس مطابق نتایج به دست آمده مخزن سد

کشورهای توسعه یافته که عملیات آبخیزداری در آن‌ها به شکل مناسبی انجام می‌شود سالانه بین ۰/۵ تا ۱ درصد می‌باشد (Niykadzino *et al.*, 2021). در مخازن ایران نرخ متوسط رسوب گذاری کمتر از یک درصد و بین حدود ۰/۵۵ تا ۰/۷۵ درصد سالانه گزارش شده است (Imanshoar *et al.*, 2009). با بررسی و ارزیابی نتایج سایر پژوهش‌ها مشخص می‌شود که مخزن سد نگارستان از نظر نرخ رسوب گذاری مقداری بیش از متوسط اکثر مخازن در نقاط مختلف جهان دارد و این مقدار بین ۱/۵ تا ۲ برابر متغیر می‌باشد. در پژوهش‌های گذشته برای ترسیم منحنی سطح-ارتفاع مخازن از توابع خطی یا چندجمله‌ای استفاده شده است، در این پژوهش روشی مبتنی بر ایجاد یک منحنی هیپسومتریک که می‌تواند نقاط ابتدایی و انتهایی بازه در کمترین و بیشترین تراز سطح آب را تخمین بزند و به ازاء نقاط کالیبراسیون ثابت چندین منحنی هیپسومتری برای مخزن ترسیم کند تا با مقایسه این منحنی‌ها بتوان منحنی سطح-ارتفاع بهینه مخزن را انتخاب کرد ارائه شد. در شکل ۱۲ منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن نگارستان با استفاده از مساحت‌ها و ترازهای سطح آب منحنی هیپسومتریک و رابطه منشوری، برای مقایسه با منحنی اولیه آب منطقه‌ای گلستان (شکل ۴) نشان داده شده است.

شرایط اقلیمی در آینده تغییر چندانی نکند. ولی در صورت وقوع پدیده‌هایی مثل سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و یا تغییر در نحوه کاربری اراضی در بالادست مخزن و نحوه مدیریت آبخیزداری عمر مفید مخزن می‌تواند از مقدار پیش‌بینی شده کمتر باشد. باتوجه به شکل ۵، کمیسیون بین‌المللی مخازن بزرگ (ICOLD) که به بررسی و جمع‌آوری اطلاعات حدود ۶۲۰۰۰ مخزن در سراسر جهان پرداخته است طبق گزارشی در سال ۲۰۱۹ متوسط نرخ رسوب گذاری مخازن جهان را حدود ۰/۹۶ درصد برآورد کرده است (Madadi, 2022). این کمیسیون همچنین نرخ متوسط رسوب گذاری در مخازن آسیا را حدود ۰/۸۰ درصد گزارش کرده است (شکل ۵).

محاسبات نرخ رسوب گذاری مخزن سد نگارستان با استفاده از روش پیشنهادی (محاسبه سطح آب استرالر اصلاح شده) و همچنین تخمین ظرفیت ذخیره مخزن با رابطه منشوری نشان داد که متوسط نرخ رسوب گذاری سالانه مخزن نگارستان حدود ۱/۶ درصد می‌باشد که در مقایسه با متوسط جهانی و آسیا به ترتیب ۰/۶۴ و ۰/۸ درصد بیش تر است. مطابق این گزارش تنها کشورهای چین و ترکیه دارای نرخ متوسط رسوب گذاری بیشتری نسبت به سد نگارستان می‌باشند. همچنین گزارش‌ها نشان می‌دهد نرخ رسوب گذاری مخازن در



شکل ۱۲- منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن سد نگارستان با استفاده از روش پیشنهادی

Figure 12- Water level-area-volume of Negarestan reservoir using suggested method

مهم‌ترین تفاوت منحنی شکل ۱۲ با منحنی اولیه مخزن در زمان بهره‌برداری نقطه شروع منحنی حجم-ارتفاع در تراز سطح آب ۱۶۹/۸۶ متر است که نشان می‌دهد بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۳ متوسط عمق و حجم رسوب‌گذاری در مخزن تا این تراز به ترتیب حدود ۱۰ متر و ۲ میلیون متر مکعب بوده است که این حجم از رسوبات معادل ۶۵ درصد حجم کل رسوب انباشته‌شده در مخزن نگارستان می‌باشد. براساس نتایج و ارزیابی‌های صورت گرفته می‌توان از منحنی ارائه شده در شکل ۱۲ به عنوان جایگزین مناسبی برای منحنی حجم-سطح-ارتفاع مخزن نگارستان استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که به دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد، ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سد نگارستان در بازه زمانی ۹ ساله از حدود ۲۴ به ۲۰ میلیون متر مکعب کاهش یافته است که نرخ رسوب‌گذاری سالانه در این بازه زمانی حدود ۱/۶ درصد به دست آمد. این مقدار نرخ رسوب‌گذاری حدود ۱/۵ تا ۲ برابر نرخ متوسط رسوب‌گذاری مخازن جهان که توسط کمیسیون بین‌المللی سدهای بزرگ (ICOLD) اعلام شده است می‌باشد. بر این اساس عمر مفید مخزن سد نگارستان از ابتدای سال ۱۴۰۳ حدود ۵۳ سال برآورد شد و پیش‌بینی می‌شود این مخزن تا سال ۱۴۲۵ حدود نیمی از ظرفیت ذخیره‌سازی اولیه خود را از دست می‌دهد. بررسی‌ها و نتایج روش پیشنهادی نشان داد که سنجش‌ازدور می‌تواند ضمن صرف کم‌ترین هزینه و در زمان کم، نتایج قابل توجهی از مساحت گستره‌های آبی، حجم آب ذخیره‌شده در مخازن، نرخ رسوب‌گذاری و برآورد عمر مفید مخازن ارائه کند.

در کشور ایران سالانه بودجه قابل توجهی توسط سازمان‌های ذیربط برای تعیین حجم رسوب انباشته‌شده در مخازن سدها تخصیص داده می‌شود. بنابراین استفاده از علوم نوین برای افزایش دقت نتایج، کاهش هزینه‌ها و کاهش خطرات جانی در حین انجام عملیات اندازه‌گیری‌های میدانی ضروری است. یکی از مهمترین راهکارها در این زمینه استفاده از علم سنجش‌ازدور یا فناوری ماهواره‌ای است. پژوهشگران از روش‌های مختلفی برای به کارگیری مدل‌های سنجش‌ازدور استفاده کرده‌اند. در این پژوهش از روشی دقیق برای

محاسبه مساحت سطوح آب که خطاهای سنجنده در ارسال داده‌ها را کاهش می‌دهد استفاده شد و با محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن سد در زمان‌های مختلف، حجم رسوب‌گذاری در مخزن برآورد شد. از محدودیت‌های روش تخمین ظرفیت ذخیره مخزن با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، می‌توان به عدم وقوع ترازهای سطح آب کمینه و بیشینه که در زمان سیلاب‌ها و یا خشکسالی‌های متعدد اتفاق می‌افتند اشاره کرد. برای رفع این محدودیت‌ها، در پژوهش حاضر با استفاده از ترسیم منحنی هیپسومتریک ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن در ترازهای سطح آب حداکثر و حداقل با دقت بالایی محاسبه شد. با توجه به ارتباط دریاچه‌های طبیعی با حفاظت از اکوسیستم و تنوع زیستی، روش پیشنهادی می‌تواند در راستای بررسی نتایج مربوط به اعمال شیوه‌های کاهش فرسایش دریاچه‌های طبیعی نیز که به طور گسترده با افزایش قابل توجه نرخ رسوب‌گذاری مواجه هستند، استفاده شود.

به منظور صرفه‌جویی در هزینه‌ها و بهبود مدیریت منابع آبی، ضمن توصیه کاربرد روش ارائه‌شده در این تحقیق برای مخازن سدهای مهم کشور موارد تکمیلی زیر نیز پیشنهاد می‌شوند:

- بررسی کارایی تصاویر ماهواره‌ای در ارزیابی اثرات اقدامات اصلاحی (انجام عملیات آبخیزداری، احیاء پوشش گیاهی حوضه آبخیز و احداث سدهای رسوبگیر در بالادست سدهای مخزنی) که با هدف کاهش حجم رسوب ورودی به مخزن سد انجام شده است.
- مقایسه نتایج روش پیشنهادی با روش‌های مستقیم، به کمک داده‌های جریان و رسوب کافی از مخزن سد و حوضه آبخیز.
- در مواردی که به دلیل عدم امکان اندازه‌گیری‌های میدانی اطلاعات مربوط به هیدروگرافی، رسوب‌سنجی و هیدرومتری مخازن در دسترس نیستند می‌توان از روش پیشنهادی با صرف کمترین زمان و هزینه استفاده کرد.
- پیش‌بینی عمر مفید مخزن سدهای کشور به منظور ایجاد جایگزینی مناسب برای تامین ظرفیت ذخیره‌سازی آب مورد نیاز، زمانی که مخزن سد به دلیل رسوب‌گذاری‌های متعدد غیرقابل استفاده خواهد شد.

References

1. Arsen, A., Crétau, J. F., Berge-Nguyen, M., & Abarca del Rio, R. (2013). Remote sensing-derived bathymetry of Lake Poopó. *Remote Sensing*, 6(1), 407-420. <https://doi.org/10.3390/rs6010407>
2. Banasik, K., Hejduk, L., Krajewski, A., & Wasilewicz, M. (2021). The intensity of siltation of a small reservoir in Poland and its relationship to environmental changes. *Catena*, 204, 105436. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105436>
3. Chen, C.Y., McGee, D., Woods, A., Pérez, L., Hatfield, R.G., Edwards, R.L., & Rodbell, D.T. (2020). U-Th dating of lake sediments: Lessons from the 700 ka sediment record of Lake Junín, Peru. *Quaternary Science Reviews*, 244, 106422. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106422>
4. Crist, E.P. (1985). A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of*

- Environment*, 17(3), 301-306. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(85\)90102-6](https://doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6)
5. Droujko, J., Sudha, S.H., Singer, G., & Molnar, P. (2023). Sediment source and sink identification using Sentinel-2 and (kayak-based) lagrangian river turbidity profiles on the Vjosa River. *EGUsphere*, 1-24. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-156>
6. Duan, Z., & Bastiaanssen, W.G.M. (2013). Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment*, 134, 403-416. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010>
7. Feizabady, H., Ghorbani, K., & Zahiri, R. (2024). Monitoring time series of reservoir water surface area changes using remote sensing approaches. *Journal of Water and Soil Conservation*.
8. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S.R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2013.08.029>
9. Gao, B.C., & Goetz, A.F. (1994). Extraction of dry leaf spectral features from reflectance spectra of green vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 47(3), 369-374. [https://doi.org/doi:10.1016/0034-4257\(94\)90104-X](https://doi.org/doi:10.1016/0034-4257(94)90104-X)
10. Ghanbari, R., Tayfehrostami, A., Forouzanfar, M., & Tashakori, M. (2024). Using Optical Satellite Images and Satellite Altimetry Data to Estimate Volume Variations in Dams. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 189-196. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-189-2024>
11. Gonzalez Rodriguez, L., McCallum, A., Kent, D., Rathnayaka, C., & Fairweather, H. (2023). A review of sedimentation rates in freshwater reservoirs: recent changes and causative factors. *Aquatic Sciences*, 85(2), 60. <https://doi.org/10.1007/s00027-023-00960-0>
12. Gourgouletis, N., Bariamis, G., Anagnostou, M.N., & Baltas, E. (2022). Estimating reservoir storage variations by combining Sentinel-2 and 3 measurements in the Yliki Reservoir, Greece. *Remote Sensing*, 14(8), 1860. <https://doi.org/10.3390/rs14081860>
13. Haregeweyn, N., Melesse, B., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Meshesha, D., & Balana, B.B. (2012). Reservoir sedimentation and its mitigating strategies: a case study of Angereb reservoir (NW Ethiopia). *Journal of Soils and Sediments*, 12, 291-305. <https://doi.org/10.1007/s11368-011-0447-z>
14. Imanshoar, F., Hassanzadeh, Y., & Aalami, M.T. (2009). An introduction to environmental impacts of sedimentation and erosion due to dam's construction. In *Workshop on Reservoir Sedimentation Control, Regional Centre on Urban Flood Management, Karaj, Iran*.
15. Jain, S.K., Singh, P., & Seth, S.M. (2002). Assessment of sedimentation in Bhakra Reservoir in the western Himalayan region using remotely sensed data. *Hydrological Sciences Journal*, 47(2), 203-212. <https://doi.org/10.1080/02626660209492924>
16. Kondolf, M., & Yi, J. (2022). Dam renovation to prolong reservoir life and mitigate dam impacts. *Water*, 14(9), 1464. <https://doi.org/10.3390/w14091464>
17. Lemma, H., Nyssen, J., Poesen, J., Assaye, H., Adgo, E., & Frankl, A. (2024). Impact of reservoir construction on the sediment budget of a downstream-linked freshwater lake. *Hydrological Sciences Journal*, 1-11. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2337052>
18. Madadi, M.R. (2022). Reservoir sedimentation management: A state-of-the-art review. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 9(2), 194-202.
19. McFEETERS, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. <https://doi.org/10.3390/rs5073544>
20. Nyikadzino, B., & Gwate, O. (2021). Estimation of Reservoir Capacity and Sedimentation Rate Using Direct and Indirect Methods. *International Journal Earth Science Geophysics*, 7, 045. <https://doi.org/10.35840/2631-5033/1845>
21. Ren, S., Zhang, B., Wang, W.J., Yuan, Y., & Guo, C. (2021). Sedimentation and its response to management strategies of the Three Gorges Reservoir, Yangtze River, China. *Catena*, 199, 105096. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105096>
22. Schwatke, C., Dettmering, D., & Seitz, F. (2020). Volume variations of small inland water bodies from a combination of satellite altimetry and optical imagery. *Remote Sensing*, 12(10), 1606. <https://doi.org/10.3390/rs12101606>
23. Sedláček, J., Bábek, O., Grygar, T.M., Lendáková, Z., Pacina, J., Štojdl, J., & Elznicová, J. (2022). A closer look at sedimentation processes in two dam reservoirs. *Journal of Hydrology*, 605, 127397. <https://doi.org/10.3390/w14213481>
24. Sekertekin, A., Abdikan, S., & Marangoz, A.M. (2018). The acquisition of impervious surface area from LANDSAT 8 satellite sensor data using urban indices: a comparative analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 1-13. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-018-6767-3>
25. Strahler, A.N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of Americabulletin*, 63(11), 1117-1142. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1952GSAB...63.1117S/doi:10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1952GSAB...63.1117S/doi:10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)

26. Teixeira Pinto, C., Jing, X., & Leigh, L. (2020). Evaluation analysis of Landsat level-1 and level-2 data products using in situ measurements. *Remote Sensing*, 12(16), 2597. <https://doi.org/10.3390/rs12162597>
27. Tesfaye, A.T., Moges, M.A., Moges, M.M., Worqlul, A.W., Defersha, D.T., & Wassie, A.B. (2023). Reservoir sedimentation evaluation using remote sensing and GIS approaches for the reservoirs in the upper Blue Nile Basin. *Sustainable Water Resources Management*, 9(1), 23. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00792-0>
28. Vidya, A., Poompavai, V., & Hebbar, R. (2023). Geospatial techniques for assessment of loss in reservoir storage capacity a case study of tungabhadra reservoir. In *2023 IEEE India Geoscience and Remote Sensing Symposium (InGARSS)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.188>
29. Wagh, S., & Manekar, V. (2021). Assessment of reservoir sedimentation using satellite remote sensing technique (SRS). *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 102(3), 851-860. <https://doi.org/10.1007/s40030-021-00539-8>
30. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
31. Yao, F., Minear, J.T., Rajagopalan, B., Wang, C., Yang, K., & Livneh, B. (2023). Estimating reservoir emendation rates and storage capacity losses using high-resolution sentinel-2 satellite and water level data. *Geophysical Research Letters*, 50(16), e2023GL103524. <https://doi.org/10.1029/2023GL103524>
32. Yulianto, F., Kushardono, D., Budhiman, S., Nugroho, G., Chulafak, G.A., Dewi, E.K., & Pambudi, A.I. (2022). Evaluation of the threshold for an improved surface water extraction index using optical remote sensing data. *The Scientific World Journal*, 2022(1), 4894929. <https://doi.org/10.1155/2022/4894929>

The Effect of Deficit Irrigation and Regulated Deficit Irrigation on Yield and Water Productivity of the Watermelon

N. Bahremand¹ , H. Aroiee^{2*} , A. Aien³ 

1 and 2- Ph.D. Graduate and Associate Professor, Department of Horticultural Science and Landscape Architecture, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

3- Associate Professor, Research Department of Agricultural and Horticultural Sciences, Research and Education Center of Agriculture and Natural Resources in the South of Kerman Province, Jiroft, Iran

Received: 13-09-2024

Revised: 26-10-2024

Accepted: 10-11-2024

Available Online: 10-11-2024

How to cite this article:

Bahremand, N., Aroiee, H., & Aien, A. (2024). The effect of deficit irrigation and regulated deficit irrigation on yield and water productivity of the watermelon. *Journal of Water and Soil*, 38(5), 575-590. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89774.1436>

Introduction

Watermelon (*Citrullus lanatus*) is a widely recognized product with high demand, nutritional value, and export potential worldwide. Since the ultimate goal of agricultural production systems is to maximize plant yield, providing sufficient water to the plant is one of the most critical factors influencing yield. Therefore, investigating the effects of water limitation is an essential and undeniable necessity. On the other hand, deficit irrigation has been introduced as an approach to increase water productivity. Therefore, it is essential to consider the effects of this water-saving method on plant production, which highlights the need for further research. Deficit irrigation involves supplying only a portion of the plant's water requirements, while regulated deficit irrigation is a specific type of deficit irrigation that can be applied in various ways, such as irrigation based on growth stages, or allocating water to stages that are more sensitive to drought. It is important to recognize that plant response to water deficit depends on several factors, including climatic conditions, plant type, the intensity and method of deficit irrigation application, soil condition, and management practices.

Materials and Methods

In order to determine the effect of deficit irrigation and regulated deficit irrigation on yield and water productivity of the watermelon, an experiment in the form of randomized complete blocks with 8 treatments including three irrigation levels of 100, 70 and 50 % of the plant's water requirement (evapotranspiration estimated by the FAO-Penman-Monteith method) and 5 regulated deficit irrigation levels including 50% of the water requirement in the stages of seedling, vine, flowering, fruit expansion and fruit maturity were carried out with three replications under black plastic mulch, during 2020-2022, in the Research and Education Center of Agriculture and Natural Resources in the south of Kerman province. Irrigation as the main plot at three levels of 100, 70 and 50% of water requirement and mulching at three levels of crushed date palm leaf, black plastic and no mulch, as the sub-plot, were considered. Crimson B 34 watermelon seeds produced by Seminis company, were planted on January 2021, in plots with the size of 13.5 × 7 m, on furrows and ridges planting system (the width of furrows and ridges were 0.5 and 4 meters, respectively). After planting, bow-shaped wires were put on the planting rows and a transparent plastic was placed as a tunnel on them. In the first year, the total depth of the irrigations in aforesaid treatments were respectively 444, 321, 237, 413, 389, 435, 345 and 425, and in the second year 427, 303, 223, 395, 373, 416, 331 and 405 mm.

Results and Discussion



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89774.1436>

The results showed that the highest and lowest yield were observed in full irrigation and irrigation 50 % (60.1 and 16.3 t ha⁻¹ respectively). Among the regulated deficit irrigation treatments, irrigation 50% at the seedling stage was the closest to full irrigation, and the irrigation 50 % at the fruit expansion stage had the lowest yield. The highest water productivity belonged to the irrigation 50 % in the seedling and vine stages (15.9 and 1.15 kg m⁻³ respectively). Irrigation 50% at fruit maturity stage despite half irrigation, improved Qualitative characteristics such as soluble solids, vitamin C, dry matter, lycopene and fruit taste.

Conclusion

Applying deficit irrigation led to a significant decrease in watermelon yield compared to full irrigation (control). Water productivity remained nearly constant, and there was no significant improvement in the quality of the edible part. However, treatments involving regulated deficit irrigation, such as irrigation during the seedling stage, showed similar yield to full irrigation, while the 50% irrigation during the vine stage resulted in higher water productivity. Additionally, 50% irrigation during the fruit maturity stage produced superior fruit quality compared to the control. Overall, regulated deficit irrigation yielded better results than deficit irrigation due to less yield reduction, increased water productivity, and improved fruit quality, especially under water-restricted conditions. Finally, it is recommended that milder intensities of deficit irrigation that seem to have more favorable results in this plant should be investigated in the next studies.

Keywords: Growth stages, Lycopene, Vitamin C, Water requirement

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۳، ۵۹۰-۵۷۵

اثر کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه هندوانه

نادیا بهره مند^۱ - حسین آروئی^۲ - احمد آیین^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

چکیده

شناسایی استراتژی‌های آبیاری کارآمد و اثر آن‌ها بر عملکرد گیاه و بهره‌وری آب موضوع درخور توجهی می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش تعیین اثر کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر عملکرد و بهره‌وری آب در گیاه هندوانه بود که با آزمایشی به صورت بلوک‌های کامل تصادفی با ۸ تیمار شامل سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه (تبخیر و تعرق) و ۵ سطح آبیاری تنظیم شده شامل ۵۰ درصد نیاز آبی مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی، گلدهی، توسعه میوه و بلوغ میوه با سه تکرار، تحت خاکپوش پلاستیک سیاه، طی سال‌های ۱۴۰۱-۱۳۹۹ در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان انجام شد. سال نخست، عمق کل آب آبیاری در تیمارهای فوق‌الذکر به ترتیب ۴۴۴، ۳۲۱، ۲۳۷، ۴۱۳، ۳۸۹، ۴۳۵ و ۳۴۵ و ۴۲۵ و سال دوم ۴۲۷، ۳۰۳، ۲۲۳، ۳۹۵، ۳۷۳، ۴۱۶، ۳۳۱ و ۴۰۵ میلی‌متر بود. نتایج نشان داد بیشترین و کمترین عملکرد (به ترتیب ۶۰/۱ و ۱۶/۳ تن در هکتار) در تیمارهای آبیاری کامل و آبیاری ۵۰ درصد مشاهده شد، در بین تیمارهای کم آبیاری تنظیم شده، آبیاری ۵۰ درصد مرحله گیاهچه، نزدیک‌ترین تیمار به آبیاری کامل و آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه کمترین عملکرد را داشت. بیشترین مقادیر بهره‌وری آب، به آبیاری ۵۰ درصد مراحل ساقه‌دهی و گیاهچه (به ترتیب ۱۵/۹ و ۱۵/۱ کیلوگرم بر متر مکعب) تعلق داشت. آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه برخلاف آبیاری ۵۰ درصد، سبب بهبود ویژگی‌های کیفی نظیر مواد جامد محلول، ویتامین ث، ماده خشک، لیکوپن و مزه میوه شد. بطور کلی کم آبیاری تنظیم شده نسبت به کم آبیاری بدلیل کاهش عملکرد کمتر، افزایش بهره‌وری آب و کیفیت میوه در هندوانه نتایج مطلوب‌تری داشت که در مواجهه با محدودیت آب می‌تواند قابل توجه باشد.

واژه‌های کلیدی: لیکوپن، مراحل رشد، نیاز آبی، ویتامین ث

مقدمه

نظر گرفته شود که این مطلب ضرورت مطالعه را مضاعف کرده و بطور آشکارتری نمایان می‌سازد و البته باید بدانیم پاسخ گیاه به کم آبیاری به عوامل متعددی از جمله شرایط اقلیمی، نوع گیاه، شدت و نحوه اعمال کم آبیاری، وضعیت خاک و مدیریت وابسته است (Wang et al., 2023; Muhie, Akele, & Yeshiwas, 2024). کم آبیاری با تأمین بخشی از نیاز آبی گیاه در طول دوره رشد بجای آبیاری کامل اعمال می‌شود، در حالی که کم آبیاری تنظیم شده نوعی از کم آبیاری است که به چندین شیوه از جمله آبیاری بر پایه مراحل رشد یا به عبارتی تخصیص آب به مراحل حساس‌تر به خشکی قابل اجراست (Chai et al., 2016). کم آبیاری علاوه بر حفاظت آب که بخش

هندوانه (*Citrullus lanatus*) محصولی با تقاضا و ارزش غذایی بالا و قابلیت صادرات در سراسر جهان شناخته شده و با توجه به اینکه هدف نهایی سیستم‌های تولید کشاورزی، حصول به حداکثر عملکرد گیاه هست و حیاتی‌ترین عامل مؤثر بر عملکرد، تأمین آب مورد نیاز گیاه بوده، به تبع آن بررسی اثر محدودیت آب به صورت کم آبیاری در گیاه ضرورتی انکارناپذیر بنظر می‌رسد (Kanber, Sari, & Ozmen, 2015; Allakonon, Zakari, Tovihoudji, Fatondji, & Unlu, 2015; Akponikpe, 2022). از طرفی کم آبیاری به عنوان ابزاری برای افزایش بهره‌وری آب معرفی شده است (Xu et al., 2022)، پس لازم است اثرات این شیوه صرفه‌جویی در مصرف آب بر تولید گیاه نیز در

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته دکتری و دانشیار، گروه علوم باغبانی و مهندسی فضای سبز، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(Email: Arooie@um.ac.ir) * نویسنده مسئول:

۳- دانشیار، گروه تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان، جیرفت، ایران

مهمی از کشاورزی پایدار است (Du, Kang, Zhang, & Davies, 2015; Hou, Yang, Han, Cai, & Li, 2019). می‌تواند بر کل چرخه رشد گیاه تأثیر بگذارد و جنبه‌های مختلف مانند عملکرد میوه، کیفیت درونی، اندازه میوه و زمان برداشت آن را نیز تحت تأثیر قرار دهد (Gao et al., 2014). کم‌آبیاری به‌موقع و مناسب هندوانه نه تنها می‌تواند کیفیت هندوانه را بهبود بخشد و عملکرد را حفظ یا حتی افزایش دهد، بلکه باعث افزایش راندمان مصرف آب نیز می‌شود (Wang, Wang, & Zhang, 2020). اگرچه کم‌آبیاری اجباری ممکن است تهدید جدی برای منابع خاک بوده و لازم است تمهیدات لازم برای کنترل شوری و تخریب منابع خاک در آینده نیز اندیشیده شود (Jafari & Abbasi, 2022). عبدالخالیک و همکاران اثر سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه هندوانه، تحت خاکپوش پلاستیک را در منطقه والنسیا" اسپانیا ارزیابی و بدین نتیجه دست یافتند که آبیاری ۵۰ درصد سبب کاهش شدید رشد، عملکرد، کیفیت میوه و بهره‌وری آب گیاه شد، لیکن بهره‌وری آب با آبیاری ۷۵ درصد قابل قبول بود (Abdelkhalik et al., 2019). مطالعات اوزمن و همکاران در منطقه چکورو" ترکیه، عدم تأثیر آبیاری با سطوح ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی بر عملکرد و کیفیت میوه هندوانه را گزارش کرده است (Ozmen, Kanber, Sari, & Unlu, 2015). بررسی پاسخ ارقام دیپلوئید و تری‌پلوئید هندوانه با کم‌آبیاری توسط یلنگ و هی (Yang & He, 2022) نشان داد، محتوای آب نسبی برگ به‌طور قابل توجهی کاهش و منجر به کاهش عملکرد گیاه و افزایش محتوای قند میوه شد. سیلوا و همکاران (Silva et al., 2023) افزایش محتوای پرولین برگ با آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه هندوانه را گزارش کردند. ونگ و همکاران (Wang et al., 2023) در منطقه کشاورزی واحه در شمال غرب چین در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در گیاه هندوانه به ارزیابی اثر دو سطح کم‌آبیاری تنظیم شده ملایم (۷۰ - ۶۰ درصد) و متوسط (۶۰ - ۵۰ درصد) بر پایه ظرفیت زراعی خاک در مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی، توسعه میوه و بلوغ میوه بجز مراحل گلدهی و آغاز میوه‌دهی بر رشد، عملکرد، بهره‌وری آب و صفات کیفی نظیر مواد جامد محلول، قندهای محلول، ویتامین ث میوه پرداختند. میسلی و همکاران (Miceli, Vetrano, Torta, Esposito, & Moncada, 2023) در بررسی اثر آبیاری ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه خربزه رقم هیبرید هلیوس به این نتیجه دست یافتند که کم‌آبیاری متوسط و شدید به‌طور قابل توجهی محتوای آب نسبی برگ، عملکرد، و سفتی میوه را کاهش داد، ولیکن راندمان آبیاری و محتوای ویتامین ث میوه به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. اثرات کم‌آبیاری تنظیم‌شده بر رشد، فیزیولوژی و بیوشیمی گیاه خربزه تحت رژیم‌های آبی ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای در شرایط گلخانه‌ای نیمه کنترل شده توسط مدیچ و همکاران بررسی شد (Meddich et al., 2022). آکسو و

همکاران (Xu et al., 2023) در بررسی کم‌آبیاری در گیاه گوجه فرنگی به این نتیجه رسیدند که کم‌آبیاری ملایم (۴۱۸۵ متر مکعب در هکتار) در مقایسه با آبیاری کامل (۴۵۰۰ متر مکعب در هکتار)، تحت خاکپوش پلاستیک و آبیاری قطره‌ای، سبب بهبود عملکرد فتوسنتزی، افزایش تجمع ماده خشک و بهبود شرایط رطوبتی خاک و در نتیجه افزایش رشد و نمو و در نهایت عملکرد گیاه و بهره‌وری آب شد و کم‌آبیاری ملایم در مراحل گیاهچه، گلدهی و بلوغ میوه و آبیاری مجدد در مرحله بزرگ شدن میوه نتیجه مطلوب‌تری در مقایسه با آبیاری کامل داشت (Xu et al., 2023). مطالعات ژنگ و همکاران و شوهات و همکاران (Zhang, Xiong, Huang, Xu, & Huang, 2021; Shohat, Eliaz, & Weiss, 2017) بیانگر این مطلب بود که کم‌آبیاری در گیاه گوجه‌فرنگی افزایش گلدهی، بهبود رنگ میوه و افزایش محتوای جامد محلول میوه بالغ شد لذا با توجه به اهمیت شناسایی استراتژی‌های آبیاری کارآمد نظیر کم‌آبیاری و اثر آن‌ها بر تولید محصولات کشاورزی و بهره‌وری آب، ناکافی بودن اطلاعات مختص اقلیم در پاسخ گیاه به رویکرد کم‌آبیاری و آگاهی از این امر که با وجود پیشرفت‌های علمی، هنوز مدیریت نادرست و بکارگیری روش‌های منسوخ آبیاری گیاه هندوانه در بسیاری از مناطق کشور، منجر به کاهش عملکرد و کیفیت محصول در سطح وسیع می‌شود که پیامدهای جدی برای منافع اقتصادی و اجتماعی داشته، علاوه بر این در ایران نیز مانند سایر کشورها از نظر مصرف آب بخش‌های مختلف، بخش قابل توجهی در کشاورزی استفاده می‌شود (Abbasi et al., 2024)، از اینرو هر گونه اقدامات اصلاحی در مدیریت آبیاری نقش مهمی در پایداری کشاورزی و دسترسی به آب خواهد داشت (Abbasi & Abbasi, 2024). لذا این تحقیق با هدف تعیین اثر کم‌آبیاری و کم‌آبیاری تنظیم شده بر عملکرد، بهره‌وری آب و کیفیت میوه گیاه هندوانه در جنوب استان کرمان طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ صورت گرفته است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی محل و تیمارهای آزمایش: این مطالعه در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی جنوب استان کرمان واقع در منطقه علی‌آباد شهرستان جیرفت (عرض شمالی ۳۶°/۲۸، طول شرقی ۴۸°/۵۷ و ارتفاع ۶۲۴ متر از سطح دریا)، در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۳۹۹ انجام شد. بر اساس میانگین ۳۰ ساله متغیرهای هواشناسی (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۴۷ درصد، بارندگی سالانه کمتر از ۱۶۰ میلی‌متر، دوره یخبندان ۱۵-۴ روزه، مدت تابش ۳۱۷۶/۳ ساعت و تبخیر تجمعی بیش از ۲۰۰۰ میلی‌متر) اقلیمی گرم و نیمه خشک است. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۸ تیمار و سه تکرار در دو فصل زراعی طی سال‌های ۱۴۰۱

داشت. برای اعمال کم آبیاری تنظیم شده، نیاز آبی هر مرحله رشد بسته به ۵ تیمار اعمال شده (فوق‌الذکر) با شیوه شرح داده شده برای محاسبه نیاز آبی گیاه تعیین و ۵۰ درصد آن در مرحله رشد مد نظر در اختیار گیاه قرار گرفت. برای اطمینان از تحویل آب محاسبه شده، کنتور نصب شد. برای تعیین زمان آبیاری در فاصله دو آبیاری در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی پس از آبیاری، در فواصل زمانی مشخص، از عمق مؤثر ریشه نمونه برداری و درصد رطوبت تعیین گردید. زمانی که تفاوت رطوبت با رطوبت آستانه‌ای که با رابطه (۴) به دست آمد در دامنه نوسان ۵٪ آستانه‌ای شد، آبیاری صورت گرفت.

$$\theta_{MAD} = \theta_{FC} - (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) \times MAD \quad (4)$$

θ_{MAD} رطوبت آستانه‌ای، θ_{FC} و θ_{PWP} به ترتیب رطوبت حجمی نقاط گنجایش مزرعه‌ای و پژمردگی دائم (متر مکعب بر میلی‌متر) و MAD بیشینه تخلیه مجاز رطوبت بود. بهره‌وری آب (Wp) با رابطه (۵) از تقسیم عملکرد گیاه بر مجموع آب مصرف شده (آبیاری و بارندگی مؤثر) محاسبه شد.

$$WP = \frac{Y}{I + Pe} \quad (5)$$

Y عملکرد گیاه بر حسب کیلوگرم در هکتار، $I + Pe$ آب مصرف شده (I عمق آبیاری و Pe بارندگی مؤثر) بر حسب متر مکعب بود. بارندگی مؤثر مکان با نرم‌افزار CropWat و روش USDA S.C. مشخص شد (Ayele, Asseffa, & Tuhar, 2023). قبل از کشت از نقاط مختلف مزرعه تا عمق ۳۰ سانتی‌متر توسط مته، نمونه‌برداری و پس از مخلوط کردن، نمونه مرکب یک کیلوگرمی برای تعیین برخی خصوصیات خاک انتخاب گردید (جدول ۱).

کشت گیاه و اعمال تیمارهای آزمایش: قبل از کاشت، خاکپوش پلاستیک سیاه (ضخامت ۱۰۰ میکرون) روی ردیف‌ها کشیده شد. دویاری با قطر ۴ و فاصله ۵۰ سانتی‌متر از هم (محل کاشت بذر) روی آن ایجاد و کناره‌های آن زیر خاک قرار گرفت. در تاریخ یک دیماه هر دو سال کشت بذر هندوانه رقم کریمسون B34 تولید شرکت سمینیس، در دو طرف جوی‌های کم عمق (۸۸۸ بوته در هکتار)، انجام شد. پس از کاشت بذر، برای ایجاد تونل به منظور طولانی‌تر کردن فصل رشد منطقه روی ردیف‌های کاشت، مفتول‌هایی به شکل کمان با فاصله ۱/۵ متر از هم مستقر شده و روی آنها پلاستیک شفاف (عرض ۲ متر) کشیده شد و اطراف پلاستیک زیر خاک قرار داده شد. تهویه تونل‌ها حتی در هوای سرد در ساعات آفتابی اجتناب‌ناپذیر بود. برای جلوگیری از وارد شدن شوک دمایی به گیاه، کنار زدن پلاستیک شفاف بصورت تدریجی انجام شد. برای کنترل مگس جالیز و سرخرطومی، دو مرتبه سمپاشی با سم دیمترویل قبل از ظهور گل و میوه انجام شد. لیوان‌های یکبار مصرف حاوی گوگرد پودری در کنار خطوط کاشت بعنوان دافع آفات نیز قرار داده شد.

۱۳۹۹ – انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سه سطح آبیاری ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی (تبخیر و تعرق) در دوره رشد گیاه و ۵ سطح آبیاری تنظیم شده شامل ۵۰ درصد نیاز آبی مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی، گلدهی، توسعه میوه (بزرگ شدن) و بلوغ میوه بود.

سامانه آبیاری و اعمال تیمارها: آبیاری قطره‌ای شامل لوله اصلی با قطر ۶۳ میلی‌متر که برای ثبات دما و کاهش آثار مخرب آفتاب زیر خاک قرار داده شد. لوله‌های فرعی با قطر ۱۶ میلی‌متر، به تعداد خطوط کاشت و مجهز به شیر کنترل دبی آب و به هر لوله نوار تیپ با فاصله قطره‌چکان ۱۵ سانتی‌متر و خروجی ۲ لیتر در ساعت متصل شد. برای جلوگیری از ورود هرزآب به مکان اجرای آزمایش، کنالی به عمق ۳۰ سانتی‌متر دور تا دور آن حفر گردید. عمق آب آبیاری تا پیش از استقرار گیاه (ظهور برگ سوم حقیقی) برای همه تیمارها یکسان و از رابطه (۱) محاسبه شد:

$$ID_i = (\theta_{FC} - \theta_i) \times Dr \quad (1)$$

که در این رابطه، ID_i : عمق آب آبیاری (Dr ، (mm) عمق مؤثر ریشه (θ_{FC} ، (mm) و θ_i : به ترتیب رطوبت حجمی خاک در گنجایش مزرعه‌ای و پیش از آبیاری ($m^3 m^{-3}$) است. مقادیر رطوبت گنجایش مزرعه‌ای و پژمردگی دائم با دستگاه صفحات فشاری (جدول ۱) و رطوبت خاک پیش آبیاری با روش وزنی اندازه‌گیری شد. از زمان اعمال کم آبیاری، عمق آب مورد نیاز گیاه در تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی (شاهد) با رابطه (۲) با محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به کمک داده‌های بلندمدت هواشناسی (ده سال) و نرم‌افزار ET_0 cal بر اساس روش فائو – پنمن – مانیتث (Jefferies & Mackerron, 1993) و سپس استخراج ضرایب گیاهی هندوانه از نشریه ۵۶ فائو برای مراحل ابتدایی، میانی و پایانی دوره رشد گیاه (۰/۴، ۱ و ۰/۷۵)، تعیین شد (Allen, 1998).

$$ID_{100} = ET_c = ET_0 \times K_c \quad (2)$$

در این رابطه، (ET_0) تبخیر و تعرق مرجع روزانه بر حسب میلی‌متر در روز، K_c ضریب گیاهی و ET_c تبخیر و تعرق گیاه بر حسب میلی‌متر است. حجم آب آبیاری از رابطه (۳) با احتساب مساحت کرت، عمق و بازده آبیاری مشخص شد.

$$V = \frac{(ID \times A)}{Ea} \quad (3)$$

V حجم آب آبیاری (متر مکعب)، ID عمق آب آبیاری (متر)، A مساحت کرت (متر مربع) و Ea بازده آبیاری که ۹۰ درصد در نظر گرفته شد.

عمق کل آب در تیمارهای آزمایش در سال اول ۴۴۴، ۳۲۱، ۲۳۷، ۴۱۳، ۳۸۹، ۳۳۵، ۳۴۵ و ۴۲۵ و در سال دوم ۴۲۷، ۳۰۳، ۲۲۳، ۳۹۵، ۳۷۳، ۴۱۶، ۳۳۱ و ۴۰۵ میلی‌متر بود که به ترتیب به سطوح آبیاری ۱۰۰، ۷۰ و ۵۰ درصد نیاز آبی دوره رشد گیاه و ۵۰ درصد نیاز آبی مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی، گلدهی، توسعه میوه و بلوغ میوه تعلق

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مکان انجام آزمایش
Table 1- Some soil physical and chemical properties of the experiment location

عمق (سانتی‌متر)	0 – 30
Depth (cm)	
واکنش	7.60
pH (-)	
رسانایی الکتریکی عصاره اشباع (دسی‌زیمنس بر متر)	1.20
Electrical conductivity (dS/m)	
نسبت جذب سدیم	2.90
Sodium absorption ratio (-)	
منیزیم و کلسیم (میلی‌اکی والان در لیتر)	4.00
Magnesium and Calcium (meq / L)	
کربن آلی (درصد)	0.39
Organic carbon (%)	
بافت	Loam
Texture (-)	
رس (درصد)	22.0
Clay (%)	
سیلت (درصد)	33.0
Silt (%)	
شن (درصد)	42.0
Sand (%)	
نیترژن (درصد)	0.031
Nitrogen (%)	
فسفر (میلی‌گرم در کیلوگرم)	9.40
Phosphorus (mg/kg)	
پتاسیم (میلی‌گرم در کیلوگرم)	320
Potassium (mg/kg)	
ظرفیت مزرعه‌ای	27.3
Field Capacity (%V)	
(%V) نقطه پژمردگی دائم	11.6
Permanent wilting point	
جرم مخصوص (درصد)	1.30
Bulk density (g/cm3)	

خاک و تغییر رنگ پیچک مجاور میوه از سبز به قهوه‌ای بود. اندازه‌گیری صفات و تجزیه و تحلیل آماری: صفات ارزیابی شده، شامل عملکرد و اجزا آن، بهره‌وری آب، نسبی برگ (Smart & Bingham, 1974)، پرولین (Carillo & Gibon, 2011)، فنول (Slinkard & Singleton, 1977)، آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز (Giannopolitis & Ries, 1977) و صفات تعیین کیفیت میوه شامل مواد جامد محلول (TSS)، pH عصاره و اسید قابل تیتر (TA)، مزه (نسبت مواد جامد محلول به اسید قابل تیتر)، ویتامین ث (Arya, Mahajan, & Jain, 2000)، درصد ماده خشک میوه، لیکوپن (Fish, Perkins-Veazie, & Collins, 2002)، طول و عرض میوه و شاخص شکل (نسبت طول به قطر میوه) بود. محاسبه عملکرد با

محلولپاشی حشره‌کش مالاتیون، آدامکتین و کنفیدر با غلظت‌های درج شده روی برچسب سموم در فواصل دو هفته‌ای و تزریق کنفیدر در سیستم آبیاری انجام شد. از قارچکش استفاده نگردید. تغذیه گیاه با کود مرغی بمیزان ده تن در هکتار از طریق خاک و کودهای ویتا فول، اکوفول و کود آهن لایفر، هفتگی با سیستم آبیاری انجام شد. مرحله گیاهچه از استقرار گیاه تا شروع ساقه‌دهی، مرحله ساقه‌دهی از شروع ساقه‌دهی تا تشکیل گل (تشکیل اولین گل نر در ۸۰ درصد بوته‌ها)، مرحله گلدهی از شروع گلدهی تا ریزش گلبرگ‌ها، مرحله توسعه میوه از ریزش گلبرگ‌ها تا اندازه نهایی و مرحله بلوغ میوه از اندازه نهایی تا برداشت در نظر گرفته شد. شاخص بلوغ میوه سخت شدن پوسته بذر و شاخص برداشت تغییر رنگ پوست میوه از سفید به کرم در تماس با

مقایسه با آبیاری کامل (شاهد) افزایش نشان داد، عملکرد سایر تیمارها به درجات مختلفی کاهش یافت که در میان آنها تفاوت اثر کم آبیاری ملایم مراحل ساقه‌دهی و بلوغ میوه بر عملکرد گیاه معنی‌دار نبود، در حالی که کم آبیاری مرحله توسعه میوه بطور قابل توجهی با آبیاری کامل متفاوت بود (Wang et al., 2023). شاید در مراحل اولیه، که گیاه کوچک و درجه حرارت پایین‌تر است،

شدت تقاضا آب نیز کم است و گیاه با سرعت کمتری تحت تأثیر کم آبیاری قرار می‌گیرد و این با یافته‌های قبلی سازگار بود که در آزمایشات خود در مورد کم آبیاری هندوانه در گلخانه، در توجیه اثرات کم آبیاری اعلام کردند که اعمال کم آبیاری مرحله گیاهچه، رشد ریشه را تا حدی تحریک، حرکت مواد مغذی را مهار می‌کند و سبب تسهیل رشد بیشتر گیاه بعد از آبیاری مجدد می‌شود، اما کم آبیاری مرحله توسعه میوه باعث کاهش عملکرد می‌شود (Yang et al., 2017). مطالعات مرتبط نشان داده‌اند که گیاهان زراعی با درجه خاصی از تنش آبی سازگار هستند بطوری که کم آبیاری همیشه عملکرد را کاهش نمی‌دهد، و در مراحل اولیه رشد گیاه حتی ممکن است برای افزایش عملکرد مفید باشد (Turner, Khanthavong et al., 2021) در حالی که در تضاد با مورد اخیر در مطالعه دیگری به این نتیجه رسیدند که عملکرد کم آبیاری ملایم مرحله تشکیل و توسعه میوه (بزرگ شدن میوه) به‌طور قابل توجهی بالاتر از آبیاری کامل بود که ممکن است به تنوع محصول، شرایط آب و هوایی، و شیوه‌های مدیریتی مرتبط باشد (Wang, Kang, & Wang, 2007). تفاوت در شدت تنش‌های بکار رفته در این آزمایشات شاید یکی از دلایل اصلی تفاوت در گزارشات باشد، همانطور که مطالعات متعددی گزارش داده‌اند که محصولات کشاورزی نسبت به کمبود آب متوسط انعطاف‌پذیر هستند و رفتار فیزیولوژیکی محافظتی بالایی از خود نشان می‌دهند (Mukherjee, Dash, Das, & Das, 2023). همچنین مطالعه استراتژی‌های مدیریت آبیاری در دو فصل رشد در منطقه والنسیا اسپانیا با اعمال ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبیاری گیاه و ۶ سطح کم آبیاری تنظیم شده که از این تعداد سه تیمار کم آبیاری تنظیم شده با آبیاری ۷۵ درصد مرحله گیاهچه تا گلدهی (استقرار گیاه تا پایان گلدهی یک مرحله در نظر گرفته شده است)، تشکیل و توسعه میوه و بلوغ میوه و سه تیمار دیگر با آبیاری ۵۰ درصد در همین مراحل بود نشان داد که قرار گرفتن گیاه هندوانه در معرض کمبود نسبتاً شدید آبیاری (۵۰ درصد نیاز آبی) در دوره رشد گیاه منجر به کاهش شدید عملکرد بدون بهبود در کیفیت میوه شده که با نتایج این تحقیق کاملاً همخوانی دارد،

رعایت اثر حاشیه‌ای از ناحیه وسط خطوط کاشت از مساحت ۹ مترمربع از هر تیمار و تکرار در نظر شد. دستگاه‌های مورد استفاده شامل اسپکتروفتومتر^۱، رفرکتومتر^۲ و pH متر^۳ و کلروفیل سنج بود. تجزیه و تحلیل آماری با برنامه‌های ماکرو و مینی‌تب نسخه ۱۹ و مقایسات میانگین با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال بر محتوای آب نسبی برگ در سطح ۵ درصد و اثر آبیاری بر کلیه صفات ذکر شده در جدول ذیل در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲).

عملکرد و اجزاء آن: بر اساس میانگین دو فصل عملکرد و اجزاء آن (متوسط وزن میوه و تعداد میوه در بوته) بیشترین مقادیر را در آبیاری کامل گیاه داشتند (جدول ۳)، بیشترین و کمترین عملکرد (به ترتیب ۶۰/۱ و ۱۶/۳ تن در هکتار) در آبیاری کامل و آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد گیاه مشاهده شد، در بین تیمارهای کم آبیاری تنظیم شده، آبیاری ۵۰ درصد مرحله گیاهچه با آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری نداشت (۵۶ تن در هکتار)، کمترین تعداد میوه در بوته با آبیاری ۵۰ درصد مرحله گلدهی و آبیاری ۵۰ درصد گیاه (به ترتیب ۱/۰۵ و ۱ عدد) مشاهده شد و بیشترین متوسط وزن میوه (۴/۸۰ کیلوگرم) نیز در آبیاری کامل بدون تفاوت معنی‌دار با آبیاری ۵۰ درصد مراحل گلدهی، گیاهچه و ساقه‌دهی مشاهده شد. در مقایسه کلی بین تیمارهای کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده مورد بررسی در این آزمایش، کمترین میزان عملکرد (۱۶/۳ تن در هکتار) به آبیاری ۵۰ درصد تعلق داشت که نسبت به آبیاری کامل (۶۰/۱ تن در هکتار) تقریباً ۷۳ درصد کاهش نشان داد، در حالی که کلیه تیمارهای کم آبیاری تنظیم شده حتی آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه که در بین تیمارهای کم آبیاری تنظیم شده عملکرد کمتری داشت نسبت به آبیاری ۵۰ درصد بالاتری قرار گرفت و این نشان از برتری کم آبیاری تنظیم شده دارد، با وجود یکسری تفاوت‌ها در شیوه اعمال کم آبیاری و سایر شرایط انجام آزمایشات در مناطق مختلف، مطالعات قبلی نیز نتایجی را اعلام نموده که با نتایج این تحقیق همخوانی و یا تضاد دارد؛ از جمله در مطالعه انجام شده در منطقه کشاورزی واحه در شمال غرب چین در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در گیاه هندولنه دو سطح کم آبیاری ملایم (۶۰ - ۷۰ درصد) و متوسط (۶۰ - ۵۰ درصد) بر پایه ظرفیت زراعی خاک در طول مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی، توسعه میوه و بلوغ میوه (بجز مراحل گلدهی و آغاز میوه‌دهی) با آبیاری کامل مقایسه شدند و نتایج نشان داد کم آبیاری ملایم در مرحله گیاهچه در

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر سال، کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر عملکرد، اجزاء عملکرد، بهره‌وری آب، محتوای آب نسبی و پایداری غشا
Table 2- Analysis of variance of year, deficit irrigation and regulated deficit irrigation effect on yield, fruit mean weight, fruit number, water productivity, relative water content and membrane stability

میانگین مربعات Mean squares							
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	عملکرد Yield	متوسط وزن میوه Fruit mean weigh	تعداد میوه Fruit number	بهره‌وری آب Water productivity	محتوای آب نسبی برگ Relative water content	پایداری غشا Membrane stability
سال Year	1	2.90	0.80	0.02	0.05	453 **	7.67
خطا (تکرار × سال) Error	4	35.2	0.72	0.06	10.5	10.7	3.03
آبیاری Irrigation	7	1139**	7.42**	0.22 **	41.4 **	159 **	92.7**
سال × آبیاری Y × I	7	0.46	0.01	0.01	0.09	1.70	5.10
خطا Error	28	28.8	0.37	0.01	0.96	2.18	2.75
ضریب تغییرات CV	-	12.03	16.8	10.2	7.40	2.00	2.20

** معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

** significancy at 1 percent probability level

جدول ۳- مقایسه میانگین دو فصل اثر کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر عملکرد، اجزاء عملکرد، بهره‌وری آب، محتوای آب نسبی و پایداری غشا
Table 3- Mean comparisons of deficit irrigation and regulated deficit irrigation effect on yield, fruit mean weight, , leaf, fruit number, water productivity, relative water content and membrane stability

تیمار Treatment	عملکرد (t ha ⁻¹) Yield	متوسط وزن میوه Fruit mean (kg) weigh	تعداد میوه Fruit number (No)	بهره‌وری آب Water productivity (kg m ⁻³)	محتوای آب نسبی Relative (%)water content	پایداری غشا Membrane stability (%)
آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) Full irrigation (100% water requirement)	60.1a	4.80 a	1.50 a	15.01 ab	79.4 a	80.7a
۷۰ درصد نیاز آبی 70% water requirement	42.0 cd	4.00b	1.30 b	15.1 ab	72.5 b	72.8cd
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	16.3 e	1.86 c	1.00 c	8.10 d	64.5 d	70.6 d
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گیاهچه 50 water requirement of the seedling stage	56.2 ab	4.50 ab	1.35 ab	15.1 ab	76.5 ab	80.0a
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله ساقه‌دهی 50% of the water requirement of the stemming stage	53.8 b	4.48 ab	1.30 b	15.9 a	76.3 ab	75.7 bc
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گلدهی و میوه‌دهی 50% water requirement of flowering	49 bc	4.75 a	1.05 c	11.7bc	73.3 b	75.5bc
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله توسعه میوه 50 % water requirement of fruit development stage	34.6 d	2.01 c	1.10 bc	10.4 cd	67.5c	72.9cd
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله بلوغ میوه 50 % water requirement of fruit maturity stage	49.3 bc	3.75b	1.50 a	12.1 b	74.5b	75.5bc

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, means with at least one common letter are not significantly different at 5% probability level based on Duncan multiple range test.

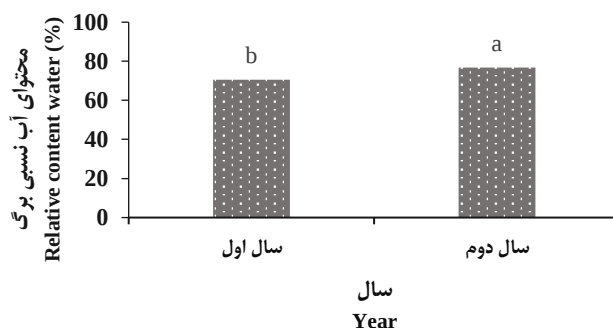
بیشترین میزان را در بین تیمارها داشت ولی با آبیاری کامل نیز از لحاظ آماری متفاوت بود (Abdelkhalik et al., 2019). شاید علت

ولی این کاهش در کم آبیاری مرحله بلوغ میوه با شدت متوسط (۷۵ درصد نیاز آبی) به مراتب کمتر بود که بعد از آبیاری کامل

مهم یکی میزان صرفه‌جویی در مصرف آب و دیگری میزان کاهش عملکرد در ازای صرفه‌جویی صورت می‌گیرد که معمولاً تیمارهای برتر کاهش عملکرد کمتری با صرفه‌جویی آب دارند (Comas, Trout, DeJonge, Zhang, & Gleason, 2019). سال نخست، عمق کل آب در تیمارهای فوق‌الذکر به ترتیب ۴۴۴، ۳۲۱، ۲۳۷، ۴۱۳، ۳۸۹، ۴۳۵، ۳۴۵ و ۴۲۵ و در سال دوم ۴۲۷، ۳۰۳، ۲۲۳، ۳۹۵، ۳۷۳، ۴۱۶ و ۳۳۱ میلی‌متر بود. در گزارشات دیگر نتایج مشابه با نتایج مطالعه حاضر اعلام شده که تیمارهای کم آبیاری با سطوح مختلف تأثیر قابل توجهی بر بهره‌وری آب هندوانه داشتند، اعمال کم آبیاری ملایم و متوسط مراحل گیاهچه و ساقه‌دهی بطور قابل توجهی بهره‌وری آب هندوانه را در مقایسه با آبیاری کامل افزایش داد، در حالیکه تیمارهای تنش ملایم و متوسط مرحله بلوغ میوه و تنش ملایم مرحله توسعه میوه بدون تفاوت معنی‌دار با یکدیگر کارایی مصرف آب کمتری داشتند ولی کم آبیاری متوسط مرحله توسعه میوه کاهش قابل توجهی در مقایسه با آبیاری کامل نشان داد (Wang et al., 2023). این نتایج عمدتاً به تفاوت مراحل رشد و نمو هندوانه از جمله تقاضای آب متفاوت آنها مربوط می‌شود، مثلاً گیاه در مرحله ساقه‌دهی فرصت بیشتری برای جبران اثر تنش بعد از آبیاری مجدد داشته و در مرحله بلوغ میوه عمدتاً تبدیل قندها و تجمع سایر مواد مغذی صورت می‌گیرد که هر دو مرحله نیاز آبی نسبتاً کمتری در مقایسه با مرحله حساس بزرگ شدن میوه داشته و در نتیجه کم آبیاری تأثیر نسبتاً کمتری بر عملکرد داشته در حالی که در مرحله توسعه میوه بیشترین تغییرات روی میوه اعمال می‌شود، که توسط بزرگ شدن سلول و فراهمی آب امکان‌پذیر است و نیاز به آب به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد، در حالی که تنش آبی منجر به کاهش اندازه سلول و استرس شدید منجر به سخت شدن دیواره سلولی می‌شود (Emam, Shekoofa, Salehi, & Jalali, 2010). طول متفاوت مراحل رشد، میزان حساسیت آن‌ها به تنش‌های بکاررفته و نیاز آبی هر مرحله از دوره رشد گیاه، سبب اثرات متفاوت بر بهره‌وری آب گیاه می‌شود (Kuscu et al., 2015).

اصلی تفاوت بین گزارشات این مطالعه و تحقیق حاضر و سایر مطالعات این باشد که در این مطالعه، سه مرحله مهم رشد گیاه هندوانه یعنی مراحل گیاهچه، ساقه‌دهی و گلدهی بطور مجزا بررسی نشده و بعنوان یک مرحله واحد در نظر گرفته شده است و سبب شده ویژگی هر مرحله در پاسخ به محدودیت آب بطور واضح نمایان نشود. در مقایسه بین کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده، چون کم آبیاری تنظیم شده امکان اعمال تنش در مراحل رشد با حساسیت کمتر را فراهم می‌کند در نتیجه کاهش عملکرد کمتری را در گیاه پیش‌بینی می‌کند (Abdelkhalik et al., 2020).

بهره‌وری آب: بر اساس مقایسات میانگین دو فصل (جدول ۳)، بهره‌وری آب آبیاری ۵۰ درصد مرحله ساقه‌دهی و گیاهچه به ترتیب ۱۵/۹ و ۱۵/۱ کیلوگرم بر متر مکعب بود و با آبیاری کامل و آبیاری ۷۰ درصد دوره رشد تفاوت معنی‌داری نداشتند که در آبیاری ۵۰ درصد مرحله ساقه‌دهی به حداکثر میزان خود رسید و نسبت به آبیاری کامل ۶ درصد افزایش داشت کمترین میزان بهره‌وری آب (۸/۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب) در بین تیمارهای کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده در آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد گیاه مشاهده شد، اینکه از لحاظ بهره‌وری آب تیمارهای آبیاری ۵۰ درصد مرحله ساقه‌دهی و گیاهچه از آبیاری کامل در سطح بالاتری قرار گرفتند نتیجه‌ای امیدوارکننده است اگرچه به لحاظ آماری این تفاوت معنی‌دار نیست البته پایین بودن مقدار این افزایش (۶ درصد) می‌تواند به علت سطح تنش بکار رفته باشد که سطح نسبتاً شدیدی بوده است (۵۰ درصد نیاز آبی مراحل رشد) و در توجیه این مطلب می‌توان گفت چون در دو تیمار ذکر شده کاهش عملکرد کمتری در مقایسه با آبیاری کامل رخ داده و در عین حال صرفه‌جویی در مصرف آب هم در مقایسه با آبیاری کامل وجود داشته، بهره‌وری آب به مرئب افزایش یافته و در آبیاری ۵۰ درصد مرحله ساقه‌دهی به حداکثر میزان رسید و با آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد کمترین مقدار بهره‌وری (۸/۱۰ کیلوگرم بر متر مکعب) را داشته ولی آبیاری ۷۰ درصد در وضعیتی مشابه با آبیاری کامل قرار گرفته است. عموماً ارزیابی اثر کم آبیاری بر بهره‌وری آب گیاه با دو مؤلفه بسیار



شکل ۱- مقایسه میانگین دو فصل اثر سال بر محتوای آب نسبی برگ گیاه هندوانه

Figure 1- Mean comparison of year effect on the relative water content of the watermelon in two seasons

محتوای آب نسبی برگ: سال دوم محتوای آب نسبی برگ (۷۶/۷) نسبت به سال نخست (۷۰/۵) میانگین بیشتری داشت (شکل ۱). آبیاری کامل بیشترین مقدار (۷۹/۴ درصد) محتوای آب نسبی را داشت که با آبیاری ۵۰ درصد مرحله گیاهچه تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۳). کاهش دسترسی به آب یا کاهش پتانسیل آب خاک و در نتیجه عدم تعادل بین جذب و تعرق، کاهش سطح جذب و فعالیت ریشه و از طرفی تغلیظ شیره سلولی (افزایش فشار اسمزی) محتوی آب نسبی برگ را کاهش می‌دهد (Smart & Bingham, 1974).

پایداری غشا: کمترین میزان پایداری غشا (۷۰/۶ درصد) در آبیاری ۵۰ و ۷۰ درصد دوره رشد گیاه و آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه داشت (جدول ۳) که آسیب بیشتر وارده به غشا سلولی را در اثر کمبود آب منعکس می‌کند (Bikdeloo et al., 2021). تخریب غشاهای سلولی از فعالیت گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن تولید شده که اغلب با بسته شدن روزنه و تجمع الکترون در مواجهه با کمبود آب افزایش می‌یابد و تغییر شکل پروتئین، لیپیدهای غشا و ملکول‌های دی ان ای را نیز به دنبال خواهد داشت (Silva et al., 2023).

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر سال و اثر متقابل سال و آبیاری بر شاخص کلروفیل، رنگیزه‌های فتوسنتز (کلروفیل کل، آ و ب و

کاروتنوئید)، محتوای پرولین، فنول کل و آنزیم سوپراکسید دیسموتاز معنی‌دار نبود، اثر آبیاری بر شاخص کلروفیل در سطح احتمال پنج درصد و بر رنگیزه‌های فتوسنتز، پرولین، فنول کل و آنزیم سوپراکسید دیسموتاز در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار است (جدول ۴).

شاخص کلروفیل و رنگیزه‌های فتوسنتز شامل کلروفیل کل، کلروفیل آ، با آبیاری ۷۰ و ۵۰ درصد دوره رشد گیاه و آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه در مقایسه با آبیاری کامل افزایش بیشتری داشت (جدول ۵)، که این افزایش غلظت می‌تواند ناشی از کاهش محتوای آب نسبی و کاهش سطح برگ گیاه در اثر کمبود آب باشد، گزارشات مشابهی از افزایش شاخص کلروفیل در سطوح تنش شدیدتر ارائه شده است. کلروفیل ب و کاروتنوئید نسبتاً تغییرات کمتری داشت که می‌تواند به حساسیت کمتر کلروفیل ب و پایداری کاروتنوئید مرتبط باشد. دلایل عمده کاهش کلروفیل در کم آبیاری کاهش کلروفیل با افزایش مصرف گلوتامات در مسیر تولید پرولین، آسیب غشا کلروپلاست با گونه‌های واکنش‌گر اکسیژن (رادیکال‌های آزاد) و از طرفی تخریب ملکول کلروفیل و تجزیه بخش پروتئینی آن با افزایش آنزیم‌های کلروفیل‌لاز، پراکسیداز و لیپو اکسیژناز به دنبال افزایش تنفس و تولید اتیلن باشد (Jing et al., 2023).

جدول ۴- تجزیه واریانس اثر سال، کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر شاخص کلروفیل، کلروفیل کل، کلروفیل آ، کلروفیل ب، کاروتنوئید، پرولین، فنول کل و آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز

Table 4- Analysis of variance of year, deficit irrigation and regulated deficit irrigation effect on chlorophyll index, total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, proline, total phenol and superoxide dismutase

میانگین مربعات Mean squares									
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	شاخص کلروفیل Chlorophyll index	کلروفیل کل Total chlorophyll	کلروفیل آ Chlorophyll a	کلروفیل ب Chlorophyll b	کاروتنوئید Carotenoid	پرولین Proline	فنول کل Total phenol	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase
سال Year	1	793	0.003	0.004	0.0009	0.001	1.33	0.66	17.5
خطا (تکرار * سال) Error	4	16.5	0.02	0.02	0.005	0.02	86.2	10.1	347
آبیاری Irrigation	7	69.04*	0.19**	0.14**	0.012**	0.11**	840**	233**	9070**
سال * آبیاری Y × I	7	14.07	0.002	0.004	0.001	0.005	0.41	0.06	53.3
خطا Error	28	10.10	0.009	0.008	0.001	0.003	1.54	1.50	122
ضریب تغییرات cv	-	5.57	7.33	8.46	13.5	11.80	4.00	10.2	14.8

** و * به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

**, * signifiacncy at 1 and 5 percent probability levels respectively.

گیاه در مواجهه با کمبود آب فعالیت آنزیم‌های آنتی اکسیداتیو را افزایش می‌دهد (Yavuz, Seymen, Yavuz, Coklar, & Ercan, 2021). بر اساس نتایج تجزیه واریانس اثر آبیاری بر صفات کیفی میوه مانند مواد جامد محلول، اسید قابل تیتر، پی‌اچ، مزه، ویتامین ث، ماده خشک، محتوی لیکوپن، طول و قطر میوه معنی‌دار است. اثر متقابل سال و آبیاری بر طول و شکل میوه در سطح ۵ درصد نیز معنی‌دار گردید (جدول ۶).

مواد جامد محلول: مواد جامد محلول میوه بر اساس مقایسات میانگین دو فصل (جدول ۷) با آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه (۹/۴۶) افزایش ۵/۵۰ درصدی در مقایسه با آبیاری کامل (۸/۹۷) داشت. مواد جامد محلول آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد و آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه کمترین میزان را داشت، و سایر تیمارها با آبیاری کامل از لحاظ آماری تفاوتی نداشت. در یافته‌های مطالعه کم آبیاری سبب عدم تأثیر معنی‌دار بر مواد جامد محلول و اسید آلی شد ولی کم آبیاری تنظیم شده بخصوص در مرحله بلوغ میوه این صفات را افزایش داد.

پرولین براساس مقایسات میانگین دو سال (جدول ۵) با آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد گیاه در مقایسه با آبیاری کامل افزایش بیشتری نسبت به سایر تیمارها داشته که به بیشترین مقدار (۲/۳۱ میلی گرم در گرم بافت تازه) رسیده است، افزایش آنتی اکسیدانت‌های غیر آنزیمی نظیر پرولین در شرایط مواجهه با کمبود آب در گیاه هندوانه گزارش شده است (Silva et al., 2023). مقابله با تنش در اغلب گیاهان علاوه بر تغییرات ظاهری (مورفولوژیک)، زراعی و فیزیولوژیک، با افزایش تولید ترکیبات فعال زیستی مانند پرولین، ترکیبات فنولی و آنزیم‌های ضد اکسیداسیون که سیستم دفاعی گیاه را تشکیل می‌دهند، همراه است (Silva et al., 2023).

فنول کل برگ گیاه بیشترین مقادیر (۴/۴۰ میلی گرم در گرم بافت تازه) را با آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد گیاه داشت (جدول ۵). در شرایط تنش، ثبات غشا سلول با ساخت فنول‌ها به وسیله آنزیم فنیل آلانین آمونیالایز امکان‌پذیر می‌شود (Tian & Lei, 2006). آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز افزایش چشمگیری (۱۴۸ واحد در گرم بافت تازه) با آبیاری ۵۰ درصد داشت (جدول ۵). سیستم دفاعی

جدول ۵- مقایسه میانگین دو فصل اثر کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر شاخص کلروفیل، کلروفیل آ، کلروفیل ب، کاروتنوئید، پرولین، فنول کل و آنزیم سوپر اکسید دیسموتاز گیاه هندوانه

Table 5- Mean comparisons of deficit irrigation effect on chlorophyll index (SPAD), total chlorophyll, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid, proline, total phenol and superoxide dismutase

تیمار Treatment	شاخص کلروفیل Chlorophyll (-) index (	کلروفیل کل Total chlorophyll (mg. g fw)	کلروفیل آ Chlorophyll a (mg. g fw)	کلروفیل ب (mg. g fw) Chlorophyll b (mg. g fw)	کاروتنوئید Carotenoid (mg. g fw)	پرولین Proline (mg. g fw)	فنول کل Total phenol (mg. g fw)	سوپر اکسید دیسموتاز Superoxide dismutase (Unit.g fw)
آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) Full irrigation (100% water requirement)	52.5 ^{bc}	1.00 ^c	0.91 ^c	0.09 ^b	0.42 ^{bc}	1.03 ^d	1.07 ^d	52.0 ^d
۷۰ درصد نیاز آبی 70% water requirement	56.6 ^b	1.28 ^b	1.17 ^b	0.11 ^b	0.49 ^b	1.30 ^b	1.90 ^b	59.0 ^b
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	64.3 ^a	1.71 ^a	1.42 ^a	0.29 ^a	0.86 ^a	2.31 ^a	4.40 ^a	148 ^a
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گیاهچه 50% water requirement of the seedling stage	53.6 ^{bc}	1.10 ^c	1.01 ^{bc}	0.09 ^b	0.42 ^{bc}	1.04 ^d	1.07 ^d	52.4 ^d
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله ساقه‌دهی 50% water requirement of the vine stage	54.01 ^{bc}	1.13 ^{bc}	1.03 ^{bc}	0.10 ^b	0.43 ^{bc}	1.15 ^c	1.30 ^c	55.0 ^c
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گلدهی 50% water requirement of flowering stage	54.3 ^{bc}	1.15 ^{bc}	1.05 ^{bc}	0.10 ^b	0.43 ^{bc}	1.19 ^c	1.40 ^c	55.9 ^c
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله توسعه میوه 50 % water requirement of fruit development stage	55.8 ^b	1.28 ^b	1.17 ^b	0.11 ^b	0.49 ^b	1.25 ^b	1.80 ^b	59.0 ^b
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله بلوغ میوه 50 % water requirement of fruit maturity stage	53.8 ^{bc}	1.13 ^{bc}	1.03 ^{bc}	0.10 ^b	0.43 ^{bc}	1.17 ^c	1.30 ^c	55.1 ^c

در هر ستون میانگین‌های با حداقل یک حرف مشترک، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, means with at least one common letter are not significantly different at 5% probability level based on Duncan multiple range test.

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر سال، کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر مواد جامد محلول، اسید قابل تیتر، پی اچ، مزه، ویتامین ث، ماده خشک و لیکوپن، طول، قطر و شکل میوه

Table 6- Analysis of variance of deficit irrigation and regulated deficit irrigation effect on soluble solids (TSS), titratable acid (TA), pH, taste (Tss/Ta), vitamin C, drymatter, lycopene, length, width and fruit shape (Fl/Fwi)

میانگین مربعات Mean squares											
منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	مواد جامد محلول Soluble solids	اسید قابل تیتر Titratable acid	پی اچ pH	مزه Taste	ویتامین ث Vitamin C	ماده خشک Drymatter	لیکوپن Lycopene	طول میوه Fruit length	قطر میوه Fruit width	شکل میوه Shape
سال Year	1	0.07	0.0008	0.16	1.43	8.56	0.10	0.24	192	53.1	0.001
خطا (تکرار * سال) Error	4	0.30	0.06	0.03	19.9	3.06	0.24	38.00	84.00	16.3	0.02
آبیاری Irrigation	7	0.67 **	0.05 **	0.82 **	14.8*	5.44*	0.45 *	7.54 *	522 **	371 **	0.03
سال * آبیاری Y × I	7	0.02	0.003	0.01	2.87	1.22	0.08	1.23	24.00 *	0.51	0.01 *
خطا Error	28	0.08	0.002	0.02	2.28	2.89	0.06	6.63	9.12	4.68	0.006
ضریب تغییرات Cv	-	3.40	8.31	3.12	10.9	6.02	3.13	6.46	7.86	7.81	6.15

** و * به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد

**, * signficancy at 1 and 5 percent probability levels respectively.

میوه افزایش محتوای ویتامین ث، گزارش شده است (Liu et al., 2016).

ماده خشک میوه بیشترین میزان را با آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه (۸/۸۸ درصد) و آبیاری ۵۰ درصد (۸/۸۵) داشت و کمترین میزان با آبیاری کامل (۸/۱۳) مشاهده شد.

لیکوپن میوه تیمارها بر اساس مقایسات میانگین غیر از آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه که بیشترین میزان (۴۳/۱ میلی گرم در کیلوگرم) را به خود اختصاص داد، تفاوت معنی داری نشان نداد (جدول ۷) که احتمالاً به دلیل اینکه لیکوپن در مراحل پایانی ساخته می شود (Bang, Leskovar, Bender, & Crosby, 2004).

طول میوه بیشترین مقدار را با آبیاری کامل و آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه (بترتیب ۲۸/۹ و ۲۸/۶ سانتی متر) نشان داد و کمترین میزان (۱۳/۳ سانتی متر) با آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد گیاه وجود داشت. سال دوم کاهش طول میوه با آبیاری ۵۰ درصد مرحله گلدهی نسبت به سال نخست مشاهده شد که شاید حاصل اثر دما بر تقسیمات سلولی باشد (شکل ۲).

قطر میوه بیشترین مقدار را با آبیاری کامل و آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه (به ترتیب ۲۲/۹ و ۲۲/۶ سانتی متر) نشان داد و با سایر سطوح غیر از آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه و آبیاری ۵۰ درصد تفاوت معنی دار نداشت (جدول ۷).

شکل میوه با آبیاری ۵۰ درصد مرحله گلدهی در سال دوم کاهش یافت که حاصل اثر کاهش طول میوه است (شکل ۳).

مطالعات دیگر نشان داد که کم آبیاری قادر است میزان جامد محلول و قند محلول میوه هندولنه را در مزرعه افزایش دهد، اما تأثیر کمتری بر میزان اسیدیته داشت، در مطالعه دیگری، مشخص شد که تیمارهای مختلف کم آبیاری تنظیم شده اثرات قابل توجهی بر شاخص های مختلف کیفیت هندوانه داشتند (Erdem & Yuksel, 2003)، این مطلب با یافته های لیو و همکاران نیز مطابقت دارد (Liu et al., 2014). ممکن است مرحله رشد گیاه تحت کم آبیاری و یا نوع تیمار کم آبیاری نتایج متفاوتی از مواد جامد محلول ایجاد کند (Rouphael, Cardarelli, Colla, & Rea, 2008).

اسید قابل تیتر عصاره میوه بیشترین میزان (۰/۸۵ درصد) را با آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه داشت ولی سایر تیمارها تفاوت معنی داری با هم نداشتند. پی اچ عصاره میوه با آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه در کمترین حد قرار گرفت (۳/۷۸) و در مقایسه با آبیاری کامل (۴/۸۴)، کاهش ۲۱/۱ درصدی نشان داد، ولی تفاوتی بین سایر تیمارهای آبیاری مشاهده نشد.

مزه میوه بر اساس مقایسات میانگین، بیشترین میزان را (۱۶/۹) با آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه داشت که ۱۵/۷ درصد در مقایسه با شاهد افزایش یافت (جدول ۷)، کمترین میزان مزه در تیمار آبیاری ۵۰ درصد مرحله توسعه میوه وجود داشت.

ویتامین ث عصاره میوه بیشترین میزان (۲۹/۸ درصد) را با آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه داشت که با سایر تیمارها غیر از آبیاری ۵۰ درصد دوره رشد (۲۶/۴ درصد) که کمترین ویتامین ث را داشت، تفاوت معنی داری نشان نداد. با کم آبیاری تنظیم شده در مراحل رشد

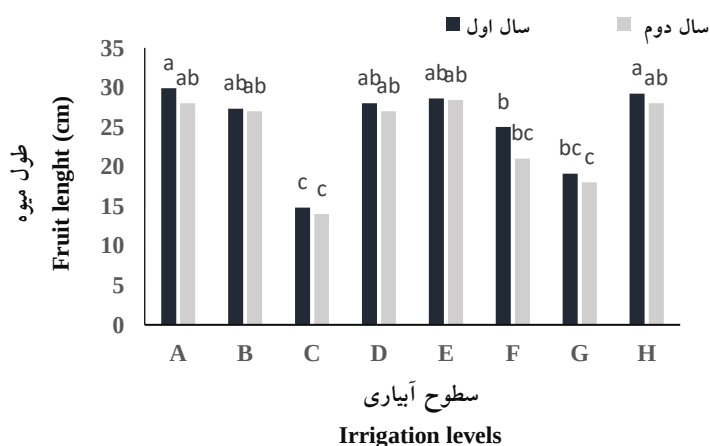
جدول ۷- مقایسه میانگین دو فصل اثر کم آبیاری و کم آبیاری تنظیم شده بر مواد جامد محلول، اسید قابل تیتر، پی‌اچ، مزه، ویتامین ث، ماده خشک، لیکوپن و قطر میوه

Table 7- Analysis of variance of irrigation effect of irrigation and on, soluble solids (TSS), titratable acid (TA), pH, taste (Tss/Ta), vitamin C, dry matter, lycopene, fruit width

تیمار Treatment	مواد جامد محلول Soluble (%) solids	اسید قابل تیتر Titratable acid (%)	پی‌اچ pH (%)	مزه Taste (%)	ویتامین ث Vitamin C (%)	ماده خشک Dry matter (%)	لیکوپن Lycopene (mgkg ⁻¹ fw)	قطر میوه Fruit width (cm)
آبیاری کامل (۱۰۰ درصد نیاز آبی) Full irrigation (100% water requirement)	8.97 ^{ab}	0.65 ^b	4.84 ^a	14.6 ^{ab}	28.7 ^a	8.13 ^b	39.1 ^{ab}	22.9 ^a
۷۰ درصد نیاز آبی 70% water requirement	8.61 ^b	0.59 ^b	4.88 ^a	15.4 ^{ab}	27.5 ^{ab}	8.40 ^{ab}	39.1 ^{ab}	21.2 ^{ab}
۵۰ درصد نیاز آبی 50% water requirement	8.52 ^{bc}	0.58 ^b	4.88 ^a	16.3 ^a	26.4 ^b	8.85 ^a	38.6 ^{ab}	10.4 ^{bc}
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گیاهچه 50% water requirement seedling stage	8.67 ^b	0.65 ^b	4.82 ^a	14.6 ^{ab}	27.9 ^{ab}	8.23 ^b	39.6 ^{ab}	21.7 ^{ab}
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله ساقه‌دهی 50% water requirement vine stage	8.63 ^b	0.60 ^b	4.80 ^a	14.4 ^{ab}	28.2 ^{ab}	8.33 ^b	38.8 ^{ab}	21.3 ^{ab}
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گلدهی 50% water requirement of flowering stage	8.65 ^b	0.60 ^b	4.78 ^a	14.2 ^{ab}	28.2 ^{ab}	8.33 ^b	38.1 ^{ab}	21.6 ^{ab}
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله توسعه میوه 50% water requirement of fruit development stage	8.58 ^{bc}	0.85 ^a	3.78 ^b	11.5 ^b	27.1 ^{ab}	8.50 ^{ab}	38.00 ^{ab}	11.5 ^{bc}
۵۰ درصد نیاز آبی مرحله بلوغ میوه 50% water requirement of fruit maturity stage	9.46 ^a	0.60 ^b	4.88 ^a	16.9 ^a	29.8 ^a	8.88 ^a	43.1 ^a	22.6 ^a

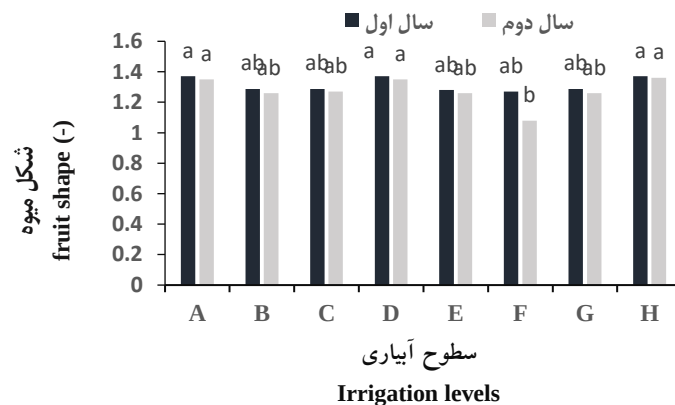
در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک، بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد اختلاف معنی‌داری ندارند.

In each column, means with at least one common letter are not significantly different at 5% probability level based on Duncan multiple range test.



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل سال و آبیاری بر طول میوه هندوانه ؛ A: آبیاری کامل، B: ۷۰ درصد نیاز آبی، C: ۵۰ درصد نیاز آبی، D: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گیاهچه، E: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله ساقه‌دهی، F: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گلدهی، G: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله توسعه میوه، H: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله بلوغ میوه

Figure 2- Mean comparison of interaction effect of year and irrigation on watermelon fruit length; A: Full irrigation, B: 70% water requirement, C: 50% water requirement, D: 50% water requirement of seedling stage, E: 50% of water requirement of vine stage, F: 50% of water requirement of flowering stage, G: 50% water requirement of fruit development stage, H: 50% water requirement fruit maturity stage



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل سال و آبیاری بر شکل میوه هندوانه در دو فصل زراعی، A: آبیاری کامل، B: ۷۰ درصد نیاز آبی C: ۵۰ درصد نیاز آبی، D: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گیاهچه، E: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله ساقه‌دهی، F: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله گلدهی، G: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله توسعه میوه، H: ۵۰ درصد نیاز آبی مرحله بلوغ میوه

Figure 3- Mean comparison of interaction effect of year and irrigation on watermelon fruit shape; A: Full irrigation, B: 70% water requirement, C: 50% water requirement, D: 50% water requirement of seedling stage, E: 50% of water requirement of vine stage, F: 50% of water requirement of flowering stage, G: 50% water requirement of fruit development stage, H: 50% water requirement fruit maturity stage

با محدودیت آب می‌تواند قابل توجه باشد. در نهایت توصیه می‌شود شدت‌های ملایم‌تر کم‌آبیاری که بنظر می‌رسد نتایج مطلوب‌تری در این گیاه به همراه داشته باشد در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

سپاسگزاری

این پروژه با کد ۵۳۷۴۶ در تاریخ ۱۳۹۹/۱۰/۱۷ در شورای پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد تصویب و با تأمین مالی بخشی از هزینه با حمایت مالی دانشگاه نامبرده انجام شد. از سازمان هواشناسی کشور به‌خاطر همکاری در دریافت داده‌های هواشناسی تشکر و قدردانی می‌شود.

نتیجه‌گیری

با اعمال کم‌آبیاری با شدت‌های به کار رفته در این مطالعه در مقایسه با آبیاری کامل (شاهد)، کاهش عملکرد هندوانه به طرز معنی‌داری مشاهده شد. بهره‌وری آب تقریباً ثابت ماند، در کیفیت قسمت خوراکی افزایش چشمگیری ایجاد نشد، اما کم‌آبیاری تنظیم شده مرحله گیاهچه از لحاظ عملکرد بدون تفاوت معنی‌دار با آبیاری کامل و تیمارهای آبیاری ۵۰ درصد مرحله ساقه‌دهی از لحاظ بهره‌وری آب و آبیاری ۵۰ درصد مرحله بلوغ میوه از لحاظ کیفیت نسبت به شاهد برتری داشت. بطور کلی در این مطالعه، کم‌آبیاری تنظیم شده نسبت به کم‌آبیاری، به دلیل کاهش عملکرد کمتر، افزایش بهره‌وری آب و کیفیت میوه گیاه هندوانه نتایج مطلوب‌تری داشت که در مواجهه

References

- Abbasi, F., & Abbasi, N. (2024). An analysis of irrigation efficiencies over time in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(6), 1025-1033. (In Persian with English abstract). https://idj.iaid.ir/article_189534.html?lang=en
- Abbasi, F., Akbari, M., Nasser, A., Abbasi, N., Baghani, J., Joleini, M., Shahrokhnia, M.A., Nakhjavanimoghaddam, M.M., Sepehri Sadeghian, S., Moayeri, M., Hassanoghli, A., Haghayeghi, A., Ghadami Firouzabadi, A., mousavifazl, S.H., & Yazdani, M. (2024). A review of water consumption management indicators of different crops in Iran. *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, 25(94), 1-16. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/idser.2024.364605.1569>
- Abdelkhalik, A., Pascual, B., Najera, I., Domene, M.A., Baixauli, C., & Pascual-Seva, N. (2020). Effects of deficit irrigation on the yield and irrigation water use efficiency of drip-irrigated sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) under Mediterranean conditions. *Irrigation Science*, 38, 89-104. <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00655-1>
- Abdelkhalik, A., Pascual-Seva, N., Najera, I., Giner, A., Baixauli, C., & Pascual, B. (2019). Yield response of seedless watermelon to different drip irrigation strategies under Mediterranean conditions. *Agricultural Water Management*, 212, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.044>
- Allakonon, M.G.B., Zakari, S., Tovihoudji, P.G., Fatondji, A.S., & Akponikpè, P.I. (2022). Grain yield, actual

- evapotranspiration and water productivity responses of maize crop to deficit irrigation: A global meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 270, 107746. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107746>
6. Allen, R.G. (1998). *Crop evapotranspiration. FAO irrigation and drainage paper*, 56, 60-64. <https://doi.org/10.3178/jjshwr.16.589>
7. Arya, S.P., Mahajan, M., & Jain, P. (2000). Non-spectrophotometric methods for the determination of Vitamin C. *Analytica Chimica Acta*, 417(1), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)00909-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)00909-0)
8. Ayele, B.G., Asseffa, S., & Tuhar, A.W. (2023). Effect of deficit irrigation under furrow irrigation techniques on garlic (*Allium sativum* L.) productivity at the central highland of Ethiopia. *Water-Energy Nexus*, 6, 32-45. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2023.07.001>
9. Bang, H., Leskovar, D.I., Bender, D.A., & Crosby, K. (2004). Deficit irrigation impact on lycopene, soluble solids, firmness and yield of diploid and triploid watermelon in three distinct environments. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 79(6), 885-890. <https://doi.org/10.1080/14620316.2004.11511861>
10. Bikdeloo, M., Colla, G., Roupael, Y., Hassandokht, M.R., Soltani, F., Salehi, R., Kumar, P., & Cardarelli, M. (2021). Morphological and physio-biochemical responses of watermelon grafted onto rootstocks of wild watermelon [*Citrullus colocynthis* (L.) Schrad] and commercial interspecific cucurbita hybrid to drought stress. *Horticulturae*, 7(10), 359. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7100359>
11. Carillo, P., & Gibon, Y. (2011). Protocol: Extraction and determination of proline. *PrometheusWiki*, 1-5.
12. Chai, Q., Gan, Y., Zhao, C., Xu, H.L., Waskom, R.M., Niu, Y., & Siddique, K.H. (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0338-6>
13. Comas, L.H., Trout, T.J., DeJonge, K.C., Zhang, H., & Gleason, S.M. (2019). Water productivity under strategic in maize. *Agricultural Water Management*, 212, 433-440. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.015>
14. Du, T., Kang, S., Zhang, J., & Davies, W.J. (2015). Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security. *Journal of Experimental Botany*, 66(8), 2253-2269. <https://doi.org/10.1093/jxb/erv034>
15. Emam, Y., Shekoofa, A., Salehi, F., & Jalali, A.H. (2010). Water stress effects on two common bean cultivars with contrasting growth habits. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 9(5), 495-499.
16. Erdem, Y., & Yuksel, A.N. (2003). Yield response of watermelon to irrigation shortage. *Scientia Horticulturae*, 98(4), 365-383. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(03\)00019-0](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(03)00019-0)
17. Fish, W.W., Perkins-Veazie, P., & Collins, J.K. (2002). A quantitative assay for lycopene that utilizes reduced volumes of organic solvents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 15(3), 309-317. <https://doi.org/10.1006/jfca.2002.1069>
18. Gao, Q.H., Yu, J.G., Wu, C.S., Wang, Z.S., Wang, Y.K., Zhu, D.L., & Wang, M. (2014). Comparison of drip, pipe and surge spring root irrigation for jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit quality in the Loess Plateau of China. *PloS one*, 9(2), 88912. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088912>
19. Giannopolitis, C.N., & Ries, S.K. (1977). Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59(2), 309-314. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
20. Hou, H., Yang, Y., Han, Z., Cai, H., & Li, Z. (2019). Deficit irrigation effectively reduces soil carbon dioxide emissions from wheat fields in Northwest China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(12), 5401-5408. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9800>
21. Jafari, H., & Abbasi, F. (2023). Introducing and evaluation of relative economic water productivity index. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(7), 1095-1114. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.358941.669495>
22. Jefferies, R.A., & Mackerron, D.K.L. (1993). Responses of potato genotypes to drought. II. Leaf area index, growth and yield. *Annals of Applied Biology*, 122(1), 105-112. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1993.tb04018.x>
23. Jing, D., Liu, B., Ma, H., Liu, F., Liu, X., & Ren, L. (2023). Effects of inoculation with different plant growth-promoting rhizobacteria on the eco-physiological and stomatal characteristics of walnut seedlings under drought stress. *Agronomy*, 13(6), 1486. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061486>
24. Khanthavong, P., Yabuta, S., Asai, H., Hossain, M. A., Akagi, I., & Sakagami, J.I. (2021). Root response to soil water status via interaction of crop genotype and environment. *Agronomy*, 11(4), 708. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040708>
25. Kuscü, H., Turhan, A.H.M.E.T., Özmen, N., Aydinol, P., Buyukcangaz, H., & Demir, A.O., (2015). Deficit irrigation effects on watermelon (*Citrullus vulgaris*) in a sub humid environment. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 25(6), 1652-1659.
26. Lichtenthaler, H.K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: Measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4-3. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
27. Liu, J.X., Zhang, R., Cheng, Z.Y., Li, M., Cheng, N.N., Ma, Q.M., & Dai, W.Y. (2016). Effect research of water deficit in different growth stage on wine grape yield and quality. *Journal Agricultural Research in the Arid Areas*,

- 34, 78-83.
28. Liu, L., Mo, Y., Yang, X., Li, X., Wu, M., Zhang, X., & Li, H. (2014). Reasonable drip irrigation frequency improving watermelon yield and quality under regulated deficit irrigation in plastic greenhouse. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 30(24), 95-104.
29. Meddich, A., Ait Rahou, Y., Boutasknit, A., Ait-El-Mokhtar, M., Fakhech, A., Lahbouki, S., & Wahbi, S. (2022). Role of mycorrhizal fungi in improving the tolerance of melon (*Cucumis melon*) under two water deficit partial root drying and regulated deficit irrigation. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 156(2), 469-479. <https://doi.org/10.1080/11263504.2021.1881644>
30. Miceli, A., Vetrano, F., Torta, L., Esposito, A., & Moncada, A. (2023). Effect of Mycorrhizal Inoculation on Melon Plants under Deficit Irrigation Regimes. *Agronomy*, 13(2), 440. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020440>
31. Muhie, S.H., Akele, F., & Yeshiwas, T. (2024). Economic feasibility of carrot (*Daucus carota* L.) production in response to different seed priming techniques under deficit irrigation. *Scientia Horticulturae*, 325, 112662. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112662>
32. Mukherjee, S., Dash, P.K., Das, D., & Das, S. (2023). Growth, yield and water productivity of tomato as influenced by deficit irrigation water management. *Environmental Processes*, 10(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s40710-023-00624-z>
33. Ozmen, S., Kanber, R., Sari, N., & Unlu, M. (2015). The effects of deficit irrigation on nitrogen consumption, yield, and quality in drip irrigated grafted and ungrafted watermelon. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(5), 966-976. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60870-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60870-4)
34. Roupheal, Y., Cardarelli, M., Colla, G., & Rea, E. (2008). Yield, mineral composition, water relations, and water use efficiency of grafted mini-watermelon plants under deficit irrigation. *HortScience*, 43(3), 730-736.
35. Shohat, H., Eliaz, N.I., & Weiss, D. (2021). Gibberellin in tomato: Metabolism, signaling and role in drought responses. *Molecular Horticulture*, 1(1), 1-12. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.730>
36. Silva, J.M., da Silva Junior, G.B., Bonifácio, A., Dutra, A.F., de Mello Prado, R., de Alcantara Neto, F., & de Sousa, R.S. (2023). Exogenous salicylic acid alleviates water stress in watermelon plants. *Annals of Applied Biology*, 182(1), 121-130. <https://doi.org/10.1111/aab.12802>.
37. Slinkard, K., & Singleton, V.L. (1977). Total phenol analysis: automation and comparison with manual methods. *American Journal of Enology and Viticulture*, 28(1), 49-55. <https://doi.org/10.5344/ajev.1977.28.1.49>
38. Smart, R.E., & Bingham, G.E. (1974). Rapid estimates of relative water content. *Plant Physiology*, 53(2), 258-260. <https://doi.org/10.1104/pp.53.2.258>
39. Tian, X., & Lei, Y. (2006). Nitric oxide treatment alleviates drought stress in wheat seedlings. *Biologia Plantarum*, 50, 775-778. <https://doi.org/10.1007/s10535-006-0129-7>
40. Turner, N.C. (1990). Plant water relations and irrigation management. *Agricultural Water Management*, 17(1-3), 59-73. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(90\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0378-3774(90)90056-5)
41. Wang, F., Kang, S.Z., & Wang, Z.C. (2007). Effects of regulated deficit irrigation on water use efficiency, yield and quality of watermelon in Minqin county of Gansu province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 25(4), 123-129.
42. Wang, Z., Yu, S., Zhang, H., Lei, L., Liang, C., Chen, L., & Li, X. (2023). Deficit mulched drip irrigation improves yield, quality, and water use efficiency of watermelon in a desert oasis region. *Agricultural Water Management*, 277, 108103. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108103>
43. Xu, J., Wan, W., Zhu, X., Zhao, Y., Chai, Y., Guan, S., & Diao, M. (2023). Effect of regulated deficit irrigation on the growth, yield, and irrigation water productivity of processing tomatoes under drip irrigation and mulching. *Agronomy*, 13(12), 2862. <https://doi.org/10.3390/agronomy13122862>
44. Yang, H., Du, T., Qiu, R., Chen, J., Wang, F., Li, Y., & Kang, S. (2017). Improved water use efficiency and fruit quality of greenhouse crops under regulated deficit irrigation in northwest China. *Agricultural Water Management*, 179, 193-204. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.029>
45. Yang, P., & He, S. (2022). The effects of arbuscular mycorrhizal fungi and deficit irrigation on the yield and sugar content of watermelons (*Citrullus lanatus*). *Horticultural Science*, 49(4), 225-233. <https://doi.org/10.17221/108/2021-HORTSCI>
46. Yavuz, D., Seymen, M., Yavuz, N., Coklar, H., & Ercan, M. (2021). Effects of water stress applied at various phenological stages on yield, quality, and water use efficiency of melon. *Agricultural Water Management*, 246, 106673. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106673>
47. Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X., & Huang, Q. (2017). Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.07.022>

Enhancing the Accuracy of Land Use/Cover Map Using Some Spectral Indices in Sarab County–East Azerbaijan

A. Sarabchi¹, H. Rezaei^{2*}, F. Shahbazi³

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Assistant Professor and Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: hosseinrezaei@tabrizu.ac.ir)

Received: 12-05-2024	How to cite this article:
Revised: 21-10-2024	Sarabchi, A., Rezaei, H., & Shahbazi, F. (2024). Enhancing the accuracy of land use/cover map using some spectral indices in Sarab County–East Azerbaijan. <i>Journal of Water and Soil</i> , 38(5), 591-605. (In Persian with English abstract).
Accepted: 26-10-2024	https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88043.1410
Available Online: 29-10-2024	

Introduction

High-resolution satellite imagery data is widely utilized for Land Use/Land Cover (LULC) mapping. Analyzing the patterns of LULC and the data derived from changes in land use caters to the increasing societal demands, improving convenience, and fostering a deeper comprehension of the interaction between human activities and environmental factors. Although numerous studies have focused on remote sensing for LULC mapping, there is a pressing need to improve the quality of LULC maps to achieve sustainable land management, especially in light of recent advancements made. This study was carried out in an area covering approximately 8000 hectares, characterized by diverse conditions in LULC, geomorphology and pedology. The objective was to investigate the potential for achieving maximum differentiation and accurate mapping of land features related to LULC. Additionally, the study assessed the impact of various spectral indices on enhancing the results from the classification of Landsat 8 imagery, while also evaluating the efficacy of support vector machine (SVM) and maximum likelihood algorithms in producing maps with satisfactory accuracy and precision.

Materials and Methods

As an initial step, LULC features were identified through fieldwork, and their geographic coordinates were recorded using GPS. These features included various types of LULC, soil surface characteristics, and landform types. Following the fieldwork, 12 types of LULC units were identified. Subsequently, the LULC pattern in the study area was classified using the RGB+NIR+SWIR1 bands of Landsat 8, employing both SVM and maximum likelihood classifiers. To assess the impact of various spectral indices on improving the accuracy of the LULC maps, a set of vegetation indices (NDVI, SAVI, LAI, EVI, and EVI2), bare soil indices (BSI, BSI3, MNDSI, NBLI, DBSI, and MBI), and integrated indices (TLIVI, ATLIVI, and LST), and digital elevation model of study area were successively incorporated into the classification algorithms. Finally, the outcomes from the two classification algorithms were compared, taking into account the influence of the applied indexes. The classification process continued with the selected classifier and indices until reaching the maximum overall accuracy and kappa coefficient.

Results and Discussion

Field observations revealed that the study area could be categorized into 12 primary LULC units, including irrigated farms, flow farming, dry farming, traditional gardens (with no evident order observed among planted trees), modern gardens (featuring regular rows where soil reflectance is visible between tree rows), grasslands, degraded grasslands, highland pastures (covered by *Astragalus* spp., dominantly), lowland pastures (covered by



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88043.1410>

halophyte plants), salt domes (with no or very poor vegetation), outwash areas (River channel with many waterways), and resistant areas. The results of image classification indicated that the performance of the SVM algorithm across different band combinations is superior to that of the maximum likelihood method. Using SVM resulted in an increase in overall accuracy and Kappa coefficient by 3-8% and 0.03-0.08, respectively. For the map generated using RGB+NIR+SWIR1 bands and employing SVM, overall accuracy and Kappa coefficient were determined to be 76.6% and 0.72, respectively. Among the vegetation indices used in the SVM algorithm, LAI had the most significant impact, increasing the classification accuracy by 2.64%. Among the soil indices, BSI and MBI indices demonstrated the best performance; with BSI increasing the classification accuracy by 1.95% and MBI by 1.64%. Among the integrated indices, LST and ALTIVI enhanced the classification accuracy by 2.75% and 2.35%, respectively. It should be noted that the inclusion of the digital elevation model did not significantly improve the classification accuracy when using the support vector machine algorithm; in fact, it led to a decrease in accuracy when applied to the maximum likelihood classification. The probable reason for this issue is the different nature of DEM data compared to the other input data, as well as the limitations of parametric statistical approaches to effectively integrating data from diverse sources. Finally, the classification process was executed using the three visible bands, NIR, and SWIR1, in conjunction with selected indices (LAI, BSI, MBI, LST, and ALTIVI). Results indicated that using these spectral indices significantly improved classification accuracy, particularly for the DF, DGL, MG, O, and IF land cover/use classes. The calculated accuracies for these classes increased by 11.62%, 18.57%, 20.06%, 29.39%, and 33.19% respectively. Consequently, the accuracy of the classification and the Kappa coefficient (using support vector machine algorithm) increased to 85.24% and 0.82, respectively.

Conclusion

In this research, we aimed to accurately map various land use/land covers by utilizing Landsat 8 imagery and incorporating three group of spectral indexes. Despite spectral interferences and overlaps among various phenomena related to LULC, the utilization of different spectral indices resulted in significant differentiation among LULC classes. Finally, considering the limitations of modelling in ENVI software, it is recommended to investigate the effectiveness of other models for classification in more specialized software, such as R.

Keywords: Land sustainable management, Maximum likelihood, Support vector machine

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۳، ۶۰۵-۵۹۱

ارتقاء کیفیت نقشه کاربری/پوشش اراضی با استفاده از برخی شاخص‌های طیفی در شهرستان سراب، آذربایجان شرقی

علی سرابیچی^۱ - حسین رضائی^{۲*} - فرزین شهبازی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

چکیده

مطالعه الگوی کاربری/پوشش اراضی و کسب اطلاعات درست و به‌روز در این خصوص از گام‌های نخست در مدیریت اراضی است. تحقیق حاضر در منطقه‌ای با وسعت ۸۰۰۰ هکتار از اراضی شهرستان سراب به‌منظور بررسی امکان تفکیک حداکثری و نقشه‌برداری دقیق پدیده‌های زمینی مرتبط با کاربری/پوشش اراضی انجام شد. الگوی کاربری/پوشش منطقه مورد مطالعه با استفاده از باندهای مرئی، NIR و SWIR سنجنده OLI و به کمک الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان و حداکثر احتمال طبقه‌بندی شدند. سپس به‌منظور بهبود کیفیت نقشه کاربری/پوشش اراضی، نقشه DEM و سه گروه شاخص طیفی شامل شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI-SAVI-LAI-EVI1-EVI2)، شاخص‌های خاک (BSI-BSI3-MNDSI-NBI)، شاخص‌های پوشش آبی (DBSI-NBLI) و شاخص‌های تلفیقی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای (LST--TLIVI-ATLIVI) بررسی و شاخص‌های منتخب مجدد در الگوریتم طبقه‌بندی برتر وارد و کیفیت نقشه‌های خروجی مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج محاسبه صحت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا نشان داد که در تمامی ترکیبات باندی به کار رفته، روش ماشین‌بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به روش حداکثر احتمال داشته است. سپس، شاخص‌هایی که بیشترین تأثیر را در افزایش صحت طبقه‌بندی داشتند انتخاب و مجدداً عملیات طبقه‌بندی فقط با روش ماشین‌بردار پشتیبان انجام شد و تا حصول بیشترین مقادیر پارامترهای ارزیابی صحت نقشه تکرار شد. نتایج نشان داد از شاخص‌های گیاهی، شاخص LAI با بیشترین تأثیر باعث افزایش ۲/۶۴ درصدی صحت طبقه‌بندی، از شاخص‌های خاک، شاخص‌های BSI و MBI مطلوب‌ترین عملکرد را داشته و به ترتیب باعث افزایش ۱/۹۵ و ۱/۶۴ واحدی صحت طبقه‌بندی شده و از شاخص‌های تلفیقی، LST و ALTIVI به ترتیب موجب افزایش ۲/۷۵ و ۲/۳۵ واحدی صحت طبقه‌بندی شدند. در نهایت فرآیند طبقه‌بندی با استفاده از پنج باند سنجنده OLI (باندهای مرئی+SWIR1+NIR) و شاخص‌های منتخب شامل LAI، BSI، MBI، LST و ALTIVI و الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان انجام و صحت طبقه‌بندی و ضریب کاپا به ترتیب ۸۵/۲۴٪ و ۰/۸۲ محاسبه و منطقه مورد مطالعه به دوازده کلاس کاربری/پوشش اراضی تفکیک شد. در نهایت به‌منظور بهره‌گیری از نقشه کاربری/پوشش اراضی در مدیریت پایدار اراضی توصیه به تهیه این نقشه در دو مرحله شامل انتخاب الگوریتم برتر و در گام بعد استفاده از شاخص‌های طیفی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: حداکثر احتمال، ماشین‌بردار پشتیبان، مدیریت پایدار اراضی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استادیار و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

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

مقدمه

مطالعه الگوی کاربری و پوشش اراضی و کسب اطلاعات درست و به‌روز به دست آمده در قالب نقشه‌ها و داده‌های آماری از اساسی‌ترین اقدامات به‌منظور انجام مطالعات محیطی، طرح‌ریزی‌های مدیریتی در استفاده اراضی برای کشاورزی، جنگل‌داری، مرتعداری و تولید محصولات اقتصادی است (Yadav et al., 2012; Esfandeh et al., 2021; Qian & Zhang, 2022; Yao et al., 2022). در دهه‌های اخیر استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به واسطه قدرت تفکیک مکانی، زمانی و طیفی مناسب به‌عنوان یکی از روش‌های پرکاربرد برای پایش و تهیه نقشه پدیده‌های زمینی مثل کشت‌زارها، پیکره‌های آبی، پوشش طبیعی گیاهی، مناطق مسکونی و غیره شناخته شده‌اند (Radoux et al., 2016). مطالعات متعددی در خصوص استفاده از فن دورسنجی در طبقه‌بندی کاربری/پوشش اراضی صورت گرفته است که از موارد اخیر آن می‌توان به تحقیقات حسینی و همکاران (Nouri et al., 2024) و نوری و همکاران (Hosseini et al., 2020) اشاره نمود. لیکن با توجه پیشرفت‌های فن دورسنجی و قابلیت‌های نرم‌افزاری بایستی بهبود کیفیت و انتخاب بهترین روش‌های تفکیک انواع کاربری/پوشش اراضی به‌منظور دستیابی به مدیریت پایدار اراضی بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد.

همواره در فرآیند پردازش تصاویر رقومی، طبقه‌بندی این داده‌ها یکی از موضوعات مهم و چالش برانگیز بوده و استفاده بهینه از این تصاویر نیازمند انتخاب روش مناسب برای طبقه‌بندی بر مبنای نیازها و موضوعات مورد مطالعه است (Jensen, 2005; Al-doski et al., 2013; Esfandeh et al., 2021). در مطالعه انجام شده توسط یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2011) روش‌های مختلف طبقه‌بندی برای تهیه نقشه کاربری اراضی با استفاده از داده‌های سنجنده ETM+ لندست ۷ به کار رفت و نتایج صحت‌سنجی در نقشه‌های تولیدی نشان داد که بیشترین و کمترین صحت به ترتیب مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان^۱، شبکه عصبی مصنوعی^۲، فاصله ماهالانوبی^۳، حداکثر احتمال^۴، حداقل فاصله از میانگین^۵، نقشه زاویه طیفی^۶، واگرایی اطلاعات طیفی^۷، سطوح موازی^۸ و در نهایت روش کدهای دودویی^۹ است. در مطالعه‌ای دیگر، برای تهیه نقشه کاربری

اراضی در دشت زنجان از بین روش‌های مختلف طبقه‌بندی پیکسل پایه، الگوریتم حداکثر احتمال و حداقل فاصله تا میانگین، نتایج مطلوبی (ضریب کاپا به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۸۵) را ارائه دادند (Saraskanrood et al., 2019). در پژوهش‌های اخیر انجام شده توسط امیری و ناطقی (Amiri & Nateghi, 2023) با استفاده از طبقه‌بندی کننده شی‌گرا و تلفیق داده‌های لندست ۸ و مادیس اقدام به تهیه نقشه پوشش اراضی استان بوشهر شد که صحت کلی و ضریب کاپای به دست آمده در این تحقیق ۹۳/۳۴٪ و ۰/۸۶ گزارش گردید.

دیگر عامل تأثیرگذار در افزایش دقت، صحت و کیفیت نقشه‌های کاربری/پوشش اراضی، استفاده از شاخص‌های طیفی است. در نواحی مختلف با شرایط محیطی متفاوت از نظر اقلیم، پوشش گیاهی، ژئومورفولوژی، خاک‌شناسی، هیدرولوژی، آلودگی و غیره شاخص‌های متنوعی با هدف بارزسازی پدیده‌های زمینی محاسبه و توصیه شده است. روزیومر و می‌های (Rujoiu-Mare & Mihai, 2016) با استفاده از داده‌های سنجنده OLI لندست ۸ و شاخص‌های NDVI، NDWI و NDVI اقدام به تهیه نقشه پوشش اراضی با استفاده از دو روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال و حداقل فاصله از میانگین نمودند. براساس نتایج، روش حداقل فاصله از میانگین در انجام طبقه‌بندی کارایی لازم را نداشته؛ در حالی که نتایج حاصل از روش حداکثر احتمال بسیار رضایت‌بخش (صحت کلی برابر ۹۲/۰۸٪ و ضریب کاپا ۰/۹۰) بوده است. کرولوا و همکاران (Koroleva et al., 2018) نیز رویکردی برای جداسازی خاک لخت با استفاده از فضای طیفی Red-NIR که مبنای اصلی در تعیین نوع خاک است پیشنهاد کردند.

با توجه به آنچه پیش‌تر در خصوص عوامل تأثیرگذار در دقت و کیفیت مطالعات دورسنجی برای تفکیک پدیده‌ها بیان شد؛ هدف اصلی پژوهش حاضر تلاش برای تفکیک حداکثری و نقشه‌برداری دقیق پدیده‌های زمینی مرتبط با کاربری/پوشش اراضی بوده که در این راستا تأثیر استفاده از شاخص‌های طیفی مختلف در بهبود نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و عملکرد برخی الگوریتم‌های طبقه‌بندی نظارت شده مورد بررسی قرار گرفتند.

- 1- Support Vector Machine (SVM)
- 2- Artificial neural network
- 3- Mahalanobis Distance
- 4- Maximum likelihood
- 5- Minimum distance to mean
- 6- Spectral Angle Mapper
- 7- Spectral Information Divergence
- 8- Parallel piped
- 9- Binary Encoding

مواد و روش‌ها

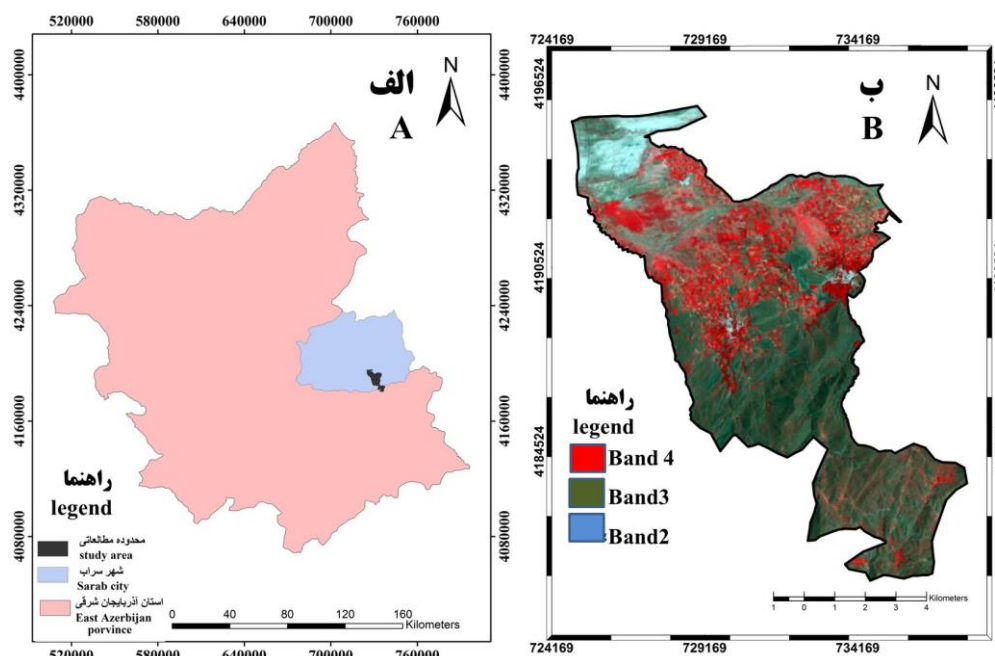
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه بخشی از اراضی شهرستان سراب استان آذربایجان شرقی با مساحتی بالغ بر ۸۱۰۴ هکتار است که در محدوده جغرافیایی ۳۳° ۴۷' تا ۴۲° ۴۷' طول شرقی و ۴۴° ۳۷' تا ۵۲° ۳۷' عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). در این محدوده ارتفاع از سطح دریا در مرتفع‌ترین نقطه ۲۸۱۱ متر و در پست‌ترین نقطه ۱۶۴۱ متر است. بارندگی متوسط سالانه منطقه ۲۸۵ میلی‌متر است و براساس آمار اقلیمی منطقه دارای آب و هوای سرد و نیمه‌خشک است (IRIMO, 2021). همچنین اقلیم خاک‌های منطقه نیز شامل رژیم رطوبتی زیریک و رژیم حرارتی مزیک تا فریجید است (Banaei, 1998). با استناد به روش ارائه شده توسط زینک و همکاران (Zinck, 2016) و طبق مشاهدات میدانی و بررسی تصویر ماهواره‌ای، منطقه مورد مطالعه از دو زمین‌منظر عمده کوهستان و دشت تشکیل شده است. زمین‌منظر کوهستان از لحاظ لندفرم عموماً شامل تپه‌ها و دره‌ها بوده و زمین‌منظر دشت از ناحیه بعد از نقطه شکست شیب شروع شده و در ابتدا شامل پدیمت پوشیده (دشت دامنه‌ای) و مخروط افکنه و آبراهه‌های روی آن است که در ادامه به دشت سیلابی، دشت آبرفتی و اراضی پست و گنبدهای منفرد نمکی منتهی شده است. شکل ۲ مدل رقومی ارتفاع و تصویر رنگی واقعی از محدوده مطالعاتی و نیم‌رخ ارتفاعی منطقه در مسیری به طول ۱۷/۹ کیلومتر را نشان می‌دهد.

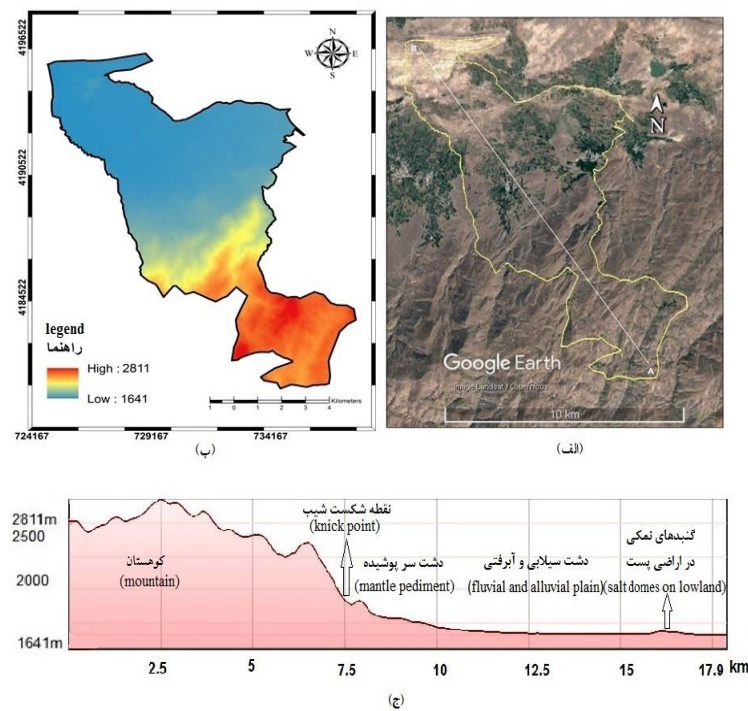
همچنین به استناد بازدیدهای میدانی منطقه مورد مطالعه را می‌توان از نظر کاربری/پوشش اراضی به ۱۳ کلاس به شرح جدول ۱ تقسیم‌بندی کرد.

تشکیل بانک اطلاعاتی و شمای کلی پژوهش

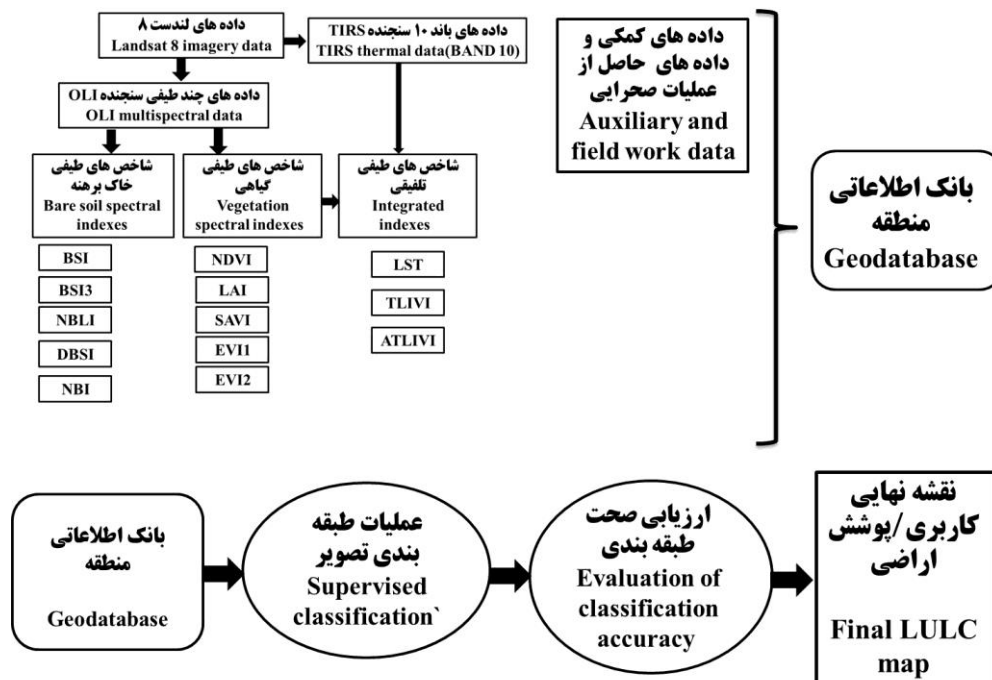
علاوه بر مدل رقومی ارتفاع محدوده مورد مطالعه، داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش مربوط به فریم ۳۴-۱۶۸ لندست ۸ مشتمل بر داده‌های طیفی سنجنده OLI و داده‌های حرارتی سنجنده TIRS و باند پانکروماتیک مربوط به تاریخ ۲۳ ژوئن ۲۰۲۱ بود که به‌صورت رایگان از طریق درگاه اینترنتی (<http://earthexplorer.usgs.gov>) بارگیری شد. انتخاب زمان تصویربرداری با توجه به هدف اصلی پژوهش و متناسب با شرایط فنولوژیکی گونه‌های مرتعی و پوشش‌های گیاهی زراعی و باغی موجود که مستلزم تحقق حداکثر سبزیگی در محدوده مورد مطالعه بود؛ صورت گرفت. سایر اطلاعات نیز شامل اطلاعاتی در مورد نوع کاربری‌های موجود، وضعیت و نوع پوشش گیاهی اراضی مرتعی، زراعی و باغی، عوارض ژئومورفیکی و تا حدودی وضعیت خاک‌های سطح‌الارض منطقه بود (جدول ۱) که طی پیمایش میدانی ضمن ثبت مختصات مکانی با GPS به انجام رسید. در نهایت اطلاعات گردآوری شده در قالب بانک اطلاعاتی به‌صورت فایل‌های رقومی جمع‌بندی و ذخیره‌سازی شد. پس از تهیه بانک اطلاعاتی، نقشه کاربری/پوشش اراضی به شرح روندنمای ارائه شده در شکل ۳ با استفاده از نرم‌افزارهای Arc Map 10.3 و ENVI 5.3 تهیه شد.



شکل ۱- الف) موقعیت محدوده مورد مطالعه در استان آذربایجان شرقی و شهرستان سراب، ب) تصویر رنگی استاندارد کاذب محدوده مورد مطالعه
Figure 1- A) Location of study area in East Azerbaijan province and Sarab county, B) Standard false color composite of study area



شکل ۲- الف) تصویر گوگل ارث از منطقه مورد مطالعه، ب) مدل رقومی ارتفاع منطقه و ج) نیمرخ ارتفاعی منطقه مورد مطالعه
Figure 2- A) Google Earth image from study area, B) Digital Elevation Model (DEM) and, C) Altitudinal transect of the study area



شکل ۳- روند نمای مراحل تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی
Figure 3- Flowchart of the generation of land use/land cover (LULC) maps

جدول ۱- کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه از طریق عملیات میدانی

Table 1- Identified LULC classes in study area through field survey

ردیف Num.	کلاس پوشش/کاربری اراضی LULC classes	اختصار Abbrevia te	نوع پوشش سطح Kind of surface cover	زمین ریخت landform
1	مراعات مناطق مرتفع High land pastures	HLP	مراعات ایرانی تورانی با درصد تاج پوششی ۲۶-۵۰ درصد و گونه غالب گون Iran- Turanian pastures with a canopy percentage of 26-50% and the dominant species is <i>Astragalus</i>	کوهستان و قسمت‌های مرتفع‌تر دشت‌سر دامنه‌ای Mountain and higher part of mantle pediment
2	مراعات علفزار Grasslands	GL	پوشش طبیعی چمن، دارای خاکی غنی از ماده آلی (دارای شرایط مالی سل‌ها) Natural grasslands, with soil rich of organic matter (have mollisols criteria)	کوهستان و دشت‌های آبرفتی پایین دست Mountain and lower part of alluvial plain
3	مراعات چمنزار و علفزارهای تخریب شده و تنزل یافته Degraded grasslands	DGL	چمن زارهای خشکیده با پوشش گیاهی بسیار ضعیف Dried and degraded grasslands with very poor vegetation cover	کوهستان و دشت‌های آبرفتی پایین دست Mountain and lower part of alluvial plain
4	زراعت آبی Irrigated farming	IF	کشت آبی انواع محصولات زراعی عمدتاً سیب زمینی و گندم Irrigated cultivation of various crops, mainly potatoes and wheat	دشت آبرفتی و دشت دامنه‌ای Alluvial plain and pediment
5	زراعت دیم Dry farming	DF	کشت دیم عمدتاً گندم Dry farming, mainly wheat cultivation	دشت آبرفتی و دشت دامنه‌ای Alluvial plain and pediment
6	اراضی آیش Fallow lands	FL	خاک برهنه Bare soil	دشت آبرفتی و دشت منه‌ای Alluvial plain and pediment
7	مسیل رودخانه‌های فصلی و مناطق متأثر از سیلاب Outwash and flood affected areas	O	مسیل رودخانه با تعدد آبراهه‌ها River channel with many waterways	عمدتاً در دشت دامنه‌ای و دشت سیلابی Mainly on pediment and fluvial plain
8	باغ قدیمی و سنتی Traditional garden	TG	انبوه درختان و فاقد هر گونه الگو و نظم در کاشت Lots of trees with no pattern and order in planting	دشت دامنه‌ای Pediment
9	باغ مدرن جدید التاسیس Modern garden	MG	درختان با فاصله و ردیف‌های کاشت منظم؛ مشاهده بازتابش خاک در بین ردیف درختان Trees with regular spacing and planting rows; the reflection of the soil between the rows of trees is observable	دشت دامنه‌ای Pediment
10	گنبد‌های نمکی Salt domes	SD	فاقد پوشش گیاهی و سنگریزه With no vegetation and gravel	اراضی پست Low lands
11	مراعات اراضی پست Low land pastures	LLP	گیاهان شورپسند و خارشتر (Alhagi)، خاک شور و در برخی مناطق لکه‌های سیاه رنگ قلیایی Halophyte vegetation and Alhagi species, salt-affected soils, and in some areas, black spots of alkaline color are observable	اراضی پست Low lands
12	مناطق مسکونی روستایی Residential areas	RA	مناطق مسکونی روستایی Rural residential areas	دشت دامنه‌ای و آبرفتی Pediment and alluvial plain
13	پیکره‌های آبی Water bodies	WB	با مساحت کم بصورت استخرهای آبیاری و پرورش ماهی با بازتاب آب Areas of small irrigation and fish breeding ponds; reflections of water are detectable	دشت دامنه‌ای و آبرفتی Pediment and alluvial plain

جدول ۲- شاخص‌های گیاهی، خاک و تلفیقی استفاده شده در تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی

Table 2- The used vegetation, soil and integrated indexes to generating LULC map

منبع References	شاخص Index	گروه شاخص Index group
Rouse <i>et al.</i> , 1974	NDVI = (NIR-R)/(NIR+R)	شاخص‌های گیاهی Vegetation Indexes
Huete, 1988	SAVI = (NIR-R)/(NIR+R+L)(1+L)	
Beg and Reddy, 2010	LAI = 2.3689*SAVI+0.7877	
Huete <i>et al.</i> , 1997	EVI = G*(NIR-R)/(NIR+C1R+C2B+L)	
Gitelson <i>et al.</i> , 2001	EVI2 = 2.5*(NIR-R)/(NIR+2.4*R+1)	
Diek <i>et al.</i> , 2017	BSI = ((SWIR2+R)-(NIR+B))/((SWIR2+R)+(NIR+B))	شاخص‌های خاک Soil Indexes
Jamalabad and Abkar, 2004	BSI3 = ((SWIR2+R)-(NIR+B))/((SWIR2+R)+(NIR+B))*100+100	
Piyooosh and Ghosh, 2018	MNDSI = (SWIR2+PAN)/(SWIR2-PAN)	
Li <i>et al.</i> , 2017	NBLI = (R-TIR)/(R+TIR)	
Rasoul <i>et al.</i> , 2018	DBSI = ((SWIR1-G)/(SWIR1+G)-(NIR-R)/(NIR+R))	
Nguyen <i>et al.</i> , 2021	MBI = ((SWIR1-SWIR2-NIR)/(SWIR1+SWIR2+NIR))+0.5	شاخص‌های تلفیقی Integrated Indexes
Sinha <i>et al.</i> , 2015	LST = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * Ln(e)))	
Al-doski <i>et al.</i> , 2013	TLVI = (DN L8 (BAND10))-NDVI-LAI/(DN L8 (BAND10))+NDVI+LAI	
Al-doski <i>et al.</i> , 2013	ATLVI = (DN L8 (BAND10))-NDVI-LAI-EVI2/(DN L8 (BAND10))+NDVI+LAI+EVI2	

استخراج شاخص‌های دورسنجی

با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای محدوده مورد مطالعه، شاخص‌های دورسنجی شامل گروه شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص‌های خاک و شاخص‌های تلفیقی طیفی (تلفیق باندهای ماهواره‌ای و شاخص‌های گیاهی) ارائه شده در جدول ۲ مطابق با هدف تحقیق برای بررسی تأثیر به کارگیری آنها در بهبود کارایی نتایج حاصل از طبقه‌بندی تصویر استخراج و در بانک اطلاعاتی ذخیره شدند.

طبقه‌بندی تصاویر

با در نظر گرفتن این مهم که روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال یک روش پارامتریک است. لذا پیکسل‌های منتخب برای انجام طبقه‌بندی بایستی دارای توزیع نرمال از نظر آماری باشند. برای نیل به توزیع نرمال در هر کلاس، تعداد پیکسل‌های منتخب در هر کلاس بایستی بین $10n$ تا $100n$ باشد که در اینجا n نماینده کلاس‌های کاربری و پوشش اراضی شناسایی شده است. به منظور تکمیل داده‌های جمع‌آوری شده طی عملیات میدانی و ایجاد کلاس‌های تعلیمی و کلاس‌های مورد نیاز برای ارزیابی صحت طبقه‌بندی (نقاط شاهد)، نتایج عملیات میدانی با تصاویر هم‌زمان و با دقت مکانی بالای گوگل ارث تلفیق گردید و در نهایت با استفاده از نرم‌افزار Arc Map 10.3 از مجموع کل نمونه‌های گرفته شده (۴۷۷۴) نمونه در قالب ۱۳ کلاس (به نسبت تقریبی ۷۰ درصد به عنوان نمونه‌های تعلیمی و ۳۰ درصد به عنوان نمونه‌های شاهد انتخاب و در فرمت نرم افزار 5.3 ENVI ذخیره شد. قبل از به کار بردن نمونه‌های تعلیمی برای طبقه‌بندی تصویر و به منظور اطمینان از انتخاب مناسب این نمونه‌ها میزان تفکیک‌پذیری کلاس‌های تعلیمی با استفاده از روش محاسبه فاصله جفریس-ماتوسیتا^۱ مورد بررسی قرار گرفت (Amirantekabi *et al.*, 2017). همچنین به منظور انتخاب ترکیب مناسب باندی برای

انجام طبقه‌بندی، برخی پارامترهای آماری داده‌های ورودی شامل ضریب همبستگی، واریانس و کوواریانس محاسبه شد. در نهایت برای بررسی میزان تأثیر استفاده از شاخص‌های منتخب (مطابق جدول ۱)، عملیات طبقه‌بندی در گام نخست با استفاده از سه باند محدوده طیف مرئی (۰/۴۸۲۶ الی ۰/۶۵۴۶ میکرومتر) به همراه باندهای NIR و SWIR1 انجام و در مراحل بعد شاخص‌های منتخب، مدل رقومی ارتفاع منطقه و باند ۱۰ سنجنده حرارتی TIRS به الگوریتم‌های طبقه‌بندی حداکثر احتمال و روش یادگیری ماشین‌بردار پشتیبان مورد استفاده در این تحقیق وارد شدند.

در نهایت صحت‌سنجی طبقه‌بندی‌های صورت گرفته با استفاده از پارامترهای صحت کل، دقت کاربر و ضریب کاپا برای ترکیبات مختلف از شاخص‌ها محاسبه و ترکیباتی که دارای صحت کمتری بودند حذف و برای دستیابی به بیشترین مقدار صحت، طبقه‌بندی با تلفیق داده‌هایی که بیشترین صحت کلی و ضریب کاپا را در مرحله قبلی نشان داده بودند؛ تکرار شد. پس از نهایی شدن نقشه طبقه‌بندی در مرحله پس‌پردازش، تصحیحات کارتوگرافی و ایجاد خروجی، گزارشی از مساحت کاربری/پوشش‌های اراضی موجود در منطقه اخذ شد.

نتایج و بحث

بررسی مقادیر تفکیک‌پذیری کلاس‌های مختلف کاربری/پوشش اراضی به روش جفریس-ماتوسیتا (جدول ۳)، نشان داد که مقادیر تفکیک‌پذیری محاسبه شده برای کلاس WB با کلاس‌های SD، RA و HLP قابل قبول (نزدیک به عدد ۲) بوده، ولی با سایر کلاس‌ها مقادیر بسیار کمی را ارائه داده است و از سوی دیگر با توجه به اینکه مساحت این کلاس در مقایسه با سایر کلاس‌ها ناچیز بود؛

جدول ۳- نتایج تفکیک‌پذیری کلاس‌های تعلیمی به روش جفریس- ماتوسیتا

Table 3- The results of the separability of training classes by the Jeffries-Matusita method

کلاس‌های تعلیمی Training classes	TG	WB	SD	RA	O	MG	LLP	IF	HLP	GL	FL	DGL	DF
TG	0												
WB	1.26	0											
SD	1.99	1.99	0										
RA	1.98	1.71	1.99	0									
O	1.96	1.46	1.99	1.72	0								
MG	0.90	1.04	1.99	1.96	1.89	0							
LLP	1.99	1.81	1.99	1.94	1.78	1.99	0						
IF	1.23	1.05	1.99	1.96	1.92	0.88	1.99	0					
HLP	1.98	1.61	1.99	1.93	1.80	1.85	1.99	1.84	0				
GL	1.54	0.86	1.99	1.98	1.91	1.35	1.99	1.03	1.92	0			
FL	1.72	1.26	1.99	1.91	1.73	1.45	1.98	1.18	1.84	1.03	0		
DGL	1.93	1.36	1.99	1.95	1.96	1.65	1.99	1.65	1.62	1.69	1.68	0	
DF	1.59	1.21	1.99	1.92	1.85	1.24	1.98	1.13	1.91	1.18	0.54	1.63	0

نتایج اعتبارسنجی برای طبقه‌بندی تصاویر نشان داد صحت کلی و ضریب کاپای محاسبه شده برای ترکیب باندی متشکل از ۵ باند سنجنده OLI (بدون دخالت شاخص‌های کمکی) در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۷۶/۶٪ و ۷۲/۰٪ بود (جدول ۴). دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2022) نیز در تلاش برای ارزیابی تغییرات کاربری اراضی با استفاده از داده‌های لندست ۸ و هنگام استفاده از شاخص‌های کمکی به نتایج تقریباً مشابهی در اعتبارسنجی نقشه کاربری اراضی دست یافتند. بنابه تحقیقات این محققان مقدار صحت کلی و ضریب کاپا به ترتیب ۷۶/۷۱٪ و ۷۱/۰٪ می‌باشد.

محیط‌های مختلف ویژگی‌های متغیر و پیچیده‌ای دارند که هنگام استفاده از شاخص‌های کمکی در تشخیص آنها وضعیت و شرایط محیطی از طریق شاخص‌های مرتبط با هریک در نظر گرفته شوند. در تفکیک کارایی شاخص‌های مختلف، نتایج مندرج در جدول ۴ نشان داد که از شاخص‌های گیاهی وارد شده به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان شاخص LAI، با بیشترین تأثیر باعث افزایش ۶۴/۲ درصدی صحت طبقه‌بندی شده است. بررسی‌های امیری (Amiri, 2023) نیز نشان داده است که شاخص‌های گیاهی ساده با ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک به‌طور قابل توجهی حساسیت تشخیص پوشش گیاهی سبز را بهبود می‌بخشند. همچنین از شاخص‌های خاک وارد شده به الگوریتم ماشین بردار پشتیبان، شاخص‌های BSI و MBI مطلوب‌ترین عملکرد را داشته و به ترتیب باعث افزایش ۹۵/۱ و ۶۴/۱ درصدی صحت طبقه‌بندی شده و شاخص‌های LST و ALTIVI از شاخص‌های تلفیقی بودند که به ترتیب باعث افزایش ۷۵/۲ و ۳۵/۲ درصدی صحت طبقه‌بندی شدند (جدول ۴). لازم به ذکر است وارد کردن مدل رقومی ارتفاع تأثیر چندانی در افزایش صحت طبقه‌بندی در الگوریتم ماشین بردار پشتیبان نداشت و حتی استفاده از آن در روش حداکثر احتمال، باعث کاهش صحت طبقه‌بندی شد (جدول ۴). طبق نتایج نیازی و همکاران (Niazi et al., 2011) دلیل احتمالی

لذا در قالب فرض مقرر شد این کلاس در کلاس‌های مجاور ادغام شود. نتایج حاصل از طبقه‌بندی نیز نشان داد با حذف کلاس WB مقدار صحت کلی و ضریب کاپای محاسبه شده در روش حداکثر احتمال به میزان ۵ تا ۸ درصد (در ترکیبات باندی مختلف) و در روش ماشین بردار پشتیبان به مقدار حداکثر ۳/۱ درصد افزایش یافت. این موضوع وابستگی بیشتر روش حداکثر احتمال به ویژگی‌های آماری و نرمال بودن توزیع داده‌ها را نشان داد. الگوریتم‌های سنتی طبقه‌بندی مانند روش حداکثر احتمال به دلیل انعطاف‌پذیری پایین و وابستگی به مدل آمار گوسی نمی‌توانند نتایج بهینه‌ای را در صورت نرمال نبودن داده‌های تعلیمی فراهم آورند. در حالی که دلیل موفقیت الگوریتم‌های ناپارامتریک در سنجش از دور امکان تلفیق داده‌هایی با منابع مختلف است (Niazi et al., 2011).

مطابق با مراحل تحقیق، نتایج محاسبه صحت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا (جدول ۴) پس از طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از دو الگوریتم حداکثر احتمال و ماشین بردار پشتیبان و با وارد کردن پنج باند طیفی سنجنده OLI و افزودن یک به یک شاخص‌های منتخب نشان داد که در تمامی ترکیبات باندی به کار گرفته شده برای انجام طبقه‌بندی، روش ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به روش حداکثر احتمال دارد. این برتری به نحوی است که عملکرد الگوریتم ماشین بردار پشتیبان از لحاظ صحت کلی محاسبه شده در ترکیبات مختلف باندی بین ۳ تا ۸ درصد و ضریب کاپا بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۸ نسبت به روش حداکثر احتمال بهتر بوده است. یافته‌های حاصل از تحقیقات حسنی مقدم و همکاران (Hasani Moghadam et al., 2018) و اجاقی و همکاران (Ojaghi et al., 2015) نیز هم‌راستا با تحقیق حاضر مؤید عملکرد بهتر الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در مقایسه با روش حداکثر احتمال در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای برای تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی بوده است. در نتیجه الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای ادامه تحقیق مورد بررسی قرار گرفت.

عملیات طبقه‌بندی با استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان را می‌توان با ترکیب باندی حاصل از پنج باند طیفی سنجنده OLI و شاخص‌های LAI، BSI، MBI، ATLIVI و LST برای نیل به بالاترین صحت طبقه‌بندی انجام داد، چرا که باندها و شاخص‌های منتخب فوق‌الذکر دارای بیشترین اطلاعات غیرمشتک از منطقه مورد مطالعه هستند.

در نهایت نتایج حاصل از انجام طبقه‌بندی نشان داد با وارد کردن هم‌زمان پنج شاخص LST، BSI، MBI، ATLIVI و LAI (شکل ۴) به همراه پنج باند طیفی سنجنده OLI در الگوریتم طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان، مقدار صحت کلی طبقه‌بندی به ۸۵/۲۴٪ و ضریب کاپا به ۰/۸۲ بهبود یافت که با توجه به معیارهای تقسیم‌بندی، ضریب کاپای بین ۰/۸۱ تا یک بیان‌گر عملکرد بسیار عالی طبقه‌بندی است (Ghoodjani, 2016).

این موضوع ماهیت متفاوت داده‌های رقومی ارتفاع با سایر داده‌های ورودی و توانایی کم روش‌های طبقه‌بندی مبتنی بر روش‌های آمار پارامتریک در تلفیق داده‌هایی با منابع مختلف است.

جدول ۵ نتایج ماتریس همبستگی به‌منظور انتخاب بهترین گزینه از تلفیق بلندها و شاخص‌های طیفی منتخب را نشان می‌دهد که بیشترین افزایش در میزان صحت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا را ایجاد کرده‌اند، نشان داد، مطابق با نتایج، اکثر شاخص‌های مذکور دارای ضریب همبستگی نسبتاً پایینی با باندهای طیفی بودند و تنها باند مادون قرمز نزدیک با شاخص‌های BSI و LAI همبستگی بالا (۰/۹۷ و ۰/۹۰-) و با شاخص‌های ATLIVI و MBI همبستگی منفی متوسطی (۰/۷۷-) را نشان داد. همچنین بررسی ضریب همبستگی باند مادون قرمز نزدیک با سایر باندهای طیفی سنجنده OLI همبستگی بسیار کمی را نشان داد. به‌نظر می‌رسد نتایج بررسی ضرایب همبستگی نیز تأیید کننده این موضوع باشند که ادامه انجام

جدول ۴- صحت کلی طبقه‌بندی و ضریب کاپا برای ترکیبات مختلف باندی با استفاده از الگوریتم‌های حداکثر احتمال و ماشین بردار پشتیبان
Table 4- Overall accuracy and Kappa coefficient for different band compositions using Maximum likelihood and Support Vector Machine (SVM)

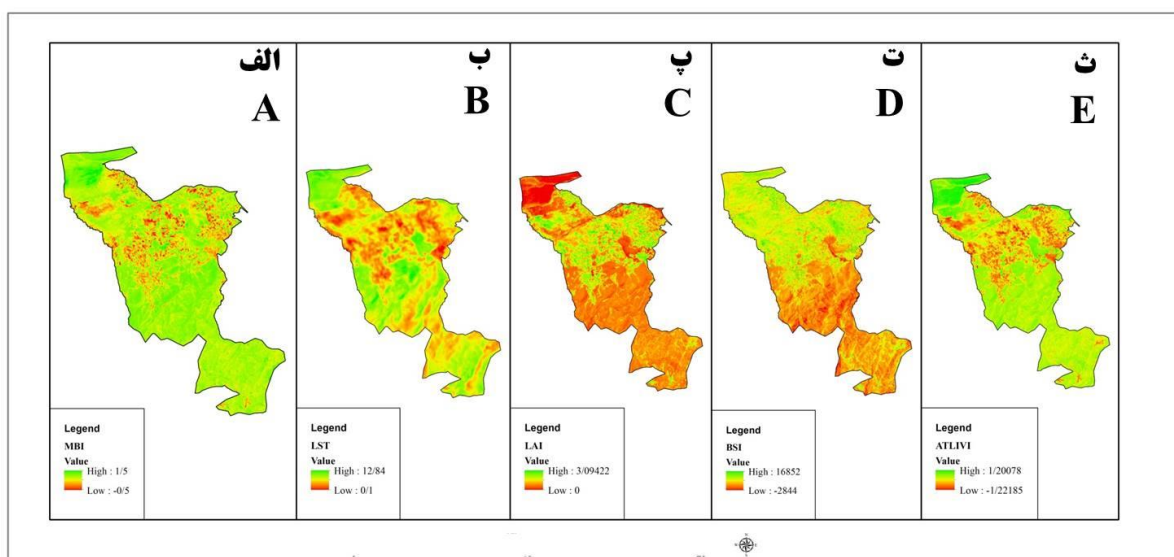
ترکیب باندی Band composition	صحت کلی (حداکثر احتمال) Overall accuracy (maximum likelihood)	ضریب کاپا (حداکثر احتمال) Kappa coefficient (maximum likelihood)	صحت کلی (SVM) Overall accuracy (SVM)	ضریب کاپا (SVM) Kappa coefficient (SVM)	گروه شاخص‌ها Index group
RGB+NIR+SWIR	70.36	0.66	76.60	0.72	ترکیب باندی ۵ باند سنجنده OLI Band composition using 5 OLI bands
RGB+NIR+SWIR + EVI	70.72	0.68	77.76	0.73	شاخص‌های گیاهی Vegetation indexes
RGB+NIR+SWIR + EVI2	72.12	0.66	77.54	0.73	
RGB+NIR+SWIR + LAI	73.61	0.70	79.24*	0.75*	
RGB+NIR+SWIR + SAVI	71.80	0.67	77.54	0.73	
RGB+NIR+SWIR + NDVI	71.69	0.67	78.10	0.74	
RGB+NIR+SWIR + BSI3	73.90	0.69	77.52	0.73	شاخص‌های خاک برهنه Bare soil indexes
RGB+NIR+SWIR + BSI	74.66	0.69	78.55*	0.75*	
RGB+NIR+SWIR + NBLI	72.53	0.68	77.56	0.73	
RGB+NIR+SWIR + DBSI	72.00	0.69	77.54	0.73	
RGB+NIR+SWIR + MBI	74.55	0.71	78.24*	0.74*	
RGB+NIR+SWIR + MNSDI	73.61	0.69	77.58	0.73	شاخص‌های تلفیقی Integrated indexes
RGB+NIR+SWIR + LST	76.40	0.74	79.35*	0.75*	
RGB+NIR+SWIR + ATLIVI	73.91	0.69	78.95*	0.74*	
RGB+NIR+SWIR + TLIVI	70.15	0.65	78.00	0.74	
RGB+NIR+SWIR + TIR	72.21	0.70	77.57	0.74	
RGB+NIR+SWIR + DEM	68.70	0.64	76.73	0.72	مدل رقومی ارتفاع Digital elevation model

* شاخص‌هایی که با بیشترین تأثیر موجب بهبود صحت طبقه‌بندی شدند.

جدول ۵- ماتریس همبستگی پنج باند طیفی سنجنده OLI با شاخص‌های دارای بیشترین کارایی در افزایش صحت کلی و ضریب کاپا

Table 5- Correlation coefficient matrix related to five spectral bands of OLI sensor and indices that had the most efficiency in increasing overall accuracy and kappa coefficient

R ²	Blue	Green	Red	NIR	SWIR1	LST	ATLIVI	BSI	LAI	MBI
Blue	1.00									
Green	0.95	1.00								
Red	0.91	0.90	1.00							
NIR	-0.40	-0.20	-0.51	1.00						
SWIR1	0.08	0.24	0.14	0.50	1.00					
LST	0.18	0.13	0.23	-0.30	-0.09	1.00				
ATLIVI	0.53	0.40	0.62	-0.77	-0.27	0.74	1.00			
BSI	0.49	0.35	0.66	-0.90	-0.12	0.31	0.76	1.00		
LAI	-0.57	-0.40	-0.70	0.97	0.36	-0.32	-0.81	-0.94	1.00	
MBI	0.39	0.28	0.57	-0.77	0.12	0.26	0.64	0.93	-0.80	1.00



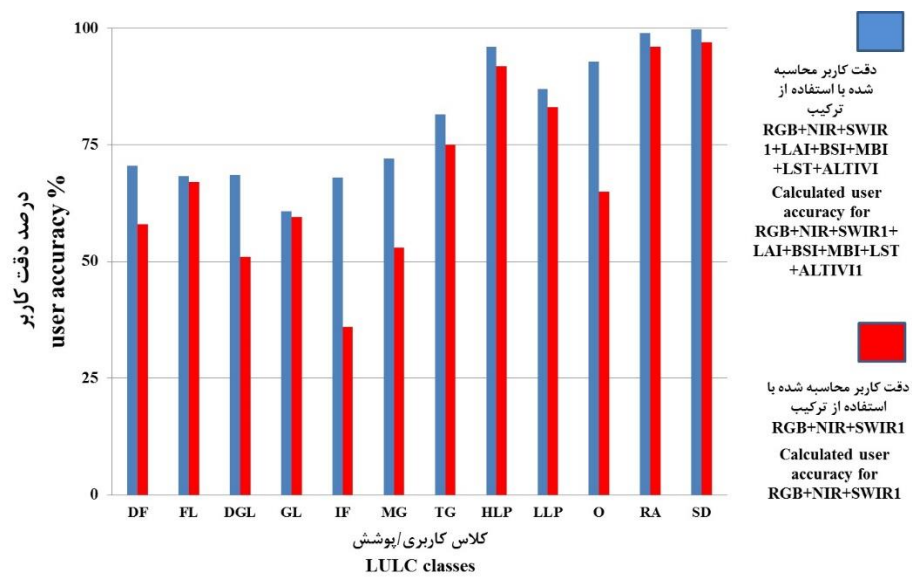
شکل ۴- شاخص‌های منتخب جهت بهبود دقت طبقه‌بندی (الف) MBI (ب) LST (پ) LAI (ت) BSI (ث) ATLIVI

Figure 4- Selected indices for improving classification accuracy A) MBI, B) LST, C) LAI, D) BSI, E) ATLIVI

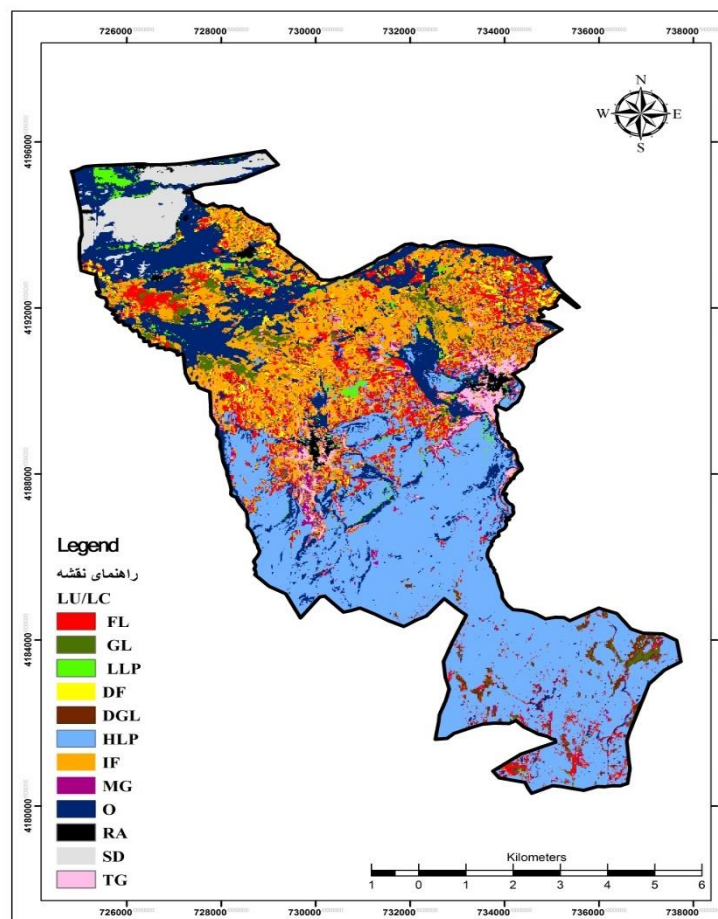
به‌ترتیب مربوط به کلاس GL و سپس کلاس‌های IF، DGL و FL بود؛ که چنین وضعیت رتبه‌بندی برای این کلاس‌ها ممکن است به‌دلیل تداخلات بازتابشی پوشش‌های گیاهی متفاوت مستقر در کلاس‌های GL و IF و اثرات مشترک بازتابش خاک در کلاس‌های DGL و FL باشد. در مجموع می‌توان بیان نمود که با وجود اثر تداخلات طیفی در بین کلاس‌های مختلف، استفاده از شاخص‌های کمکی توانسته است صحت طبقه‌بندی به‌خصوص در مورد کلاس‌های DF، DGL، MG، O و IF را به‌ترتیب به میزان ۱۱/۶۲، ۱۸/۵۷، ۲۰/۰۶، ۲۹/۳۹ و ۳۳/۱۹ درصد بهبود بخشد (شکل ۴).

مطابق با یافته‌های این تحقیق کارایی شاخص‌های پیشنهادی فوق در مطالعات متعدد نیز گزارش شده است (Jmalabd & Akbar, 2004; Al-doski et al., 2013; Sinha et al., 2015; Nguyen et al., 2021). همچنین بررسی‌های بیشتر نشان داد که حذف هر یک از شاخص‌ها و باندهای طیفی ده‌گانه فوق باعث کاهش صحت طبقه‌بندی گردیده است.

نتایج حاصل از تشکیل ماتریس درهمی^۱ در محاسبه صحت طبقه‌بندی (دقت کاربر) برای کلاس‌های شناسایی شده در شکل ۶ آورده شده است. بر این اساس، بیشترین صحت طبقه‌بندی به‌ترتیب مربوط به کلاس‌های SD، RA، HLP و O بود. این وضعیت رتبه‌بندی ممکن است به‌دلیل ویژگی‌های بازتابش منحصر به فرد و تقریباً خالص این کلاس‌ها باشد که باعث شده الگوریتم طبقه‌بندی کننده عملکرد مطلوبی ارائه بدهد. کمترین صحت محاسبه شده نیز



شکل ۵- مقایسه مقدار بهبود درصد صحت طبقه‌بندی (دقت کاربر) برای هر یک از کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی
Figure 5- Comparing the amount of enhancing in classification accuracy (user accuracy) for each LULC classes



شکل ۶- نقشه نهایی طبقه‌بندی کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی در منطقه مورد مطالعه
Figure 6- Final classification map of LULC classes in study area

جدول ۶- مساحت کلاس‌های کاربری/پوشش اراضی شناسایی شده در منطقه مورد مطالعه

Table 6- calculated area of identified LULC classes in study area

کاربری/پوشش اراضی LULC	مساحت/Area	
	هکتار/ha	%
SD	334.80	4.13
LLP	101.79	1.26
DF	260.05	3.21
DGL	118.39	1.46
FL	682.20	8.42
GL	230.15	2.84
HLP	3173.31	39.16
IF	1301.40	16.06
MG	238.95	2.95
O	1419.42	17.51
RA	68.87	0.85
TG	175.09	2.16

کرده است. همچنین مشخص شد از انواع شاخص‌های گیاهی، LAI؛ از میان شاخص‌های خاک، BSI و MBI و از بین شاخص‌های تلفیقی، LST و ATLVI بیشترین تأثیر را در بهبود صحت کلی و ضریب کاپا در نقشه طبقه‌بندی داشتند. بررسی‌های بیشتر نشان داد با وجود تداخلات و همپوشانی‌هایی که اثر طیفی پوشش‌های گیاهی مستقر در کلاس‌های مختلف داشتند؛ استفاده از این داده‌ها توانسته است تا حدود زیادی در تفکیک کلاس‌های دارای پوشش گیاهی متفاوت موفق عمل کند. از این رو در تهیه نقشه کاربری/پوشش اراضی و بهره‌گیری از آن در مدیریت پایدار اراضی می‌توان توصیه نمود تا این نقشه‌ها در دو مرحله شامل گزینش الگوریتم طبقه‌بندی برتر و سپس با استفاده از شاخص‌های طیفی تهیه کرد. همچنین در راستای ارتقای تحقیق حاضر، با توجه به محدودیت‌های انجام مدل‌سازی در نرم‌افزار ENVI پیشنهاد می‌گردد که اثربخشی سایر مدل‌ها برای انجام طبقه‌بندی در موتور پردازش مجازی گوگل (گوگل ارث انجین) یا نرم‌افزارهای تخصصی‌تر مانند R نیز مورد بررسی قرار گیرد.

در نهایت نقشه حاصل از طبقه‌بندی با استفاده از روش طبقه‌بندی ماشین‌بردار پشتیبان به عنوان الگوریتم برتر با استفاده از شاخص‌های طیفی مؤثر در افزایش کارایی صحت طبقه‌بندی در شکل ۷ نمایش داده شده است. همچنین براساس طبقه‌بندی انجام شده مساحت و درصد هر یک از کاربری‌ها و پوشش‌های اراضی در جدول ۶ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

منطقه مورد مطالعه شامل کاربری‌ها و پوشش‌های اراضی متنوعی بود در این تحقیق سعی شد با استفاده از داده‌های لندست ۸ و شاخص‌های طیفی معرفی شده پیشین، نقشه‌برداری دقیقی از کاربری‌ها و پوشش‌های اراضی انجام شود. مقایسه نتایج طبقه‌بندی با استفاده از دو الگوریتم ماشین‌بردار پشتیبان و حداکثر احتمال نشان داد که استفاده از روش یادگیری ماشین‌بردار پشتیبان با وجود نیاز به زمان طولانی‌تر برای اجرا، نتایج بهتری نسبت به روش حداکثر احتمال ارائه

References

1. Al-doski, J., Mansori Sh.B., & Shafri, H.Z.M. (2013). Image classification in remote sensing. *Journal of Environment and Earth Science*, 3(10), 141-47. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/540/1/012022>
2. Amirantekabi, S., Javan, F., & Hasani Moghaddam, H. (2017). Detection of land use changes and its influencing factors using Artificial Neural Network (Case study: Talesh County). *Journal of GIS & RS Application in Planning*, 8(3), 1-11. (In Persian with English abstract)
3. Amiri, F. (2023). A review of remote sensing vegetation indices in the land cover assessment. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 297-318. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22098/MMWS.2023.12207.1212>
4. Amiri, F., & Nateghi, S. (2023). Lands cover classification of Bushehr Province using landsat-8 and MODIS images. *Water and Soil Management and Modelling*, 3(2), 143-156. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11372.1124>
5. Beg, A.A.F., & Reddy, Y.S. (2010). Estimation of urban heat island using Landsat ETM+ imagery at Chennai city – a case study. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 3(3), 332-340.
6. Banaei, M.H. (1998). Soil Moisture and Temperature Regime Map of Iran. Soil and Water Research Institute, Ministry of Agriculture, Iran.
7. Dehghani, T., Ahmadpari, H., & Amini, A. (2022). Assessment of land use changes using multispectral satellite images and artificial neural network. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 18-35. (In Persian with

- English abstract). <https://doi.org/10.22098/mmws.2022.11279.1114>
8. Diek, S., Fornallaz, F., Schaepman, M.E., & De Jong, R. (2017). Bare pixel composite for agricultural areas using landsat time series. *Remote Sensing*, 9(12), 1245. <https://doi.org/10.3390/rs9121245>
 9. Esfandeh, S., Danehkar, A., Salmanmahiny, A., Sadeghi, S.M.M., & Marcu, M.V. (2021). Climate change risk of urban growth and land use/land cover conversion: An in-depth review of the recent research in Iran. *Sustainability*, 14(1), 338. <https://doi.org/10.3390/su14010338>
 10. Ghoojani, A. (2016). *Advanced statistical methods and applications*. Jameh Negar Publication. (In Persian)
 11. Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., & Chivkunova, O.B. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, 74(1), 38-45.
 12. Hasani Moghaddam, H., Adli Atiq, R., Gholami, J., Abasi Ghadim, A., & Zeaiean Firouz Abadi, P. (2018). *Performance analysis of support vector machine, neural network and maximum likelihood in land use/cover mapping and GIS (A Case Study: Namin County)*. P.1-13. In 2nd International Conference on New Horizons in the Engineering Science, 9 August 2018. Yildiz Technical University, Istanbul, Turkey.
 13. Hosseini, S.B., Saremi, A., Noori Gheydari, M.H., Sedghi, H., & Firoozfar, A.R. (2020). Land use classification and determining the pattern of changes for 2014-2017, using OLI sensor's data. *Journal of Water and Soil*, 34(1), 55-71. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v34i2.74878>
 14. Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
 15. Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K., & van Leeuwen, W.J.D. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing Environment*, 59, 440-451.
 16. IRMO. (2021). Country Climate Analysis. In: Islamic Republic of Iran Meteorological Organization, Sarab center. Data sheet.
 17. Jamalabad, M.S., & Abkar, A.A. (2004). *Forest canopy density monitoring, using satellite images*. P.1-6. In XXth Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 12-23 July 2004. ISPRS Congress: Istanbul, Turkey.
 18. Jensen, J. (2005). *Introductory Digital Image Processing*. Prentice Hall.
 19. Koroleva, P.V., Rukhovich, D.I., Rukhovich, A.D., Rukhovich, D.D., Kulyanitsa, A.L., Trubnikov, A.V., Kalinina, N.V., & Simakova, M.S. (2018). Characterization of soil types and subtypes in n-dimensional space of multitemporal (empirical) soil line. *Eurasian Soil Science*, 51(9), 1021-33. <https://doi.org/10.1134/S1064229318090065>
 20. Li, H., Wang, C., Zhong, C., Su, A., Xiong, C., Wang, J., & Liu, J. (2017). Mapping urban bare land automatically from landsat imagery with a simple index. *Remote Sensing*, 9, 700. <https://doi.org/10.3390/rs9030249>
 21. Nguyen, C.T., Chidhaisong, A., Diem, P.K., & Huo, L. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow-period in Southeast Asia using landsat 8. *Land*, 10(3), 231. <https://doi.org/10.3390/land10030231>
 22. Niazi, Y., Ekhtesasi, M.R., Maleki Nejad, H., Morshedi, J., & Hoseyni, S.Z. (2011). Comparison between two classification methods of maximum likelihood and artificial neural network for providing land use maps, Case study: Ilam dam area. *Geography and Development*, 8(20), 119-132. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.633>
 23. Nouri, A., Omidvar, J., Modaresi, F., Davari, K., Nouri, S., & Asadi, A. (2024). Estimating the changes in the agricultural lands using satellite images, Case study: Fariman dam downstream basin. *Journal of Water and Soil*, 37(6), 829-840. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83163.1301>
 24. Ojaghi, S., Ebadi, H., & Ahmadi, F. (2015). Using artificial neural network for classification of high resolution remotely sensed images and assessment of its performance compared with statistical methods. *American Journal of Engineering, Technology and Society*, 2(1), 1-8.
 25. Piyoosh, A.K., & Ghosh, S.K. (2018). Development of a modified bare soil and urban index for landsat 8 satellite data. *Geocarto International*, 33(4), 423-442. <https://doi.org/10.1080/10106049.2016.1273401>
 26. Qian, X., & Zhang, L. (2022). An integration method to improve the quality of global land cover. *Advances in Space Research*, 69(3), 1427-38. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.11.002>
 27. Radoux, J., Chomé, G., Jacques, D.C., Waldner, F., Bellemans, N., Matton, N., & Defourny, P. (2016). Sentinel-2's potential for sub-pixel landscape feature detection. *Remote Sensing*, 8(6), 488. <https://doi.org/10.3390/rs8060488>
 28. Rasul, A., Balzter, H., Ibrahim, G.R.F., Hameed, H.M., Wheeler, J., Adamu, B., Ibrahim, S., & Najmaddin, P.M. (2018). Applying built-up and bare-soil indices from landsat 8 to cities in dry climates. *Land*, 7, 81. <https://doi.org/10.3390/land7030081>
 29. Rouse, J.J., Haas, R.H., Deering, D., Schell, J., & Harlan, J.C. (1974). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*. NASA Special Publication 351, 309.
 30. Rujoiu-Mare, M.R., & Mihai, B.A. (2016). Mapping land cover using remote sensing data and GIS techniques: A case study of Prahova Subcarpathians. *Procedia Environmental Sciences*, 32, 244-55. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.029>
 31. Saraskanrood, S., Khodabandelo, B., Naseri, A., & Moradi, A. (2019). Extracting land use map based on a

- comparison between pixel-based and object-oriented classification methods, Case study: Zanjan city. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data*, 28(110), 195-208. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.36623>
32. Sinha, S., Sharma, L.K., & Nathawat, M.S. (2015). Improved land-use/land cover classification of semi-arid deciduous forest landscape using thermal remote sensing. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 217-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.09.005>
33. Yadav, P., Kapoor, M., & Sarma, K. (2012). Land use land cover mapping, change detection and conflict analysis of Nagzira-Navegaon corridor, central India using geospatial technology. *International Journal of Remote Sensing and GIS*, 1(2), 90-98.
34. Yao, Y., Yan, X., Luo, P., Liang, Y., Ren, Sh., Hu, Y., Han, J., & Guan, Q. (2022). Classifying land-use patterns by integrating time-series electricity data and high-spatial resolution remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106(102664), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102664>
35. Yousefi, S., Tazeh, M., Mirzaee, S., Moradi, H., & Tavangar, S. (2011). Comparison of different classification algorithms in satellite imagery to produce land. *Journal of Applied RS & GIS Techniques in Natural Resource Science*, 2(2), 15-24. (In Persian with English abstract)
36. Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., & Del Valle, H.F. (2016). *Geopedology (An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies)*. Springer Cham.

Effect of Biochar and Activated Carbon from Organic Waste on the Immobilization of Heavy Metals (Pb, Zn, Cd) and Corn Plant Growth in Contaminated Soil

M. Malehmir Chegini^{1*}, A. Golchin²

1 and 2- M.Sc. Graduate and Professor, Departmentt. of Soil Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mohamadmc71@gmail.com)

Received: 12-08-2024	How to cite this article:
Revised: 14-10-2024	Malehmir Chegini, M., & Golchin, A. (2024). Effect of biochar and activated carbon from organic waste on the immobilization of heavy metals (Pb, Zn, Cd) and corn plant growth in contaminated soil. <i>Journal of Water and Soil</i> , 38(5), 607-627. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89325.1426
Accepted: 03-11-2024	
Available Online: 03-11-2024	

Introduction

Soil contamination with heavy metals significantly threatens both environmental and human health. Anthropogenic activities, including chemical fertilizers and pesticides, industrial processes, wastewater disposal, and mining, contribute to the accumulation of heavy metals in soil. Plants can then taken up these contaminants and enter the food chain, causing various health problems. Soil amendments such as biochar and activated carbon offer a promising strategy for reducing the mobility and bioavailability of heavy metals in soil. This study investigated the effectiveness of biochar and activated carbon derived from organic waste materials (wheat straw, walnut shells, and almond shells) in immobilizing lead (Pb), zinc (Zn), and cadmium (Cd) and promoting corn (*Zea mays*. L.) growth in a greenhouse setting using contaminated soil.

Materials and Methods

Three types of organic waste wheat straw, walnut shells and almond shells were pyrolyzed at two temperatures (300 °C and 500 °C) under oxygen-free conditions for two hours to produce six types of biochar. The resulting biochars were then activated with phosphoric acid at their respective production temperatures, yielding six types of activated carbon. These organic waste materials, biochar, and activated carbons were added to soil contaminated with lead, zinc and cadmium at four application rates (0, 2.5, 5, and 10% by weight) in triplicate, 4.5 Kg Pot⁻¹. The pots were incubated for one month under controlled temperature and humidity to achieve a relative equilibrium. Following incubation, the concentration of available heavy metals in the treated and control soils was measured. Corn was then planted in the pots, and at the end of the growth period, plant growth parameters (dry weight of shoots and roots) and heavy metal concentrations in plant tissues were determined. The data were analyzed using a completely randomized factorial design, and treatment means were compared to each other and the control.

Results and Discussion

Increasing pyrolysis temperature resulted in increased biochar pH, electrical conductivity (EC), and ash content, while the percentage of organic carbon, C/N ratio, and cation exchange capacity (CEC) decreased. Activation with phosphoric acid lowered the pH, ash content, EC, and organic carbon content of the biochars, while increasing their CEC. Amending the soil with biochar significantly increased soil pH and EC, whereas activated carbon amendments decreased these parameters. All amendments (organic waste, biochar, and activated carbon) significantly reduced the concentration of available heavy metals in the soil. Activated carbon had the



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89325.1426>

greatest effect on immobilization, while organic waste had the least. The lowest concentrations of lead, cadmium, and zinc extractable with DTPA were observed with the 500°C activated carbon derived from wheat straw at a 10% application rate, with values of 1.6, 4.5, and 464 mg kg⁻¹ soil, respectively, representing reductions of 99.46%, 83.67%, and 63.96% compared to the control treatment. This treatment also resulted in the lowest heavy metal concentrations in both the aerial parts and roots of the corn plants. Specifically, the lowest concentrations of lead, zinc, and cadmium in the aerial parts were 71.67, 490.67, and 1.67 mg kg⁻¹ dry weight, respectively, while in the roots, they were 206, 1095, and 20 mg kg⁻¹ dry weight, respectively. The highest dry weights of the aerial parts and roots were also observed with this treatment and a 5% application rate, with values of 5.76 and 1.84 grams per pot, respectively. The lowest concentration of heavy metals in corn tissues was observed in treatments with activated carbon produced at 500 °C and applied at a rate of 10%.

Conclusion

This study demonstrates that activated carbon derived from organic waste materials can be an effective and sustainable method for remediating soil contaminated with heavy metals and promoting plant growth. However, the presence of detectable heavy metals in corn tissues following activated carbon application suggests that this approach may be best suited for soils with low to moderate contamination levels.

Keywords: Absorption, Availability, Biochar, Phosphoric acid, Surface functional groups

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر - دی ۱۴۰۳، ۶۲۷-۶۰۷

تأثیر بیوپچار و کربن فعال حاصل از ضایعات آلی بر غیرمتحرک کردن فلزات سنگین (سرب، روی و کادمیوم) و رشد گیاه ذرت در خاک آلوده

محمد ماله میر چگینی^{۱*} - احمد گلچین^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳

چکیده

فلزات سنگین آلاینده‌های پایدار خاک هستند که سلامت محیط‌زیست و انسان را به خطر می‌اندازند. استفاده از مواد اصلاح کننده خاک مانند بیوپچار و کربن فعال به عنوان روشی مؤثر برای کاهش تحرک فلزات سنگین در خاک مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، اثر ضایعات آلی (کاه و کلش گندم، پوست سخت گردو و بادام کاغذی)، بیوپچار و کربن فعال تولید شده از آن‌ها بر غیرمتحرک کردن فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم و رشد گیاه ذرت در خاک آلوده در شرایط گلخانه‌ای بررسی شد. بیوپچارها در دو دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس تولید و سپس با اسید فسفریک فعال و تیمارهای آزمایش در چهار سطح (۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و در سه تکرار به یک خاک آلوده اضافه شدند. نتایج نشان داد ضایعات آلی، بیوپچارها و کربن‌های فعال، غلظت فلزات سنگین قابل دسترس در خاک را در سطح احتمال ۵ درصد به طور معنی داری کاهش دادند. کربن‌های فعال بیشترین و ضایعات آلی کمترین اثر را داشتند. کمترین غلظت فلزات سرب، کادمیوم و روی قابل عصاره‌گیری با DTPA مربوط به تیمار کربن فعال ۵۰۰ درجه سلسیوس حاصل از بیوپچار کاه و کلش گندم ۵۰۰ درجه سلسیوس و سطح مصرف ۱۰ درصد به ترتیب با مقادیر ۱/۶، ۴/۵ و ۴۶۴ میلی گرم در کیلوگرم خاک بود که به ترتیب ۹۹/۴۶، ۸۳/۶۷ و ۶۳/۹۶ درصد غلظت فلزات سنگین قابل جذب را نسبت به تیمار شاهد کاهش دادند. کمترین غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت مربوط به همین تیمار و سطح مصرف بود. کمترین غلظت سرب، روی و کادمیوم در بخش هوایی به ترتیب ۷۱/۶۷، ۴۹۰/۶۷ و ۱/۶۷ میلی گرم در کیلوگرم و در بخش ریشه به ترتیب ۲۰۶، ۱۰۹۵ و ۲۰ میلی گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی بود. بیشترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه در همین تیمار و سطح مصرف ۵ درصد به ترتیب با مقادیر ۵/۷۶ و ۱/۸۴ گرم در گلدان مشاهده شد. نتایج این پژوهش نشان داد بکارگیری کربن فعال می‌تواند به عنوان یک روش کارآمد و پایدار برای پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین و افزایش رشد گیاهان در نظر گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: اسید فسفریک، بیوپچار، جذب، فراهمی، گروه‌های عاملی سطحی

مقدمه

جیوه و آرسنیک به محیط‌زیست شده است. این فلزات سمی و پایدار، به راحتی در خاک و آب تجمع یافته و از طریق زنجیره غذایی وارد بدن انسان می‌شوند و سلامت او را به خطر می‌اندازند (Timofeev et al., 2018). برای کاهش تجمع و قابلیت دسترسی این فلزات سمی در خاک استفاده از مواد اصلاحی ضروری است. بیوپچار به دلیل قیمت

خاک بستر حیات گیاهان و زیستگاه جانوران است. اما در سال‌های اخیر پیشرفت‌های صنعتی و افزایش تولید منجر به ورود مقادیر زیادی پسماندهای حاوی فلزات سنگین مانند سرب، روی، کادمیوم، مس،

۱ و ۲- به ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: mohamadmc71@gmail.com)

اکسیژن دار، ظرفیت تبادل یونی و سطح ویژه است. همچنین تشکیل گروه‌های عاملی فسفات مانند $P=O$ و $P=OOH$ باعث افزایش تمایل بیوپار به تشکیل کمپلکس‌های سطحی قوی با فلزات سنگین می‌شود. این امر منجر به غیرمتحرک شدن فلزات سنگین و کاهش آلودگی محیط‌زیست می‌شود (Wang & Wang 2019; Tang et al., 2018). با این حال، لازم به ذکر است که خصوصیات بیوپار فعال شده با اسید فسفریک (کربن فعال) به عوامل مختلفی از جمله نوع و ویژگی‌های بیوپار اولیه، شرایط گرمایی فعال‌سازی، مقدار اسید فسفریک استفاده شده و نحوه شستشو بستگی دارد (Zeng et al., 2022; Cha et al., 2016). شائو و همکاران (Shao et al., 2024) و هان و همکاران (Han et al., 2024) نشان دادند که اسید فسفریک منجر به افزایش سطح ویژه و تشکیل گروه‌های عاملی فسفردار روی سطح بیوپار شده است. آن‌ها گزارش کردند که بیوپار اصلاح شده نسبت به بیوپار ساده تولنایی بالایی در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین در خاک دارند. بیوپار و بیوپار فعال به‌وسیله گروه‌های عاملی اکسیژن دار و فسفات، جاذبه‌های الکترواستاتیکی، تبادل یونی، رسوب، تشکیل کمپلکس‌های درون و برون کره‌ای و جذب فیزیکی باعث کاهش تحرک فلزات سنگین در خاک می‌شود (Shao et al., 2024; Boostani et al., 2022; Janu et al., 2021; Yang et al., 2019). اگرچه مفید بودن بیوپار در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین خاک در مطالعات متعددی نشان داده شده است ولی در مورد کربن فعال اطلاعات زیادی در دست نیست، به‌علاوه توانایی ضایعات آلی و بیوپار و کربن فعال تهیه شده از آن‌ها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین مورد مقایسه قرار نگرفته است. در این پژوهش فرض می‌شود که کاربرد ضایعات آلی و بیوپار و کربن فعال حاصل از آن‌ها می‌تواند به‌عنوان یک روش پایدار و سازگار با محیط‌زیست برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین مورد استفاده قرار گیرد و بیوپار و کربن فعال در مقایسه با ضایعات آلی در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین خاک مؤثرتر هستند. به‌همین دلیل هدف این پژوهش بررسی و مقایسه تأثیر ضایعات آلی و بیوپار و کربن فعال حاصل از آن‌ها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین خاک و رشد گیاه ذرت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۱۵ نوع جاذب در چهار سطح (۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد وزنی) و در سه تکرار به‌صورت گلدانی در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه زنجان در سال ۱۳۹۵ انجام شد.

تهیه یک نمونه خاک آلوده به فلزات سنگین و تجزیه آن

برای انجام آزمایش گلدانی ابتدا یک نمونه خاک آلوده به فلزات

پایین، دسترسی آسان و سازگاری با محیط‌زیست به‌عنوان یک جاذب قوی فلزات سنگین مورد توجه قرار گرفته است (Zhang et al., 2021). مواد اولیه متنوعی مانند چوب، ضایعات کشاورزی، صنعتی و حتی جلبک‌ها برای تولید بیوپار قابل استفاده هستند (Liang et al., 2021). بیوپار یک ماده کربن دار، متخلخل و با ساختار آروماتیک است که از تجزیه حرارتی زیست‌توده در دمای ۲۰۰ تا ۹۰۰ درجه سلسیوس تحت شرایط اکسیژن کم یا بدون اکسیژن تولید می‌شود (Wang et al., 2017; Demirbas & Arin, 2002). ویژگی‌های منحصر به فرد بیوپار از جمله pH، ترکیبات عنصری، سطح ویژه بالا، تخلخل گسترده، توزیع اندازه منافذ، ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و حضور گروه‌های عاملی اکسیژن دار فراوان، آن را به یک جاذب مؤثر برای آلاینده‌های آلی و معدنی تبدیل کرده است (Akhil et al., 2021; Yaashikaa et al., 2020; Ahmad et al., 2014). ویژگی‌های بیوپار به‌شدت تحت تأثیر نوع زیست‌توده اولیه و شرایط تولید (دما، زمان ماندگاری، سرعت گرمایش) قرار می‌گیرد (Tomczyk et al., 2020; Ahmad et al., 2014).

به‌طور کلی، بیوپارهای تولید شده در دمای پایین‌تر دارای ظرفیت تبادل کاتیونی بالاتری هستند که می‌توانند با تشکیل کمپلکس‌های قوی با فلزات سنگین باعث کاهش تحرک آن‌ها در محیط شوند (Bandara et al., 2020). از سوی دیگر، افزایش دمای تولید باعث افزایش سطح ویژه و تخلخل بیوپار شده و در نتیجه ظرفیت جذب فیزیکی فلزات سنگین را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آنیون‌های موجود در سطح بیوپار مثل کربنات و فسفات می‌توانند با فلزات سنگین واکنش داده و آن‌ها را از طریق مکانیسم تشکیل رسوب غیرمتحرک کنند (Inyang et al., 2016; Janu et al., 2021). با تغییر ویژگی‌های بیوپار از طریق روش‌های اصلاح فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌توان ظرفیت جذب آن را برای حذف انواع آلاینده‌های آلی و غیرآلی به‌طور قابل توجهی افزایش داد. یکی از روش‌های مؤثر اصلاح شیمیایی استفاده از اسید فسفریک است. این اسید به‌عنوان یک ماده ارزان، غیرسمی و با خاصیت خوردندگی پایین می‌تواند به‌طور همزمان اسکلت کربنی بیوپار را محافظت کرده و تخلخل آن را افزایش دهد (Peng et al., 2017).

مطالعات نشان داده‌اند که اسید فسفریک با ایجاد پیوند بین اتم‌های کربن و فسفر در طول فرآیند فعال‌سازی، منجر به تشکیل منافذ جدید و افزایش سطح ویژه بیوپار می‌شود (Sajjadi et al., 2019). به‌علاوه، این اسید به‌عنوان یک کاتالیست عمل کرده و دمای مورد نیاز برای فعال‌سازی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، واکنش‌های آب‌زدایی و حذف مواد فرار تسریع شده و ساختار و گروه‌های عاملی بیوپار تغییر می‌کنند (Liang et al., 2021; Sajjadi et al., 2019; Cha et al., 2016). بهبود خصوصیات بیوپار پس از فعال‌سازی با اسید فسفریک شامل افزایش تخلخل، تعداد گروه‌های عاملی

است.

تهیه جاذب‌های مورد استفاده در آزمایش

برای تهیه جاذب‌های آلی، از ضایعات آلی شامل کاه و کلش گندم، پوست سخت گردو و پوست سخت بادام کاغذی استفاده شد. مراحل تهیه جاذب‌ها به شرح زیر بودند:

بیوچار

ابتدا ضایعات آلی خرد و از الک یک میلی‌متر عبور داده شدند. سپس ضایعات آلی خرد شده در داخل کروزه چینی قرار داده و با فویل آلومینیوم درب آن کاملاً پوشانده شد تا در شرایط اکسیژن محدود و در دو دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس (به‌منظور کاهش تولید سوخت‌ها و گازهای زیستی) با نرخ رشد دمایی ۳۰ دقیقه و با مدت ماندگاری دو ساعت در کوره الکتریکی مدل (ATRA-AFE1200L- 18DH) تجزیه حرارتی شدند تا به شش نوع بیوچار تبدیل و سپس خصوصیات آن اندازه‌گیری گردید (Malehmir Chegini et al., 2020a).

کربن فعال

برای این‌منظور بیوچارهایی که در دمای گرماکافت ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و با زمان ماندگاری دو ساعت تولید شده بودند با محلول اسید فسفریک ۲۰٪ (وزنی- وزنی) تیمار شدند. پس از آن بیوچارهای تیمار شده با اسید فسفریک در همان دمایی که بیوچار در آن تولید شده بود (دمای گرماکافت ۳۰۰ یا ۵۰۰ درجه سلسیوس) با نرخ رشد حرارتی ۳۰ دقیقه و با زمان ماندگاری دو ساعت در کوره الکتریکی فعال و به شش نوع کربن فعال تبدیل و سپس خصوصیات آن اندازه‌گیری گردید (Malehmir Chegini et al., 2020b). جدول ۳ نشان‌دهنده برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده بیوچارها و کربن‌های فعال مورد استفاده در این آزمایش می‌باشد

جدول ۱- نتایج تجزیه فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 1- The results of physical and chemical analysis of the soil used in the experiment

رس	سیلت	شن	بافت خاک	EC	pH	کربن آلی	N	آهک	P	K	Fe	Mn	Cu
Clay	Silt	Sand	Soil texture			Organic carbon		Lime					
	%		-	dS m ⁻¹	-		%				mg kg ⁻¹		
39.2	15.3	45.5	Sandy Clay	2.50	7.44	0.25	0.05	22.50	25	250	2	3	2

جدول ۲- غلظت فراهم و کل فلزات سنگین در خاک مورد استفاده در آزمایش

Table 2- Available and total concentration of heavy metals in the soil used in the experiment

نوع غلظت	mg kg ⁻¹		
	سرب	روی	کادمیوم
Concentration type	Pb	Zn	Cd
غلظت در دسترس	300	1500	27
Available concentration			
غلظت کل	1500	5500	45
Total concentration			

سنگین از عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متر و از اطراف شهرک صنعتی روی زنجان با مختصات طول جغرافیایی "۲۷/۷۸' ۲۵° ۴۸ شرقی و عرض جغرافیایی "۲/۳۱' ۳۸° ۳۶ شمالی به‌صورت مرکب تهیه و سپس از لک دو میلی‌متری عبور داده شد. بعد از همگن نمودن نمونه خاک تهیه شده به‌طور کامل، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن با روش‌های رایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری شدند. بافت خاک به‌روش هیدرومتری (Gee & Bauder, 1986)، کربن آلی خاک (OC) به‌روش اکسایش تر (Nelson & Sommers., 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک با EC متر (Rhoades, 1996)، pH در گل اشباع با pH متر (Thomas, 1996)، کربنات کلسیم معادل (آهک) به‌روش تیتراسیون برگشتی (Page, 1982)، نیتروژن کل به‌روش کج‌لدال (Bremner & Mulvaney, 1982)، فسفر فراهم به‌روش اولسن (Olsen, 1954) و پتاسیم فراهم به‌روش استات آمونیوم (Helmke & Sparks, 1996) اندازه‌گیری شدند. برای تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) از دستگاه صفحات فشاری در فشار ۰/۳۳ بار و تعیین رطوبت نقطه پژمردگی (PWP) از دستگاه صفحات فشاری در فشار ۱۵ بار برای هر تیمار و سطح مصرف (در کل ۶۰ تیمار) استفاده شد (Cassel & Nielsen, 1986). نتایج تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در آزمایش در جدول ۱ نشان داده شده است.

برای تعیین غلظت در دسترس آهن، مس، منگنز و فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در خاک از عصاره‌گیر DTPA با غلظت ۰/۰۰۵ مولار با pH = ۷/۳ استفاده شد (Lindsay & Norvell, 1978). غلظت کل فلزات سنگین پس از هضم نمونه خاک با تیزاب سلطانی (اسید نیتریک غلیظ و اسید کلریدریک غلیظ با نسبت ۱ به ۳) طبق استاندارد (ISO 11466 (1995) با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Spectr AA 200 اندازه‌گیری شد. غلظت کل و در دسترس فلزات سنگین، در خاک مورد استفاده در آزمایش، در جدول ۲ نشان داده شده

جدول ۳- برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی جاذب‌های کاربردی در آزمایش
Table 3- Some physical and chemical characteristics of the adsorbents used in the experiment

نوع ضایعات آلی Type of organic waste	نوع جاذب Adsorbent type	pH	EC	CEC	خاکستر Ash	چگالی ظاهری Bulk density	کربن آلی Organic carbon	C/N
		-	dS m ⁻¹	Cmol kg ⁻¹	%	g cm ⁻³	%	-
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	6.05	3.20	38.02	14.13	0.21	45.43	87.79
	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	8.15	4.46	66.00	27.71	0.18	47.01	43.83
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	10.35	6.15	36.95	36.61	0.17	8.47	9.33
	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	2.91	0.28	88.15	-	-	28.16	27.64
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	3.06	0.54	58.04	-	-	4.60	5.81
	زیست توده اولیه Primary biomass	5.26	0.54	39.56	2.11	0.44	43.37	54.74
	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	7.58	0.38	62.44	4.73	0.40	30.86	28.36
پوست گردو Walnut shell	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	10.04	0.74	43.72	7.43	0.31	10.14	11.92
	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	2.93	0.34	75.78	-	-	13.84	14.12
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	3.63	0.64	52.74	-	-	4.75	5.39
	زیست توده اولیه Primary biomass	5.54	0.70	24.76	2.80	0.66	41.77	91.51
	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	9.34	1.31	64.57	9.49	0.45	26.22	33.39
پوست بادام Almond shell	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	9.93	1.93	43.05	10.81	0.42	5.53	8.56
	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	3.57	0.14	82.01	-	-	11.50	17.72
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	4.05	0.15	52.50	-	-	4.00	6.13
	زیست توده اولیه Primary biomass	5.54	0.70	24.76	2.80	0.66	41.77	91.51
	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	9.34	1.31	64.57	9.49	0.45	26.22	33.39

بودند).

آزمایش گلدانی

جاذب‌های آلی مختلف پس از تهیه، هر کدام در چهار سطح (صفر، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد) و در سه تکرار به نمونه‌های خاک آلوده به

در این آزمایش از ۱۵ نوع جاذب آلی استفاده شد: سه نوع زیست‌توده آلی (شامل کاه و کلش گندم، پوست سخت گردو و بادام کاغذی)، شش نوع بیوچار (شامل سه نوع زیست‌توده آلی که در دو دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس گرماکافت شده بودند)، شش نوع کربن فعال (شامل شش نوع بیوچار که با اسید فسفریک فعال شده

نتایج و بحث

اثرات تیمارهای آزمایشی و سطوح آن‌ها بر وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که افزودن جاذب‌های مختلف به خاک آلوده به فلزات سنگین، تأثیر معنی‌داری بر میزان وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت دارند ($P < 0.05$). مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نوع و سطح جاذب نشان داد که افزودن جاذب‌ها به خاک آلوده باعث افزایش معنی‌دار وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت نسبت به تیمار شاهد می‌شود ($P < 0.05$). بیشترین میزان وزن خشک بخش هوایی و ریشه از به‌کارگیری تیمار کربن فعال ۵۰۰ درجه سلسیوس حاصل از بیوپار گندم تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و در سطح مصرف پنج درصد به‌ترتیب با مقادیر ۵/۷۶ و ۱/۸۴ گرم در گلدان به‌دست آمد. کمترین وزن خشک بخش هوایی و ریشه نیز به تیمار شاهد تعلق داشت. تیمارهای کربن فعال حاصل از بیوپارهای پوست بادام و گردو، تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و در سطح مصرف ۵ درصد نیز دارای وزن زیست‌توده بالایی نسبت به تیمار شاهد بودند. بالاترین وزن زیست‌توده تولیدی در سطح مصرف ۵ درصد در خاک به‌ترتیب مربوط به کربن فعال ۵۰۰ درجه سلسیوس، کربن فعال ۳۰۰ درجه سلسیوس، بیوپار ۵۰۰ درجه سلسیوس، بیوپار ۳۰۰ درجه سلسیوس و ضایعات آلی بود (جدول ۴).

پایین آمدن میزان وزن زیست‌توده گیاهی با افزایش میزان مصرف بیوپارها و کربن‌های فعال تا سطح ۱۰ درصد در خاک احتمالاً به دلیل جذب زیاد عناصر غذایی مورد نیاز گیاه توسط کربن فعال و کاهش فراهمی آن‌ها باشد. افزایش دمای گرماکافت باعث افزایش میزان pH، EC و خاکستر در بیوپارهای تولیدی گردید (جدول ۳). افزودن بیوپار به خاک در سطح ۱۰ درصد وزنی علاوه بر کاهش فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه سبب افزایش معنادار میزان pH و EC و در نتیجه کاهش زیست‌توده گیاهی می‌شود (جدول ۴ و ۹). نتایج جدول ۱ نشان داد که پایین بودن غلظت عناصر غذایی کم مصرف، نیتروژن، ماده آلی و بالا بودن EC و غلظت فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در خاک باعث کاهش تولید زیست‌توده گیاهی شده است. فلزات سنگین می‌توانند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم بر رشد گیاه تأثیر بگذارند. فلزات سنگین می‌توانند با عناصر ضروری مورد نیاز گیاه در هنگام جذب توسط ریشه رقابت کنند. این امر می‌تواند منجر به کمبود مواد مغذی و در نتیجه کاهش رشد گیاه شود. فلزات سنگین از طریق بازدارندگی آنزیمی نیز رشد گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

فلزات سنگین در گلدان‌های پلاستیکی اضافه گردیدند. تعداد گلدان‌های پلاستیکی ۱۸۰ عدد و مقدار خاک و جاذب در هر گلدان دقیقاً ۴/۵ کیلوگرم بود. نمونه‌های خاک آلوده فاقد جاذب (شاهد) و نمونه‌های خاک آلوده تیمار شده با جاذب در گلدان‌های پلاستیکی که واحدهای آزمایش را تشکیل می‌دادند به مدت یک ماه در شرایط گلخانه و در رطوبت ظرفیت مزرعه (FC) برای رسیدن به تعادل نسبی خوابانده شدند. سپس، درون هر گلدان سه عدد بذر ذرت رقم ماکسیما کشت و پس از گذشت ۷۵ روز و رسیدن به رشد مطلوب گیاهان برداشت و در انتهای دوره کشت نیز از خاک هر گلدان جهت اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین نمونه مرکب تهیه شد. برای انجام آبیاری در دوره خویانیدن و رشد گیاه پس از رسیدن گلدان‌ها به رطوبت ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه (FC) اقدام به آبیاری شد تا واحدهای آزمایش در طول دوره در شرایط رطوبت مزرعه قرار داشته باشند.

بخش هوایی گیاه ذرت از محل طوقه با قیچی قطع و محتویات گلدان‌ها با احتیاط خالی و اجزای ریشه و خاک هر تیمار آزمایش از هم جدا و نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. شستشوی بخش هوایی گیاه ذرت با آب مقطر و پراکنده‌سازی و جدا سازی کامل ذرات خاک از سطح ریشه‌ها با استفاده از محلول کالگون ۰/۱ درصد و بکارگیری دستگاه اولتراسوند به مدت ۵ تا ۱۰ دقیقه و سپس شستشوی ریشه‌ها با آب مقطر انجام شد (Aggarwal et al., 2006). نمونه‌های تر بخش هوایی و ریشه پس از قرار گرفتن درون پاکت‌های کاغذی مخصوص در آون در دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند. سپس وزن خشک نمونه‌ها با ترازو با دقت ۰/۰۱ گرم توزین گردید. نمونه‌های گیاهی خشک شده آسیاب و برای تعیین غلظت فلزات سنگین در آن‌ها از روش هضم تر (مخلوط اسید سولفوریک و اسید سالیسیلیک و آب اکسیژنه) استفاده شد (Ehyaei & Behbahanzade, 1993). غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک و گیاه به وسیله دستگاه جذب اتمی مدل Spectr AA 200 اندازه‌گیری شد (Sastre et al., 2002). برای تعیین درصد غیرمتحرک شدن فلزات سنگین در خاک (A) از رابطه زیر استفاده شد (Park et al., 2011).

$$A = \frac{\text{غلظت عنصر عصاره‌گیری شده در تیمار B} - \text{غلظت عنصر عصاره‌گیری در تیمار A}}{\text{غلظت عنصر عصاره‌گیری در تیمار A}} \times 100$$

تجزیه‌های آماری

تجزیه واریانس داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.2 و مقایسه میانگین‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ درصد ($P < 0.05$) انجام شد.

جدول ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع و سطوح جاذب بر میزان وزن خشک بخش‌های مختلف گیاه ذرت

Table 4- Comparison of the average interaction effects of type and levels of adsorbent on the amount of dry weight of different parts of the corn plant

نوع جاذب Adsorbent type		سطح مصرف (%) Consumption level	وزن خشک Dry weight (g pot ⁻¹)	
			بخش هوایی Shoot	بخش ریشه Root
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	0.47 rq	0.256 rst
		5	0.61 rq	0.3 rstqp
		10	0.52 rq	0.17 t
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	1.603 mkl	0.52 monlk
		5	2.376 ij	0.56 mjnlk
		10	0.39 r	0.16 t
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	2.88 hg	0.676 hjigk
		5	2.79 ihg	0.72 hjig
		10	1.02 nop	0.44 monqp
کربن فعال گندم Wheat active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	3.863 e	1.016 de
		5	4.436 cd	1.14 d
		10	2.61 ihj	1.06 d
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	5.126 b	1.546 b
		5	5.763 a	1.84 a
		10	4.6 c	1.48 b
پوست گردو Walnut shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	1.03 nop	0.223 st
		5	1.21 mno	0.58 mjnlk
		10	0.67 rqp	0.456 monlp
بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	2.653 ihj	0.58 mjnlk
		5	2.79 ihg	0.756 hfig
		10	0.46 rq	0.206 st
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	1.226 mno	0.57 mjnlk
		5	3.3 f	0.79 hfg
		10	1.423 mnl	0.456 monlp
کربن فعال گردو Walnut active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	1.226 mno	0.356 roqp
		5	4.01 e	0.82 fg
		10	2.49 ihj	0.42 onqp
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	2.36 j	0.446 monqp
		5	4.1 ed	0.896 fe
		10	2.573 ihj	0.8 fg
پوست بادام Almond shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	0.803 qp	0.286 rstq
		5	1.01 op	0.386 roqp
		10	0.473 rq	0.32 rstqp
بیوچار بادام Almond biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	1.886 k	0.566 mjnlk
		5	2.656 ihj	0.63 hjik
		10	1.37 mnol	0.56 mjnlk
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	2.6 ihj	0.716 hjig
		5	3.15 fg	0.896 fe
		10	2.316 j	0.6 mmjilk
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	2.636 ihj	0.62 jilk
		5	3.31 f	0.906 fe
		10	2.696 ihj	0.726 hjig
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	0.34 r	0.15 t
		2.5	3.446 f	0.71 hjig
		5	4.21 ed	1.3 c
		10	1.686 kl	0.726 hjig

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test.

اثر تیمارهای آزمایشی و سطوح آن ها بر غلظت فلزات سنگین بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که افزودن جاذب‌های مختلف به خاک تأثیر معنی‌داری بر غلظت فلزات سنگین بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت دارند ($P < 0.05$). مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نوع و سطح جاذب نشان داد که افزودن جاذب‌های مختلف به خاک به‌طور معنی‌داری ($P < 0.05$) غلظت فلزات سنگین بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را در مقایسه با تیمار شاهد کاهش دادند. با افزایش مقدار مصرف جاذب تا سطح ۱۰ درصد در خاک، میزان کاهش غلظت فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت افزایش یافت. کمترین غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت مربوط به تیمارهای کربن فعال، حاصل از بیوچارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس، با سطح مصرف ۱۰ درصد بود (جدول ۵ و ۶).

بیشترین غلظت فلزات سنگین بخش هوایی گیاه ذرت به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شاهد، ضایعات آلی، بیوچارهای تولیدی در دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس و کربن‌های فعال تولیدی در دمای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس بود (جدول ۵). در مورد غلظت فلزات سنگین بخش ریشه نیز همین الگو مشاهده شد، با این تفاوت که بیوچار تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس نسبت به کربن فعال تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس در کاهش غلظت فلزات سنگین بخش ریشه موثرتر بود (جدول ۶). همچنین نتایج نشان داد با افزایش مقدار مصرف جاذب‌ها در خاک تا سطح ۱۰ درصد، فراهمی و تحرک فلزات سنگین در خاک کاهش (جدول ۷) و در نتیجه غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت کاهش یافت. کمترین غلظت سرب، روی و کادمیوم در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت مربوط به تیمارهای کربن فعال ۵۰۰ حاصل از بیوچارهای کاه و کلش گندم تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس و در سطح مصرف ۱۰ درصد بود. در این تیمارها کمترین غلظت سرب، روی و کادمیوم در بخش هوایی به‌ترتیب ۷۱/۶۷، ۴۹۰/۶۷ و ۱/۶۷ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی و در بخش ریشه به‌ترتیب ۲۰۶، ۱۰۹۵ و ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم ماده خشک گیاهی بود که به‌ترتیب ۷۵/۱۱، ۸۳/۶۷ و ۹۴/۲۴ درصد و ۵۶/۸۵، ۷۳/۱۸ و ۸۷/۰۹ درصد نسبت به غلظت‌های سرب، روی و کادمیوم بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت در تیمار شاهد کمتر بودند (جدول ۵ و ۶).

فلزات سنگین می‌توانند با فعالیت آنزیم‌هایی که برای انجام وظایف مختلف در گیاه ضروری هستند، مانند فتوسنتز، تنفس و متابولیسم مواد غذایی، تداخل داشته باشند. ایجاد استرس اکسیداتیو توسط فلزات سنگین از جمله عوامل دیگری که باعث کاهش رشد گیاه می‌شود. فلزات سنگین می‌توانند باعث تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) در سلول‌های گیاهی شوند. این گونه‌های فعال می‌توانند باعث آسیب به غشاهای سلولی، پروتئین‌ها و DNA شوند که می‌تواند منجر به کاهش رشد و حتی مرگ گیاه شود. تخریب روابط آبی گیاه از جمله تأثیرات غیر مستقیم فلزات سنگین بر رشد گیاه می‌باشد. فلزات سنگین می‌توانند با از بین بردن توانایی گیاه برای جذب و انتقال آب، باعث پژمردگی و کاهش رشد آن شوند. فلزات سنگین همچنین می‌توانند با تأثیر منفی روی میکروارگانیسم‌های مفید خاک، باعث کاهش رشد گیاه شوند. این میکروارگانیسم‌ها نقش حیاتی در چرخه مواد غذایی، حاصلخیزی خاک و رشد گیاه دارند (Rashid et al., 2023). کربن‌های فعال و بیوچارها با غیرمتحرک کردن فلزات سنگین در خاک (جدول ۷) از اثر سوء آن‌ها بر رشد و نمو گیاه کاسته و باعث افزایش رشد و میزان زیست‌توده گیاهی می‌شوند.

گزارش شده است که فلزات سنگین به‌طور مستقیم بر طولی شدن سلول‌ها از طریق تأثیر بر آنزیم‌های دیواره‌ی سلولی و ATPase موجود در پلاسمالما مؤثر می‌باشند (Kastori et al., 1998). این فلزات روی فتوسنتز و تنفس گیاه، از طریق تأثیر بر مکانیزم‌های انتقال الکترون نقش بازدارندگی ایفا می‌کنند. بنابراین فلزات سنگین با کاهش و ممانعت از فتوسنتز و تنفس گیاه سبب کاهش تولید ماده خشک و رشد گیاه می‌شوند. کاهش زیست‌توده گیاهی ناشی از غلظت بالای فلزات سنگین در خاک همچنین می‌تواند در اثر کاهش متابولیسم نیتروژن باشد (Sinha et al., 2006). تجمع بیش از اندازه فلزات سنگین در بافت‌های گیاهی باعث مسمومیت گیاه می‌شود که این امر موجب صدمات شدید متابولیسمی و کاهش رشد می‌شود (Jing et al., 2007). در این پژوهش نشان داده شد که افزودن بیوچار و کربن فعال به خاک باعث غیرمتحرک شدن و کاهش زیست‌فراهمی فلزات سنگین در خاک می‌شود (جدول ۷)، که این امر می‌تواند افزایش رشد و افزایش وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را به‌همراه داشته باشد. نتایج این تحقیق با یافته‌های (Shao et al., 2024; Han et al., 2024; Biria et al., 2017; Brendova et al., 2016; Xu et al., 2016; Zhang et al., 2016; Hejazizadeh et al., 2016; Lu et al., 2014) مطابقت دارد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع و سطوح جاذب بر غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی گیاه ذرت

Table 5- Comparison of the average interaction effects of type and levels of adsorbent on the concentration of heavy metals in the shoot part of the corn plant

نوع جاذب Adsorbent type			mg kg ⁻¹		
سطح مصرف (%) Consumption level			سرب Pb	روی Zn	کادمیوم Cd
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	220 e	1914 c	22.5 b
		5	181 j	1799.33 e	20.11 bc
		10	166.55 mn	1206 p	18 dbecf
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	206.66 f	1864 d	17.5 dgecf
		5	168.5 l	1659.33 hi	15 hdgeif
		10	125.5 t	1282 o	11.66 hkjnlmi
کربن فعال گندم Wheat active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	183.33 ij	1632.67 i	15 hdgeif
		5	153.3 q	1171.33 rq	11 klnlmio
		10	122.22 u	975 u	9.16 qknlmpo
پوست گردو Walnut shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	246.67 b	1753.33 f	19 dbc
		5	209 f	1665.33 h	17 dgecf
		10	186 i	1438 k	14 hkjgeif
بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	232 c	1560 j	11.67 hkjnlmi
		5	194.5 gh	1365 m	9.44 qknlmpo
		10	153.33 q	1158 r	5.55 qrsp
کربن فعال گردو Walnut active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	194.11 gh	1375.33 lm	8.33 qrmmpo
		5	168.33 m	1157.5 r	6.67 qrpo
		10	136.23 s	875.5 v	5 qrsp
پوست بادام Almond shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	245 b	2460.67 b	26.67 a
		5	230 cd	1815 e	22.22 b
		10	192.5 h	1716.67 g	18.47 dbec
بیوچار بادام Almond biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	229.11 cd	1712 g	16.11 hdgecf
		5	186 i	1438 k	13.88 hkjgleif
		10	164 on	1165 rq	9 qnlmio
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	227.22 d	1320.66 n	13 hkjglmi
		5	177 k	1058 t	10 klnlmio
		10	144 r	865 vm	5 qrsp
پوست بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	196.67 g	1397.33 l	14.67 hdjgeif
		5	157 p	1272 o	13.55 hkjglif
		10	127 t	868 vm	5.83 qrsp
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	288 a	3006.67 a	29 a
		2.5	177 k	1102 s	11 klnlmio
		5	134 s	858 vm	8.33 qrmmpo
		10	116 v	748 x	5 arsp

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع و سطوح جاذب بر غلظت فلزات سنگین در بخش ریشه گیاه ذرت

Table 6- Comparison of the average interaction effects of type and levels of adsorbent on the concentration of heavy metals in the root part of the corn plant

نوع جاذب Adsorbent type		سطح مصرف (%) Consumption level	mg kg ⁻¹		
			سرب Pb	روی Zn	کادمیوم Cd
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	440.52 b	2612.67 b	93 bc
		5	395 e	2002 j	65.83 hgif
		10	350.21 g	1568 st	55 lkij
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	370.28 f	2159 h	70 hgf
		5	291.67 kml	1745.33 n	46.67 lomn
		10	268.43 op	1466 u	35 posrq
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	289.17 nml	1855 l	68.33 hgf
		5	245.55 qr	1648 qr	46.22 lomn
		10	216 vtu	1352.5 x	27.91 tsr
کربن فعال گندم Wheat active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	327.66 hi	1925.33 k	62.62 hgij
		5	271.66 onp	1707.33 o	42.16 pomn
		10	232 bstr	1458.66 u	32.22 psrq
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	282.5 onml	1700 o	50.88 lkmn
		5	230.62 str	1388 w	35 posrq
		10	206 v	1065 z	20 t
پوست گردو Walnut shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	434.5 b	2555 c	83.33 edc
		5	402 de	2145 hi	62.5 hgij
		10	359 fg	1589.33 s	46.66 lomn
بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	414.27 dc	2389.33 d	85 dc
		5	371 f	1863.33 l	63.75 hgij
		10	296.66 jkml	1583 s	46.67 lomn
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	346.11 g	2153.33 hi	82.5 edc
		5	328.33 h	1856.33 l	52.5 lkml
		10	280 onm	1468.66 u	30 tsrq
کربن فعال گردو Walnut active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	299.27 jkl	2194.33 g	68.33 hgf
		5	268 op	1863.66 l	59.99 hkij
		10	226.97 stu	1568.33 st	41.67 pomnq
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	270.42 onp	1914.67 k	55 lkij
		5	245 sqr	1635.44 r	36 porq
		10	209.37 vu	1227.67 y	23.88 ts
پوست بادام Almond shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	477.5 a	2614 b	96 b
		5	429 bc	2315 e	75.83 edf
		10	390 e	2128 i	65 hgif
بیوچار بادام Almond biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	364.17 fg	2233.33 f	90.83 bc
		5	327.71 hi	1912 k	73.33 egf
		10	281.46 onml	1665 qp	40 ponq
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	348.33 g	1935.33 k	66 hgif
		5	311 jhi	1680 op	42.5 pomn
		10	240 sqr	1428 v	30.55 ptsrq
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	350.49 g	2128 i	66 hgif
		5	309.44 jki	1872 l	46 lomn
		10	258 qp	1553 t	36 porq
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	477.5 a	4038.5 a	155 a
		2.5	314 jhi	1802 m	56 lkij
		5	246.67 qr	1458 u	35 posrq
		10	220 vtu	1240 y	25 tsr

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test.

(Soudek et al., 2017).

بسته به نوع ضایعات اولیه بکار رفته برای تولید بیوپچار، کارایی بیوپچارهای تولیدی برای غیرمتحرک کردن فلزات سنگین مختلف متفاوت است. این ویژگی در جذب فلزات سنگین توسط گیاه خردل مشاهده شده است (Kloss et al., 2015). افزودن مخلوط بیوپچار-کمپوست به خاک نیز موجب کاهش فراهمی سرب، روی و کادمیوم به دلیل افزایش معنی دار pH شد. حلالیت و تحرک فلزات سنگین به طور معنی داری همبستگی منفی با pH دارد. به این معنی که در pH های پایین فلزات به آسانی قابل حل و متحرک بوده و این امر موجب افزایش فراهمی و جذب بیولوژیکی آن ها توسط گیاه می شود (Liang et al., 2017). بیوپچار فعال شده یا به عبارت دیگر کربن فعال نیز توانایی بالایی در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین در خاک و کاهش جذب آن ها توسط گیاه دارد. گزارش شده است که کاربرد بیوپچار و بیوپچار اصلاح شده با اسید فسفریک منجر به کاهش زیست‌فراهی فلزات سنگین در خاک و گیاه و همچنین افزایش وزن زیست‌توده گیاهی شد. تشکیل رسوبات فسفری و کربناتی، جذب سطحی و فیزیکی فلزات سنگین با گروه‌های عاملی سطحی و منافذ بیوپچار و بیوپچار اصلاح شده علت این امر بیان گردید (Ahmad et al., 2018).

اثر نوع و مقدار مصرف جاذب بر غلظت فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA در پایان دوره کشت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد که اثر نوع و مقدار مصرف جاذب و همچنین اثر متقابل آن‌ها بر غلظت عناصر سرب، کادمیوم و روی قابل عصاره‌گیری با DTPA در پایان دوره کشت معنی دار است. مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف جاذب در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد که افزودن جاذب‌های مختلف به خاک باعث کاهش معنی دار فراهمی فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در خاک می‌شود و با افزایش مقدار مصرف جاذب تا سطح ۱۰ درصد غلظت فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با DTPA کاهش می‌یابد. بیشترین میزان کاهش غلظت فلزات سنگین استخراج شده با عصاره‌گیر DTPA در مقایسه با تیمار شاهد، به ترتیب مربوط به تیمارهای کربن فعال ۵۰۰، کربن فعال ۳۰۰، بیوپچار ۵۰۰، بیوپچار ۳۰۰ و ضایعات آلی اولیه بود (جدول ۷). یا به عبارت دیگر کربن فعال ۵۰۰ بیشترین تأثیر و ضایعات آلی اولیه کمترین تأثیر را بر غیرمتحرک کردن فلزات سنگین ذکر شده، داشتند (جدول ۸).

کاهش غلظت فلزات سنگین در بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت را می‌توان به غیرمتحرک شدن و کاهش زیست‌فراهمی این فلزات در خاک در اثر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و pH خاک با مصرف بیوپچارها و افزایش بارهای سطحی، سطح ویژه و تخلخل در اثر مصرف کربن فعال نسبت داد. زیرا فلزات سنگین در pH های بالا تحرک کمتری داشته و pH می‌تواند روی شیمی سطح جاذب، بارهای سطحی و تغییر فرم فلزات سنگین در محلول خاک و متعاقب آن تجمع زیستی در گیاه تأثیر بگذارد. در خاک‌های اصلاح شده با بیوپچار غلظت کربن آلی محلول نیز می‌تواند افزایش پیدا کند. کربن آلی محلول موجب کلاته شدن و تشکیل کمپلکس‌های پایدار با فلزات سنگین می‌گردد. بنابراین افزایش کربن آلی محلول زیست‌فراهمی فلزات سنگین را در محلول خاک و در نهایت تجمع زیستی این فلزات در گیاه را کاهش می‌دهد (Ibrahim et al., 2016) محققان بیان کردند که نوع ماده اولیه و شرایط گرماکافت (دما و زمان بلندگاری) تأثیر بسیار زیادی بر روی خصوصیات بیوپچار و توانایی آن‌ها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین دارد. کارایی بیوپچارها در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین بستگی به pH، محتوای خاکستر و غلظت کربن آلی محلول دارد و موجب کاهش تحرک فلزات سنگین در خاک می‌شود (Gusiatin et al., 2016).

گزارش شده است که افزودن بیوپچار حاصل از پوسته شلتوک برنج که در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس و با مدت ماندگاری پنج ساعت تولید گردید بعد از اضافه شدن به یک خاک آلوده باعث غیرمتحرک شدن فلزات سنگین کاتیونی در خاک و در نتیجه کاهش فراهمی این فلزات برای گیاه یونجه گردید. دلیل این امر افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک ناشی از تشکیل گروه‌های عاملی کربن-کربوکسیلات و هیدروکسید-آروماتیک روی سطوح بیوپچار، افزایش pH و میزان کربن آلی محلول خاک بیان گردید. همچنین گزارش شد که افزودن بیوپچار به خاک باعث افزایش فراهمی آنیون‌های آرسنیک در محلول خاک به دلیل افزایش دفع آنیونی گردید (Ibrahim et al., 2016). نتایج پژوهش‌های دیگر نیز حاکی از آن است که بیوپچار توانایی بالایی در غیرمتحرک کردن و کاهش جذب سرب، روی و کادمیوم توسط غلات دارد. درحالی که کودهای معدنی و مواد آلی موجب افزایش فراهمی سرب، روی و کادمیوم در خاک و افزایش غلظت این عناصر در دانه جو شدند (Moreno-Jiménez et al., 2016). تأثیر مثبت بیوپچار در کاهش سمیت فلزات سنگین برای جوانه‌زنی سورگوم نیز گزارش شده است. اگر چه این ویژگی تحت تأثیر نوع بیوپچار نیز قرار گرفت. بیوپچار حاصل از بامبو تأثیر کمی در کاهش سمیت کادمیوم و مس داشت و بیوپچار حاصل از پوسته برنج نیز نتوانست سمیت سرب را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد

جدول ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع و سطوح جاذب بر غلظت فلزات سنگین عصاره‌گیری شده با DTPA در خاک در پایان دوره کشت گیاه

Table 7- Comparison of the average interaction effects of type and levels of adsorbent on the concentration of heavy metals extracted with DTPA in the soil at the end of the plant cultivation period

نوع جاذب Adsorbent type			mg kg ⁻¹		
		سطح مصرف (%) Consumption level	کادمیوم Cd	سرب Pb	روی Zn
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	18.3 d	180 c	1024.64 d
		5	15.65 gh	138.4 f	914.48 gh
		10	13 mlk	88.33 ij	812.32 jk
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	16.6 ef	158.5 d	914.48 gh
		5	11.8 pon	84.4 j	835.2 j
		10	9.4 vut	32 pq	712.72 nm
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	13.5 lk	137.57 f	869.28 i
		5	10 sut	84.4 j	705.44 nm
		10	8.5 vw	26.33 p	628.64 p
کربن فعال گندم Wheat active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	16.9 ef	133.2 f	832.32 j
		5	10.7 srq	61.2 lm	725 nlm
		10	7.4 x	16.4 r	628.64 p
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	12.5 mn	57.4 nlm	814.24 jk
		5	8.5 vw	30.8 p	712.72 nm
		10	4.5 y	1.6 s	464 r
پوست گردو Walnut shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	20.2 c	179.4 c	1052.08 d
		5	17 e	136.4 f	958.32 ef
		10	15 hi	110.8 gh	835.20 j
بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	14.6 ji	150 e	954.8 f
		5	12.6 mln	92.93 i	878 i
		10	8.1 wx	34.2 p	726.88 nlm
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	13.3 mlk	116.26 g	895.6 ih
		5	9.2 vu	74.5 k	750.24 l
		10	7.5 x	33.05 p	709.2 nm
کربن فعال گردو Walnut active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	14.5 ji	64.53 l	934.4 gf
		5	10.8 srq	52 n	825.6 j
		10	7.5 x	19.95 rq	634.96 p
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	12.4 mon	43.4 o	872.72 i
		5	9.4 vut	27.5 pq	750.24 l
		10	4.3 y	4.4 s	565 q
پوست بادام Almond shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	21.3 b	190.2 b	1160 b
		5	19 d	130.93 f	1098 c
		10	16 gf	107 h	983.84 e
بیوچار بادام Almond biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	18.86 d	175 c	944.96 f
		5	15.5 gh	111 gh	895.6 ih
		10	11.1 prq	33.66 pq	735.44 lm
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	16 gf	147 e	891.68 ih
		5	11.5 poq	87.5 ij	751.84 l
		10	10.2 srt	26.33 p	696.88 n
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	16.4 gef	84.2 j	869.28 i
		5	12 pon	55.4 nm	705.44 nm
		10	9.5 ut	16 r	665 o
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	27.55 a	297.16 a	1287.33 a
		2.5	13.8 Jk	53.9 nm	812.08 Jk
		5	9.1 vu	16 r	785.44 k
		10	4.3 v	3.2 s	578.8 q

حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test.

جدول ۸- درصد غیرمتحرک کردن فلزات سنگین در اثر کاربرد انواع جاذب در سطح مصرف ۱۰ درصد در خاک

Table 8- The percentage of immobilization of heavy metals due to the application of adsorbents at the consumption level of 10% in the soil

نوع جاذب و مقایسه Adsorbent type and comparison	%		
	کادمیوم Cd	سرب Pb	روی Zn
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۳۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 300 °C	21.28	48.75	11.80
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to biochar 500 °C	47.06	94.00	26.19
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 500 °C	12.94	37.72	0
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به کربن فعال ۳۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to activated carbon 300 °C	39.19	90.24	26.19
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 300 °C compared to biochar 500 °C	9.60	17.71	11.80
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 300°C compared to the control	73.14	94.48	51.17
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 500°C compared to the control	83.67	99.46	63.96
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 300 °C compared to the control	65.88	89.23	44.63
بیوچار ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 500 °C compared to the control	69.14	91.13	51.16
زیست توده اولیه نسبت به شاهد Primary biomass compared to the control	52.81	70.27	36.90
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۳۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 300 °C	7.41	39.64	12.64
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to biochar 500 °C	42.67	87.13	20.33
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 500 °C	0	41.66	10.46
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به کربن فعال ۳۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to activated carbon 300 °C	42.67	77.94	11.01
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 300 °C compared to biochar 500 °C	7.40	3.36	2.43
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 300°C compared to the control	72.78	93.29	50.67
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 500°C compared to the control	84.39	98.52	56.11
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 300 °C compared to the control	70.60	88.50	43.53
بیوچار ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 500 °C compared to the control	72.77	88.87	44.90
زیست توده اولیه نسبت به شاهد Primary biomass compared to the control	45.55	62.71	35.12
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۳۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 300 °C	14.41	52.47	9.58
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to biochar 500 °C	57.84	87.85	16.94
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Activated carbon 300 °C compared to biochar 500 °C	6.86	39.23	4.57
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به کربن فعال ۳۰۰ °C Activated carbon 500 °C compared to activated carbon 300 °C	54.73	80.00	12.96
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 300 °C compared to biochar 500 °C	8.10	21.77	5.24
کربن فعال ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 300°C compared to the control	65.63	94.62	48.34
کربن فعال ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Activated carbon at 500°C compared to the control	84.39	98.92	55.04
بیوچار ۳۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 300 °C compared to the control	59.70	88.67	42.87
بیوچار ۵۰۰ °C نسبت به شاهد Biochar 500 °C compared to the control	62.97	91.13	45.86
زیست توده اولیه نسبت به شاهد Primary biomass compared to the control	41.92	64.00	27.07

بدون علامت نشان‌دهنده غیرمتحرک کردن در خاک می‌باشد.
no sign indicates immobilization in the soil.

به‌همین دلیل بیوجارها می‌توانند برای جذب عناصر غذایی و آلاینده‌ها مفید باشند. وجود این بنیان‌های عاملی اکسیژن‌دار یکی از دلایل بالاتر بودن میزان CEC در بیوجارهای تولید شده در دمای گرماکافت ۳۰۰ درجه در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه می‌باشد (جدول ۳). ولی بیوجارهای تولیدی در دمای پایین در مقایسه با بیوجارهای تولید شده در دمای بالاتر از پایداری کمتری برخوردار بوده و سریعتر در محیط تجزیه شده و عناصر جذب سطحی شده را آزاد می‌کنند. در ضمن این بیوجارها دارای pH کمتری نسبت به بیوجارهای تولید شده در دمای گرماکافت بالا می‌باشند. درمقابل، مقدار بیوجار تولیدی از مواد آلی اولیه در دماهای گرماکافت بالا، کمتر است ولی بیوجارهای تولید شده از پایداری بیشتر برخوردارند. این بیوجارها بنیان‌های عاملی کمتری دارند که از ظرفیت آن‌ها برای تبادل کاتیونی می‌کاهد (جدول ۳). در عوض دمای گرماکافت بالا، باعث ایجاد تخلخل زیاد در بیوجارها می‌شود که موجب ایجاد سطوح داخلی گسترده در بیوجارها می‌شود و توانایی آن‌ها را برای جذب آلاینده‌ها به‌شدت افزایش می‌دهد (Zhang et al., 2022). بنابراین توانایی بیوجارهای تولید شده در دمای ۳۰۰ درجه در جذب یون‌های فلزی از بنیان‌های عاملی اکسیژن‌دار فراوان سطحی آن‌ها ناشی می‌شود، توانایی بیوجارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس از سطح داخلی گسترده آن منشأ می‌گیرد. نتایج مندرج در جدول ۳ و ۷ به‌وضوح این امر را نشان می‌دهد.

فعال‌سازی بیوجارها با اسید فسفریک باعث تغییر خواص آن‌ها می‌شود (Daffalla, 2023). فعال‌سازی با اسید با تأثیر بر روی ساختمان بیوجارها باعث افزایش سطوح داخلی آن‌ها می‌شود که این امر ظرفیت جذب کربن‌های فعال تولیدی را برای جذب آلاینده‌ها افزایش می‌دهد. علاوه بر این شیمی سطح کربن‌های فعال نیز با توجه به نوع ماده فعال‌کننده تغییر می‌کند. وارد کردن بنیان فسفات (PO_4^{3-}) در سطوح بیوجارها توسط اسید فسفریک طی فرایند فعال‌سازی باعث جذب زیاد یون‌های فلزی در اثر نیروی الکترواستاتیکی می‌شود. به‌علاوه ایجاد سطح داخلی گسترده این ویژگی را تشدید می‌کند. بنابراین فعال‌سازی، افزایش سطح داخلی و افزایش بنیان‌های عاملی سطحی را توأمأً به بیوجارها اضافه می‌کند. به‌همین دلیل کربن‌های فعال تولیدی به‌مراتب توانایی جذب یون‌های فلزی بیشتری در مقایسه با بیوجارها دارند (Shao et al., 2024; Han et al., 2024).

اثرات نوع و مقدار جاذب بر میزان pH و EC خاک در پایان دوره کشت

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد که اثر نوع و مقدار جاذب بر میزان pH و EC خاک معنی‌دار است.

کمترین غلظت سرب، کادمیوم و روی قابل عصاره‌گیری با DTPA مربوط به تیمار کربن فعال ۵۰۰ درجه سلسیوس حاصل از بیوجار کاه و کلش گندم ۵۰۰ درجه سلسیوس و سطح مصرف ۱۰ درصد بود. غلظت فلزات سنگین ذکر شده در این تیمار به‌ترتیب ۴/۵ و ۴۶۴ میلی‌گرم در کیلوگرم اندازه‌گیری گردید که به‌ترتیب ۸۳/۶۷ و ۶۳/۹۶ درصد نسبت به غلظت همان فلزات در تیمار شاهد کمتر بود. همان‌طور که در جدول ۷ و ۸ مشاهده می‌شود قدرت جاذب‌های مختلف در غیرمتحرک کردن فلزات سنگین سرب، کادمیوم و روی تحت تأثیر نوع ماده آلی اولیه، دمای بکار رفته برای گرماکافت آن‌ها، نرخ افزایش دمای گرماکافت (گرماکافت کند، متوسط و سریع)، مدت ماندگاری ضایعات آلی در دمای گرماکافت، نوع ماده فعال‌کننده بیوجار، دمای فعال‌سازی بیوجارها و روش فعال‌سازی قرار می‌گیرد (Bousdra et al., 2023). این عوامل بر راندمان تولید بیوجار از مواد اولیه، pH بیوجارهای تولیدی، میزان بار سطحی بیوجارها (میزان بنیان‌های عاملی بیوجارها و قدرت تبادل کاتیونی آن‌ها)، میزان تخلخل و سطح داخلی بیوجارها، پایداری بیوجارها در برابر تجزیه میکروبی و میزان خاکستر تولید شده و درصد کربن آلی بیوجارها تأثیر می‌گذارند. کلودینسکا و همکاران (Kolodyńska et al., 2017) بیان نمودند که خصوصیات مکانیسم جذب و واجذب برای هر دو جاذب مربوط به سطح ویژه، پتانسیل بار در نقطه صفر (pHZPC) و گروه‌های عاملی سطحی می‌باشد. وقتی که pH کمتر از pHZPC باشد، سطح جاذب بار مثبت داشته و منجر به دفع الکتریکی جاذب با فلزات سنگین می‌شود. بارهای منفی سطح جاذب وقتی که pH بیشتر از pHZPC باشد بروز می‌کند. سپس نیروی جاذبه بین سطح جاذب و فلزات سرب، روی، کادمیوم و مس افزایش می‌یابد. افزایش pH منجر به افزایش بارهای منفی سطح بیوجار برای جذب فلزات سنگین می‌شود. کارایی بیوجار و کربن فعال در مدیریت آلودگی خاک به سطح ویژه، توزیع اندازه منافذ، ظرفیت تبادل کاتیونی و گروه‌های عاملی سطحی بیوجار بستگی دارد.

نتایج جدول ۸ همچنین نشان داد که توانایی جاذب‌های مختلف برای غیرمتحرک کردن سرب بیشتر از سایر فلزات سنگین است و بر عکس این توانایی برای فلز سنگین روی کمترین است و کادمیوم نیز در مقام دوم قرار می‌گیرد. بنابراین نوع فلز سنگین نیز بر مؤثر بودن جاذب تأثیر می‌گذارد. دمای گرماکافت نقش کلیدی در شکل دادن خواص بیوجار دارد (He et al., 2019). در دماهای پایین گرماکافت، معمولاً مقدار بیوجار تولیدی از مواد آلی اولیه بیشتر است و سطوح بیوجار تولید شده نیز بنیان‌های عاملی اکسیژن‌دار (بنیان‌های هیدروکسل OH- و کربوکسیل COOH-) بیشتری دارند. این بنیان‌های عاملی زمانی که تفکیک می‌شوند، می‌توانند با یون‌های فلزی پیوند الکترواستاتیکی برقرار کرده و آن‌ها را جذب سطحی کنند.

2020a) گزارش کردند که بیوپار به دلیل داشتن خاکستر حاوی کاتیون‌های قلیایی محلول مانند سدیم، پتاسیم، کلسیم و منیزیم و آنیون‌های محلول مانند کلراید، سولفات و فسفات و همچنین داشتن کربنات کلسیم، که میزان آن‌ها به جنس زیست‌توده اولیه مربوط می‌شود، وقتی به خاک افزوده می‌شود باعث بالا بردن pH و EC خاک می‌شود. آن‌ها همچنین گزارش کردند که با بالا رفتن سطح مصرف بیوپار در خاک، مقادیر pH و EC خاک به میزان بیشتری افزایش می‌یابد.

Malehmir Chegini et al., (2020b) گزارش کردند تیمارهای کربن فعال به دلیل نوع و ماهیت ماده فعال‌کننده مصرفی (اسید فسفریک) و خروج خاکستر از آن‌ها در اثر شستشو با آب مقطر به‌هنگام تهیه جاذب، دارای pH اسیدی و شوری کمی بوده و لذا افزودن آن‌ها به خاک باعث کاهش pH و افزایش اندک EC می‌شود. علاوه بر این بیوپارها و کربن‌های فعال دارای CEC بالا هستند (جدول ۳). سطوح بیوپارها بدلیل حضور مواد قلیایی موجود در خاکستر، اشباع از کاتیون‌های قلیایی و سطوح ذغال‌های فعال به علت فعال‌سازی با اسید فسفریک، اشباع از یون هیدروژن می‌باشد. مصرف این مواد در خاک و انجام فرآیند تبادل کاتیونی بین خاک و بیوپار یا خاک و کربن فعال در حلت اول باعث افزایش pH و در حالت دوم باعث کاهش pH خاک می‌شود (Janu et al., 2021; Lehman et al., 2011; Jeffry et al., 2011).

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که کربن فعال، به‌ویژه آن‌هایی که از فعال‌سازی بیوپارهای تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس حاصل شده بودند، در غیرفعال کردن فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم در خاک از جمله بهترین جاذب‌ها بودند. اگرچه بیوپارها نیز در غیرفعال کردن فلزات سنگین مؤثر بودند، اما اثر آن‌ها کمتر از کربن‌های فعال بود. استفاده از کربن فعال تولید شده در دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس در خاک با مقدار ۵ درصد وزنی، باعث افزایش رشد و وزن خشک بخش هوایی و ریشه گیاه ذرت شد. افزایش مقدار مصرف کربن فعال به ۱۰ درصد وزنی، کمترین غلظت قابل دسترس فلزات سنگین در خاک و در بافت‌های گیاه ذرت را به همراه داشت. این یافته‌ها پتانسیل استفاده از کربن فعال حاصل از بیوپارهای تولیدی از ضایعات آلی را به‌عنوان یک روش پایدار برای اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین سرب، روی و کادمیوم و رشد گیاه ذرت را به‌وضوح نشان می‌دهد.

مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل نوع و مقدار مصرف جاذب در سطح احتمال ۵ درصد نشان داد که تیمارهای به کاربرده شده تأثیر معنی‌داری بر میزان pH و EC خاک دارند. بیشترین و کمترین میزان pH خاک (۸/۸ و ۶/۶۵) به ترتیب از بکارگیری تیمارهای بیوپار کاه و کلش گندم تولید شده در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس و تیمار کربن فعال ۵۰۰ درجه سلسیوس حاصل از بیوپار کاه و کلش گندم ۵۰۰ درجه سلسیوس با سطح مصرف ۱۰ درصد در خاک بدست آمد. بیشترین مقدار EC خاک به میزان $(13/52 \text{ dS m}^{-1})$ مربوط به تیمار بیوپار کاه و کلش گندم تولید شده در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس و با سطح مصرف ۱۰ درصد بود. کمترین میزان EC نیز از تیمار کربن فعال ۳۰۰ درجه سلسیوس حاصل از بیوپار پوست گردو ۳۰۰ درجه سلسیوس و با سطح مصرف ۵ درصد به مقدار (2 dS m^{-1}) بدست آمد (جدول ۹). بطور کلی بیشترین مقادیر pH و EC خاک از بکارگیری بیوپارهای تولید شده در دمای گرماکافت ۵۰۰ درجه سلسیوس با سطح مصرف ۱۰ درصد وزنی حاصل گردید. بکارگیری این تیمارها pH و EC خاک را نسبت به تیمار شاهد (خاک بدون بیوپار و کربن فعال) افزایش داد. در مقابل تیمارهای کربن فعال ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس با سطح مصرف ۱۰ درصد دارای کمترین مقدار pH بودند. بکارگیری این تیمارها اگرچه EC خاک را نسبت به تیمار شاهد اندکی افزایش داد ولی باعث کاهش نسبتاً قابل ملاحظه و معنی‌دار pH نسبت به تیمار شاهد شدند (جدول ۹).

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود بیوپارهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس دارای pH و EC بیشتری نسبت به ضایعات آلی اولیه و کربن‌های فعال ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس دارای pH و EC کمتری نسبت به ضایعات آلی اولیه بودند و همان‌طور که انتظار می‌رفت بکارگیری بیوپارهای ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس باعث افزایش EC و pH خاک نسبت به خاک شاهد شدند. در مقابل بکارگیری کربن‌های فعال ۳۰۰ و ۵۰۰ درجه سلسیوس باعث کاهش pH خاک نسبت به تیمار شاهد شد و EC را نسبت به خاک شاهد اندکی افزایش داد. بنابراین، علت مختلف بودن میزان pH و EC خاک‌های تیمار شده با جاذب‌های مختلف را می‌توان به خصوصیات جاذب شامل جنس و نوع ضایعات آلی اولیه، شرایط گرماکافت و فعال‌سازی (دما، نرخ افزایش حرارت و زمان ماندگاری)، نوع و ماهیت ماده فعال‌کننده، روش فعال‌سازی و سطح مصرف آن در خاک نسبت داد (جدول ۳). گیوشتین و همکاران (Gusiatin et al., 2016)، سو و همکاران (Xu et al., 2016)، احمد و همکاران (Ahmad et al., 2017) و ماله‌میر چگینی و همکاران (Malehmir Chegini et al., 2017).

جدول ۹- مقایسه میانگین اثرات متقابل نوع و سطح جاذب بر میزان pH و EC خاک
Table 9- Mean comparison of adsorbent type and surface interaction effects on soil pH and EC

			pH	EC
نوع جاذب Adsorbent type		سطح مصرف (%) Consumption level	-	(dS m ⁻¹)
کاه و کلش گندم Wheat straw	زیست توده اولیه Primary biomass	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.41 qnpo	4.66 hg
		5	7.30 qsrp	5.72 e
		10	7.20 qsrt	6.75 d
بیوچار گندم Wheat biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.85 fge	5.80 e
		5	8.01 d	6.67 d
		10	8.50 b	7.77 b
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.95 de	6.42 d
		5	8.23 c	7.22 c
		10	8.80 a	13.52 a
کربن فعال گندم Wheat active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.24 usrt	2.57 vwuts
		5	7.02 vw	2.72 vwuts
		10	6.94 W	2.84 vrwuts
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.14 uvt	2.92 vrquts
		5	6.96 w	2.96 vrquts
		10	6.65 y	3.10 rqpts
پوست گردو Walnut shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.50 mnkl	3.23 rqpos
		5	7.46 mnlo	3.43 qpon
		10	7.25 usrt	4.26 ihkj
بیوچار گردو Walnut biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.68 ijh	3.39 rqpon
		5	7.76 fgh	3.82 mlkj
		10	7.90 fde	4.2 ihkj
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.74 igh	3.45 mqpon
		5	7.90 fde	3.98 mlkj
		10	8.02 d	4.85 fg
کربن فعال گردو Walnut active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.42 qnpo	3.10 rqpts
		5	7.29 qsrp	2.33 w
		10	6.88 xw	3.74 mlkon
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.35 qnrpo	3.46 mqpon
		5	7.26 usrt	3.02 vrquts
		10	6.74 y	3.79 mlkn
پوست بادام Almond shell	زیست توده اولیه Primary biomass	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.49 mnkl	3.34 rqpon
		5	7.50 mnkl	3.65 mlon
		10	7.48 mnklo	4.50 ihg
بیوچار بادام Almond biochar	بیوچار ۳۰۰ °C Biochar 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.59 mjkl	3.61 mlkj
		5	7.61 ijkl	4.06 ihj
		10	8.02 d	4.95 fg
	بیوچار ۵۰۰ °C Biochar 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.62 ljk	3.86 mlpon
		5	7.90 fde	4.33 ilkj
		10	8.20 c	5.25 f
کربن فعال بادام Almond active carbon	کربن فعال ۳۰۰ °C Active carbon 300 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.33 qsrpo	2.84 vrwuts
		5	7.12 uv	2.85 vrwuts
		10	6.78 xy	2.46 vw
	کربن فعال ۵۰۰ °C Active carbon 500 °C	0	7.44 mnpo	2.50 vwu
		2.5	7.44 mnpo	3.23 rqpos
		5	7.19 ust	3.03 rquts
		10	6.89 xw	2.84 vrwuts

حروف متفاوت در هر ستون نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح ۵٪ بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن است.

Different letters in each column indicate a significant difference at the 5% level based on Duncan's multiple range test.

گیرد. همچنین، پیشنهاد می‌شود که نوع ضایعات آلی، دمای پیرولیز و روش فعال‌سازی بیوچارها به گونه‌ای تغییر کند که برای غیرفعال کردن هر فلز سنگین، کربن فعال اختصاصی آن تهیه شود. "هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

با توجه به حضور فلزات سنگین در بافت‌های گیاه ذرت حتی بعد از استفاده از کربن فعال در خاک، توصیه می‌شود که از کربن فعال برای اصلاح خاک‌های با آلودگی کم تا متوسط استفاده شود. از آنجا که این آزمایش در گلخانه انجام شد، پیشنهاد می‌شود آزمایشات مزرعه‌ای بلندمدت برای بررسی میزان تأثیر و دوام اثر کربن فعال انجام پذیرد و اثر آن نیز بر جامعه میکروبی خاک مورد مطالعه قرار

References

- Aggarwal, P., Choudhary, K.K., Singh, A.K., & Chakraborty, D. (2006). Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management. *Geoderma*, 136(1-2), 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.04.004>
- Ahmad, M., Lee, S.S., Lee, S.E., Al-Wabel, M.I., Tsang, D.C., & Ok, Y.S. (2017). Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils. *Journal of Soils*, 17, 717-730. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1339-4>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A.U., Lim, J.E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S.S., & Ok, Y.S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, 99, 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Ahmad, M., Usman, A.R., Al-Faraj, A.S., Ahmad, M., Sallam, A., & Al-Wabel, M.I. (2018). Phosphorus-loaded biochar changes soil heavy metals availability and uptake potential of maize (*Zea mays* L.) plants. *Chemosphere*, 194, 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.156>
- Akhil, D., Lakshmi, D., Kartik, A., Vo, D.V.N., Arun, J., & Gopinath, K.P. (2021). Production, characterization, activation and environmental applications of engineered biochar: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2261-2297. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01167-7>
- Bandara, T., Franks, A., Xu, J., Bolan, N., Wang, H., & Tang, C. (2020). Chemical and biological immobilization mechanisms of potentially toxic elements in biochar-amended soils. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(9), 903-978. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1642832>
- Biria, M., Moezzi, A., & AmeriKhah, H. (2017). Effect of Sugercan bagasse, s biochar on maize plant growth, grown in lead and cadmium contaminated soil, *Water & Soil*, 31(2), 609-626. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V31I2.55832>
- Boostani, H.R., Hardie, A.G., Najafi-Ghiri, M., & Zare, M. (2022). Chemical speciation and release kinetics of Ni in a Ni-contaminated calcareous soil as affected by organic waste biochars and soil moisture regime. *Environmental Geochemistry and Health*, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01289-7>
- Bousdra, T., Papadimou, S.G., & Golia, E.E. (2023). The use of biochar in the remediation of Pb, Cd, and Cu-contaminated soils. The Impact of biochar feedstock and preparation conditions on its remediation capacity. *Land*, 12(2), 383. <https://doi.org/10.3390/land12020383>
- Bremner, J.M., & Mulvaney, C. (1982). Nitrogen—total. Methods of soil analysis: part 2 chemical and microbiological properties, 9, 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c31>
- Brendova, K., Zemanová, V., Pavlíková, D., & Tlustoš, P. (2016). Utilization of biochar and activated carbon to reduce Cd, Pb and Zn phytoavailability and phytotoxicity for plants. *Journal of Environmental Management*, 181, 637-645. <https://doi.org/10.3390/land12020383>
- Cassel, D., & Nielsen, D. (1986). Field capacity and available water capacity. Methods of soil analysis: Part 1 Physical mineralogical methods, 5, 901-926. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c36>
- Cha, J. S., Park, S.H., Jung, S.-C., Ryu, C., Jeon, J.-K., Shin, M.-C., & Park, Y.-K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.06.002>
- Daffalla, S. (2023). Adsorption of chromium (VI) from aqueous solution using palm leaf-derived biochar: kinetic and isothermal studies. *Separations*, 10(4), 260. <https://doi.org/10.3390/separations10040260>
- Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources*, 24(5), 471-482. <https://doi.org/10.1080/00908310252889979>
- Ehyaei, M., & Behbahanizade, A. (1993). Methods of soil chemical analysis. *Soil & Water Research Institute, Technical Bulletin*. (893). (In Persian)
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle-size analysis. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods, 5, 383-411. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>
- Gusiatin, Z.M., Kurkowski, R., Brym, S., & Wiśniewski, D. (2016). Properties of biochars from conventional and

- alternative feedstocks and their suitability for metal immobilization in industrial soil. *Environmental Science & Pollution Research*, 23, 21249-21261. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7335-4>
19. Han, Y., Yin, Y., Zhang, H., Sun, S., Huang, Z., Deng, Y., & Bao, L. (2024). Adsorption effect of phosphate modified grape branch biochar on Cd₂. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12(4), 59-77. <https://doi.org/10.4236/gep.2024.124005>
20. He, L., Zhong, H., Liu, G., Dai, Z., Brookes, P.C., & Xu, J. (2019). Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar: Mechanisms, potential risks and applications in China. *Environmental Pollution*, 252, 846-855. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.151>
21. Hejazizadeh, A., Gholamalizadeh Ahangar, A., & Ghorbani, M. (2016). Effect of biochar on lead and cadmium uptake from applied paper factory sewage sludge by sunflower (*Heliantus annus* L.). *Water & Soil Science*, 26(1-2), 259-271. (In Persian with English abstract)
22. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods, 5, 551-574. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
23. Ibrahim, M., Khan, S., Hao, X., & Li, G. (2016). Biochar effects on metal bioaccumulation and arsenic speciation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) grown in contaminated soil. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 13, 2467-2474. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1081-5>
24. Inyang, M.I., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A., Mosa, A., & Cao, X. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4), 406-433. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1096880>
25. ISO 11466. (1995). Soil quality, Extraction of Trace Elements Soluble in Aqua Regia. International Organization for Standardization. Genf, Schweiz.
26. Janu, R., Mrlik, V., Ribitsch, D., Hofman, J., Sedláček, P., Bielská, L., & Soja, G. (2021). Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. *Carbon Resources Conversion*, 4, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.01.003>
27. Jeffery, S., Verheijen, F.G., van der Velde, M., & Bastos, A.C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
28. Jing, Y.-D., He, Z.-L., & Yang, X.-E. (2007). Role of soil rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Zhejiang University Science B*, 8(3), 192-207. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0192>
29. Kastori, R., Plesničar, M., Sakač, Z., Panković, D., & Arsenijević-Maksimović, I. (1998). Effect of excess lead on sunflower growth and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*, 21(1), 75-85. <https://doi.org/10.1080/01904169809365384>
30. Kloss, S., Zehetner, F., Buecker, J., Oburger, E., Wenzel, W.W., Enders, A., Lehmann, J., & Soja, G. (2015). Trace element biogeochemistry in the soil-water-plant system of a temperate agricultural soil amended with different biochars. *Environmental Science & Pollution Research*, 22, 4513-4526. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3685-y>
31. Kołodyńska, D., Krukowska, J., & Thomas, P. (2017). Comparison of sorption and desorption studies of heavy metal ions from biochar and commercial active carbon. *Chemical Engineering Journal*, 307, 353-363. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.088>
32. Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology & Biochemistry*, 43(9), 1812-1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
33. Liang, J., Yang, Z., Tang, L., Zeng, G., Yu, M., Li, X., Wu, H., Qian, Y., Li, X., & Luo, Y. (2017). Changes in heavy metal mobility and availability from contaminated wetland soil remediated with combined biochar-compost. *Chemosphere*, 181, 281-288. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.081>
34. Liang, M., Lu, L., He, H., Li, J., Zhu, Z., & Zhu, Y. (2021). Applications of biochar and modified biochar in heavy metal contaminated soil: A descriptive review. *Sustainability*, 13(24), 14041. <https://doi.org/10.3390/su132414041>
35. 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>
36. Lu, K., Yang, X., Shen, J., Robinson, B., Huang, H., Liu, D., Bolan, N., Pei, J., & Wang, H. (2014). Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to *Sedum plumbizincicola*. *Agriculture, Ecosystems & Environmental Pollution*, 191, 124-132. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.010>
37. MalehMir Chegini, M., Golchin, A., Khadem Moghadam Igdelou, N., & Moraveij, K. (2020 a). The effect of Pyrolysis temperature and type of organic residues on physicochemical properties of produced biochar. *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 51(3), 575-593. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2019.289906.668332>
38. MalehMir Chegini, M., Golchin, A., Khadem Moghadam Igdelou, N., & Moraveij, K. (2020 b). Comparison of the effect of Pyrolysis temperatures and activating materials on properties of modified biochar. *Iranian Journal of Soil & Water Research*, 51(9), 2405-2415. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2020.291647.668376>

39. Moreno-Jiménez, E., Fernández, J.M., Puschenreiter, M., Williams, P.N., & Plaza, C. (2016). Availability and transfer to grain of As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn in a barley agri-system: Impact of biochar, organic and mineral fertilizers. *Agriculture, Ecosystems & Environmental Pollution*, 219, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.001>
40. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, (Vol. 5).
41. Olsen, S.R. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate (No. 939). US Department of Agriculture.
42. Page, A.L. (1982). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*.
43. Park, J. H., Choppala, G.K., Bolan, N.S., Chung, J.W., & Chuasavathi, T. (2011). Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals. *Plant and Soil*, 348, 439-451. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0948-y>
44. Peng, H., Gao, P., Chu, G., Pan, B., Peng, J., & Xing, B. (2017). Enhanced adsorption of Cu (II) and Cd (II) by phosphoric acid-modified biochars. *Environmental Pollution*, 229, 846-853. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.004>
45. Rashid, A., Schutte, B.J., Ulery, A., Deyholos, M.K., Sanogo, S., Lehnhoff, E.A., & Beck, L. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soil: environmental pollutants affecting crop health. *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
46. Rhoades, J. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 417-435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
47. Sajjadi, B., Zubatiuk, T., Leszczynska, D., Leszczynski, J., & Chen, W.Y. (2019). Chemical activation of biochar for energy and environmental applications: a comprehensive review. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(7), 777-815. <https://doi.org/10.1515/revce-2018-0003>
48. Sastre, J., Sahuquillo, A., Vidal, M., & Rauret, G. (2002). Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in environmental samples: microwave-assisted total digestion versus aqua regia and nitric acid extraction. *Analytica Chimica Acta*, 462(1), 59-72. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(02\)00307-0](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(02)00307-0)
49. Shao, M., Ding, Z.C., Yang, Y.Z., Zhang, Z.P., & Wan, Y.S. (2024). Phosphoric acid-modified biochar enhances electrokinetic in situ leaching technology to remediate Pb²⁺ contaminated soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05568-x>
50. Sinha, P., Dube, B., Srivastava, P., & Chatterjee, C. (2006). Alteration in uptake and translocation of essential nutrients in cabbage by excess lead. *Chemosphere*, 65(4), 651-656. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.068>
51. Soudek, P., Valseca, I.R., Petrová, Š., Song, J., & Vaněk, T. (2017). Characteristics of different types of biochar and effects on the toxicity of heavy metals to germinating sorghum seeds. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.12.013>
52. Tang, L., Yu, J., Pang, Y., Zeng, G., Deng, Y., Wang, J., & Feng, H. (2018). Sustainable efficient adsorbent: alkali-acid modified magnetic biochar derived from sewage sludge for aqueous organic contaminant removal. *Chemical Engineering Journal*, 336, 160-169. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.11.048>
53. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>
54. Timofeev, I., Kosheleva, N., & Kasimov, N. (2018). Contamination of soils by potentially toxic elements in the impact zone of tungsten molybdenum ore mine in the Baikal region: A survey and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642, 63-76. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.042>
55. Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>
56. Wang, B., Gao, B., & Fang, J. (2017). Recent advances in engineered biochar productions and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(22), 2158-2207. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1418580>
57. Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1002-1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
58. Xu, P., Sun, C.-X., Ye, X.-Z., Xiao, W.-D., Zhang, Q., & Wang, Q. (2016). The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 132, 94-100. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.031>
59. Yaashikaa, P.R., Kumar, P.S., Varjani, S., & Saravanan, A.J.B.R. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
60. Yang, X., Zhang, S., Ju, M., & Liu, L. (2019). Preparation and modification of biochar materials and their application in soil remediation. *Applied Sciences*, 9(7), 1365. <https://doi.org/10.3390/app9071365>
61. Zeng, X.Y., Wang, Y., Li, R.X., Cao, H.L., Li, Y.F., & Lü, J. (2022). Impacts of temperatures and phosphoric-acid

- modification to the physicochemical properties of biochar for excellent sulfadiazine adsorption. *Biochar*, 4(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s42773-022-00143-4>
62. Zhang, G., Guo, X., Zhao, Z., He, Q., Wang, S., Zhu, Y., Yan, Y., Liu, X., Sun, K., & Zhao, Y. (2016). Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil. *Environmental Pollution*, 218, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.031>
63. Zhang, X., Gu, P., Liu, X., Huang, X., Wang, J., Zhang, S., & Ji, J. (2021). Effect of crop straw biochars on the remediation of Cd-contaminated farmland soil by hyperaccumulator *Bidens pilosa* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 219, 112332. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112332>
64. Zhang, X., Zhao, B., Liu, H., Zhao, Y., & Li, L. (2022). Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*, 26, 102288. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>

Trend Analysis of Temperature Changes in Northwest of Iran Using Extreme Indices and Its Relation to Atmospheric Circulation

Kh. Javan^{1*}, A. Movaghari²

1 and 2- Associate Professor and Assistant Professor of Climatology, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: kh.javan@urmia.ac.ir)

Received: 02-01-2024

Revised: 24-10-2024

Accepted: 26-10-2024

Available Online: 26-10-2024

How to cite this article:

Javan, Kh., & Movaghari, A. (2024). Trend analysis of temperature changes in northwest of Iran using extreme indices and its relation to atmospheric circulation. *Journal of Water and Soil*, 38(5), 629-647. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86169.1366>

Introduction

The most important effect of global warming is the increase in extreme weather events. According to AR5 reports, between 1951 and 2010, the number of warm days and nights increased and the number of cold days and nights has declined globally. In addition, the duration and frequency of hot periods, including thermal waves, have increased since the middle of the twentieth century. The trend analysis of temperature extreme indices is important in estimating the trend of global warming. Temperature Changes are affected by many complex factors. A significant part of these changes is due to the elements of the general circulation of the atmosphere and the sea surface temperature. Given that extreme weather events are one of the most devastating natural hazards and have harmful effects on different parts of society, therefore, many researchers have studied the changes in the past and future of extreme events and the mechanisms that trigger these changes. This research attempts to study the trend of changes in extreme temperature indices in North-West of Iran, and also their relation with general circulation of atmosphere.

Materials and Methods

At first, diurnal data of minimum and maximum temperature of 20 synoptic stations of the Northwest of Iran, which have long-term and reliable statistics, extracted for the period of 1986-2010 and quality control and data homogeneity of them were investigated. afterwards, 16 Extreme temperature indices introduced by ETCCDMI were applied. In general, these indices are categorized into five categories of absolute indices, based on percentiles, based on thresholds, periodic, and amplitudes that measure the frequency, severity and duration of the temperature. These indices are estimated by RClimDex software and the trend rate of the changes in indices was shown through maps. To measure the changes in the general circulation of atmosphere the annual mean circulation composites extracted for the periods of 1961-1985 and 1986 -2016 based on the reanalysis data of the NCEP / NCAR. Then the difference maps plotted using grads software.

Results

The regional trend of extreme indices and the percentage of stations with a positive and negative trend were identified and the spatial distribution of the gradient of each of the indices was mapped. The results show that all absolute temperature indices have an increasing trend. On average, the maximum temperature (TXx and TXn) has increased by about 0.04 degrees over the decade. The increase rate of TNx is about 0.03 degrees, while the TNn increased by about 0.1 degrees Celsius per decade during the study period. Therefore, in the north-west of Iran, temperature increase has mainly occurred at night. The values of cold days (TX10) and cold nights (TN10) decreased with a gradient of -0.46 and -0.42 days in the decade. The warm days (TX90) and warm nights (TN90)



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86169.1366>

have an increasing trend in 95% of the stations in the area. Frost days (FD) and icing days (IDs) have a decreasing trend, whereas, summer days (SU25) and tropical nights (TR20) have an increasing trend. The number of frost days with a gradient of -0.95 and the number of icing days with a gradient of -0.63 days in decade are decreasing. While, the number of summer days with a gradient of 0.81 and the number of tropical nights with gradient of 0.31 days in decade are increasing. In the northwest of Iran, all stations have been experiencing the increasing trend in Warm Spell Duration Index (WSDI), but the Cold Spell Duration Index (CSDI) in 70% of the stations in the region has decreased. Growing season length, as an effective index especially in agriculture, is increasing by an average of 1.1 days per decade. Based on the results of research carried out globally and at Iran, the trend of Daily Temperature Range (DTR) is negative, while this index has a positive and increasing trend in 65% of North-West stations in Iran. Except TNx and TNn indices that have positive trend in most stations in the region, Comparison of warm and cold extreme indices indicates that warm indices have a positive and incremental trend, while cold indicators show a decreasing trend. The positive gradient of these indices also corresponds to the decreasing trend of cold day and night indices, which indicates an increase in temperature and a decrease in cold days and nights. The study of large-scale changes in atmospheric circulation shows that the study area has got warmer in the spring and summer and colder in autumn and winter.

Conclusion

In this study, the trend of temperature extreme indices in North-West of Iran and its relation with the large-scale general circulation of the atmosphere have been investigated. The results show that all absolute temperature indices (TXx, TXn, TNx and TNn) are incremental. The indices of cold days (TX10) and nights (TN10) decreased with a gradient of -0.46 and -0.42 days in the decade and the indices of warm days (TX90) and warm nights (TN90) are increasing in 95% of the stations in the area. Frost days and icing days (IDs) show declining trend and summer days (SU25) and tropical nights (TR20) have an increasing trend. In the north-west of Iran, all stations have experienced an increasing trend in warm spell duration index (WSDI), but the cold spell duration index (CSDI) has been decreasing in 70% of the stations in the area. Growing season length (GSL) is increasing by an average of 1.1 days in every decade. Daily temperature range (DTR) has a positive and increasing trend in 65% of stations in north-west Iran. Comparison of warm and cold extreme indices indicates that warming indices have a positive and incremental trend, while cold indices show a decreasing trend. Study of the general circulation of atmosphere of the region by drawing and analyzing difference maps indicates that the study area has been warmer in spring and summer and colder in autumn and winter.

Keywords: Atmosphere circulation, Climate change, Northwest of Iran, Temperature indices

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸ شماره ۵، آذر- دی ۱۴۰۳، ۶۴۷-۶۲۹

تحلیل روند دمای شمال غرب ایران بر اساس مقادیر فرین و ارتباط آن با گردش کلی جو

خدیدجه جوان^{۱*} - علیرضا موقری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۵

چکیده

بررسی تغییرات وقایع حدی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم و ارزیابی اثرات آنها بر بخش‌های مختلف جامعه بسیار مهم است. هدف از این تحقیق بررسی تغییرات شاخص‌های حدی دما در شمال غرب ایران و ارتباط آنها با گردش کلی جو می‌باشد. بدین منظور ابتدا با استفاده از داده‌های دمای روزانه ۲۰ ایستگاه سینوپتیک شمال غرب ایران در دوره ۲۵ ساله (۱۹۸۶-۲۰۱۰) شاخص‌های حدی دما محاسبه شد و سپس نقشه‌های توزیع مکانی این شاخص‌ها ترسیم گردید. برای بررسی تغییرات گردش کلی جو و تأثیر آن بر وقایع حدی نیز، داده‌های گردش جو برای دوره آماری ۱۹۸۵-۱۹۶۱ به‌عنوان نماینده اقلیم پیشین و دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۸۶ به‌عنوان دوره تظاهر تغییر اقلیم بر اساس داده‌های باز تحلیل NCEP/NCAR دریافت گردید. سپس نقشه‌های تفاضل با استفاده از پارامترهای ارتفاع ژئوپتانسیل و چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، امگای سطح زمین، ضخامت جو و دمای هوای سطح زمین ترسیم گردید. نتایج بررسی تغییرات شاخص‌های حدی نشان داد در اکثر ایستگاه‌های شمال غرب ایران شاخص‌های حدی سرد رو به کاهش است، درحالی‌که شاخص‌های حدی گرم افزایش یافته است. بررسی تأثیر گردش کلی جو بر تغییرات شاخص‌های حدی نیز نشان داد که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی و افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل از طریق افزایش پایداری جو، تغییرات اقلیمی در شمال غرب ایران را تشدید نموده است. بررسی نقشه‌های تفاضل دمای فصلی نیز حاکی از این است که کل منطقه در فصول گرم و سرد سال با افزایش دما و تنها شمال استان آذربایجان غربی اندکی کاهش دمای دوره سرد سال را منعکس می‌سازد که معنادار نمی‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، شاخص‌های حدی دما، شمال غرب ایران، گردش کلی جو

مقدمه

اکوسیستم‌های طبیعی دارند (Marengo et al., 2009). بر اساس گزارش AR5 بین سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰، تعداد روزها و شب‌های گرم افزایش یافته و تعداد روزها و شب‌های سرد در مقیاس جهانی کاهش یافته است. علاوه بر این، طول مدت و فراوانی دوره‌های گرم از جمله امواج گرمایی نیز از اواسط قرن بیستم افزایش یافته است (IPCC, 2013).

تحلیل روند شاخص‌های حدی دما به‌عنوان یکی از نمودهای تغییر اقلیم، در تخمین روند گرمایش جهانی اهمیت دارد. افزایش دما نقش مهمی در افزایش شدت خشکی دارد که منجر به وقوع بیشتر رخداد فرین خشکسالی می‌شود؛ همچنین می‌تواند باعث بیابان‌زایی،

انتشار گازهای گلخانه‌ای در نتیجه رشد شهرنشینی و صنعتی شدن، موجب گرمایش جهانی و متعاقب آن تغییر اقلیم جهانی شده است (Gohari et al., 2013). بر طبق گزارش ارزیابی پنجم (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، از سال ۱۸۰۰ تا ۲۰۱۲ میانگین دمای جهانی (سطح زمین و اقیانوس) در حدود ۰/۸۵ درجه سانتی‌گراد (۱/۰۶-۰/۶۵ درجه سانتی‌گراد) افزایش یافته است (IPCC, 2013). مهم‌ترین اثر گرمایش جهانی، افزایش رخدادهای فرین اقلیمی است (Vincent & Mekis, 2019). وقایع فرین معمولاً نادر، غیرقابل پیش‌بینی و کوتاه هستند ولی اثرات مخربی بر روی کشاورزی و

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و استادیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: kh.javan@urmia.ac.ir

ارتباط این شاخص‌ها با الگوهای پیوند از دور و گردش کلی جو نشان داد که روند شاخص‌های دمایی مطابق با گرمایش جهانی است. در میان الگوهای پیوند از دور بررسی شده، شاخص پرفشار جنب حاره اقیانوس آرام غربی و نوسان شمالگان تأثیر بیشتری بر شاخص‌های دمایی داشته و در تغییر اقلیم منطقه مؤثر است (Sun et al., 2016). بررسی روند سه شاخص دمایی میانگین دما (Tmm)، بیشینه دمای بیشینه (TXx) و کمینه دمای کمینه (TNn) در حوضه یانگ تسه در چین و ارتباط آنها با گردش کلی جو نیز نشان داد که هر سه شاخص دارای روند افزایشی معنی‌دار هستند. تغییرات TXx عمدتاً تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد و تغییرات TNn عموماً متأثر از گردش کلی جو (شاخص فعالیت هوای سرد^۴ و شاخص گردش منطقه‌ای اوراسیا^۵) است. تغییرات دمای میانگین نیز حاصل ترکیب گردش کلی جو و فعالیت‌های انسانی می‌باشد (Peng et al., 2017). مطالعه تغییرات دینامیکی شاخص‌های حدی دما و ارتباط آن با الگوهای گردش‌های جوی در حوضه رودخانه سونگوا^۴ در چین نشان داد که بین شاخص فرین گرم و الگوهای نیمکره شمالی همبستگی مثبت و بین شاخص‌های سرد و این الگوها، همبستگی معکوس وجود دارد (Zhong et al., 2017). بررسی شاخص‌های حدی دما در صربستان طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۰ و ارتباط آن با الگوهای گردش کلی جو نشان داد که شاخص‌های گرم دارای روند کاهشی تا ۱۹۸۰ و روند افزایشی از ۱۹۸۰ به بعد هستند ولی شاخص‌های سرد در کل دوره دارای روند افزایشی هستند. ضریب همبستگی بین الگوهای گردش جوی و شاخص‌های حدی دما نیز نشان داد که الگوی شرق اطلس^۵ (EA) ارتباط قوی‌تری با شاخص‌های حدی دما نسبت به نوسان شمالگان و الگوی شرق اطلس - غرب روسیه^۶ (EA/WR) دارد (Ruml et al., 2017).

مطالعه تغییرات دما و بارش حدی ایران نشان داد که شاخص‌های دماهای فرین نظیر روزهای یخبندان (FD)، روزهای سرد (TX10p)، شب‌های سرد (TN10p) و اختلاف دمای روزانه (DTR) در بیشتر مناطق ایران روند منفی را نشان می‌دهند. درحالی‌که روزهای تابستانی (SU25)، روزهای گرم (TX90p) و شب‌های حاره‌ای (TR20) در بیشتر مناطق ایران روند مثبتی را نشان می‌دهد (Rahimzadeh et al., 2009). تحلیل فضایی دما و بارش بحرانی روزانه در ایران نشان داده است که بحران دماهای بالا در سواحل جنوب و مناطق مرکزی فراوان هستند، اما بحران سرما در نواحی کوهستانی شمال غرب و مناطق کوهستانی زیاد است و بحران‌های بارشی در همه جای کشور پراکنده است (Alijani, 2011). آشکارسازی تغییر اقلیم خراسان بزرگ با تحلیل شاخص‌های حدی دما نشان داد که خراسان بزرگ

کاهش منابع آب و کاهش تولیدات کشاورزی شود (Muhire & Ahmed, 2016; Tong et al., 2019). شاخص‌های حدی دما و روند تغییرات آنها در مناطق مختلف دنیا مورد بررسی قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات (Alexander et al., 2006; Aguilar et al., 2009; Vincent et al., 2011; Wang et al., 2013; Guan et al., 2014; Dashkhuu et al., 2015; Vincent; Zhang et al., 2017; Jiang et al., 2016; Walsh et al., 2020; & Mekis, 2019) اشاره کرد. این مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات قابل ملاحظه در دماهای حدی با گرمایش زمین در ارتباط هستند.

تغییرات دما تحت تأثیر عوامل پیچیده بسیاری قرار دارد. بخش قابل توجهی از این تغییرات ناشی از عناصر گردش کلی جو و درجه حرارت سطح دریا مانند نوسان شمالگان (AO)، پرفشار جنب حاره اقیانوس آرام غربی (WPSH) و شاخص انسو می‌باشد (Iqbal et al., 2016; Sun et al., 2016). علاوه بر این، تغییرات منطقه‌ای روند دما از عوامل دیگری چون تغییر کاربری زمین/پوشش زمین (Dong et al., 2013; Cao et al., 2015; Balling et al., 2016) و شهرنشینی (Stone et al., 2010) نیز تأثیر می‌پذیرد. با توجه به اینکه وقایع حدی اقلیمی یکی از مخرب‌ترین مخاطرات طبیعی بوده و اثرات زیانباری بر بخش‌های مختلف جامعه دارند، بنابراین بسیاری از اقلیم‌شناسان و همچنین محققان دیگر، به مطالعه در مورد تغییرات گذشته و آینده وقایع حدی و مکانیسم‌های بوجود آورنده این تغییرات پرداخته‌اند.

بررسی تغییرات شاخص‌های حدی اقلیمی در جنوب غربی چین و تأثیر گردش کلی جوی بر این تغییرات نشان داد که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی، افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل، تضعیف جریان مونسونی و انتقال بخار آب در قاره اوراسیا، تغییرات اقلیمی در جنوب غرب چین را تشدید نموده است (Zongxing et al., 2012). بررسی شاخص‌های حدی دما در عرض‌های بالای نیمکره شمالی در ۶۰۰ سال گذشته با استفاده از نمونه‌های رسوب دریاچه‌ای، حلقه‌های درختی و هسته‌های یخ نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ گرم‌ترین تابستان‌ها را به خود اختصاص داده‌اند (Tingley & Huybers, 2013). مطالعه تأثیر گردش کلی جو بر تغییرات شاخص‌های حدی اقلیمی در لس پلاتو^۱ در چین نشان داد که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی، افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل، تضعیف جریان مونسونی و انتقال بخار آب در قاره اوراسیا، در تشدید تغییرات اقلیمی در این منطقه نقش زیادی داشته است (Yan et al., 2014). تحلیل روند شاخص‌های حدی دما و بارش در چین طی دوره ۱۹۶۰-۲۰۱۳ بررسی

4- Songhua

5- East Atlantic

6- East Atlantic/West Russia pattern

1- Loess Plateau

2- cold air activity index

3- Eurasian zonal circulation index

است. بررسی رخدادهای حدی دمایی در استان آذربایجان شرقی نشان داد که رخداد موج گرما در دوره‌ی ۱۰ ساله اخیر در جنوب غرب، طول موج گرما در مناطق غرب و شدت موج گرما در مناطق شمالی استان از شدت بیشتری داشته‌اند (Pourasghar et al., 2021). تغییرات زمانی- مکانی مقادیر حدی دما در شمال و غرب ایران مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، شاخص‌های حدی سرد شامل تعداد روزهای یخی (ID)، تعداد روزهای یخبندان (FD) و طول مدت سرما (CSDI) در هر دو ناحیه کشور روند منفی را نشان دادند. در حالی که شاخص‌های گرم شامل تعداد روزهای تابستانی (SU)، شب‌های حاره‌ای (TR20) و طول مدت گرما (WSDI) دارای روند مثبت و معنی‌داری بودند (Nassaji Zavareh & Ghermezcheshmeh, 2023). علاوه بر این‌ها، تحقیقات دیگری نیز درباره تغییرات دماهای حدی در ایران انجام شده است؛ از آن جمله می‌توان به مطالعات برخی نویسندگان (Rahimzadeh et al., 2011, Taghavi & Mohamadi, 2007, Sohrabi & Alijani et al., 2012, Marofi et al., 2011, Alijani, 2013 و Soltani et al., 2015) اشاره کرد. با مروری بر منابع و پژوهش‌های انجام شده بر روی تغییر اقلیم در ایران با استفاده از شاخص‌های حدی می‌توان گفت که بیشتر تحقیقات انجام شده به بررسی روند این شاخص‌ها پرداخته‌اند و تاکنون دلیل این تغییرات و بررسی ارتباط آن‌ها با گردش کلی جو مورد توجه قرار نگرفته است. این پژوهش بر آن است تا ضمن بررسی روند تغییرات شاخص‌های حدی دما در شمال غرب ایران، ارتباط آنها با گردش کلی جو را نیز مورد بررسی قرار دهد.

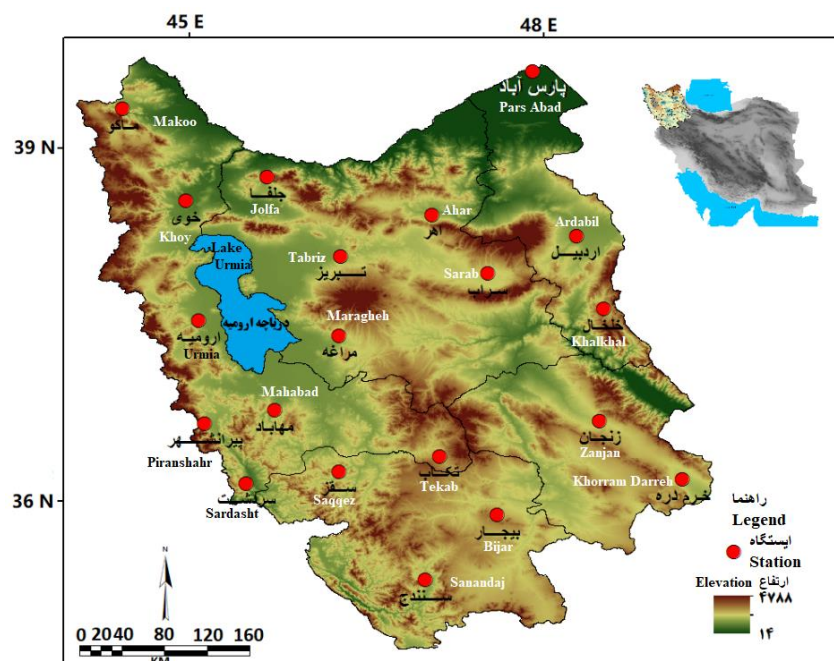
داده‌ها و روش‌ها

برای بررسی تغییرات رویدادهای حدی دما در شمال غرب ایران، از داده‌های روزانه دمای کمینه و دمای بیشینه ۲۰ ایستگاه سینوپتیک منطقه که دارای آمار بلندمدت و قابل اطمینان بودند، در دوره زمانی ۲۰۱۰-۱۹۸۶ استفاده شد. منطقه مورد مطالعه شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان می‌باشد. موقعیت جغرافیایی منطقه و پراکنش ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده است.

کنترل کیفی و همگن‌سازی داده‌ها

به دلیل اهمیت مطالعات تغییر اقلیم، سازمان هواشناسی جهانی بر کنترل کیفیت و همگنی داده‌ها قبل از انجام مطالعات تاکید دارد (WMO, 2009). در اولین قدم، کنترل کیفی و همگنی داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

تغییرات شدید دمایی را از نوع گرمایشی طی ۲۵ سال اخیر تجربه کرده و با توجه به رفتارسنجی شاخص‌ها، شدت این تغییرات در دهه‌های آتی افزایش بیشتری داشته است (Ahmadi et al., 2015). تحلیل روند شاخص‌های حدی دما در شمال غرب ایران با استفاده از روش من- کندال و تحلیل موجک نشان‌گر کاهش فراوانی شاخص‌های حدی سرد و افزایش فراوانی شاخص‌های حدی گرم است. همچنین شاخص‌های سرد دارای نوسان‌های دوره‌ای معنی‌دار طی چرخه‌های زمانی ۲ تا ۴ ساله بوده و در بین شاخص‌های گرم، تنها شاخص بیشینه دمای بیشینه (TXx) در چرخه‌های زمانی ۲ تا ۴ ساله و شاخص شب‌های حاره‌ای (TR20) در چرخه‌های زمانی ۴ تا ۸ ساله محدوده‌های معنی‌داری را نشان دادند (Alijani & Faragzadeh, 2015). شناسایی تغییر اقلیم در ایران با استفاده نمایه‌های تغییر اقلیم نشان داده است که شاخص‌های فرین گرم طی دوره مورد مطالعه رو به افزایش است در حالی که روند شاخص‌های فرین سرد منفی و رو به کاهش است. امواج گرمایی طولانی‌تر شده و برعکس، امواج سرد کوتاه‌تر شده‌اند (Darand, 2015). بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران نیز نشان داد که شاخص‌های حدی گرم روند افزایشی دارند که این روند برای شاخص‌هایی مانند روزهای تابستانی، تعداد شب‌های حاره‌ای، روزها و شب‌های گرم معنادار بود. در حالی که شاخص‌های حدی سرد روند کاهشی دارند که نشان‌دهنده کاهش شدت و فراوانی رویدادها و روزها و شب‌های سرد است. روند کاهشی و منفی بارش در بررسی همه شاخص‌های بارش، وجود داشت، هر چند تعداد کمی روند معنی‌دار در طول دوره مورد مطالعه مشاهده شد (Kouzegaran & Mousavi, 2015). بررسی اثر گرمایش جهانی بر تغییرات دماهای فرین طی دهه‌های آینده در ایران نیز نشان داد دورنمای فرین‌های گرم ایران بر اساس شبکه عصبی خودسازمانده^۱ (SOM) را می‌توان به ۹ ناحیه تقسیم نمود. همچنین در دهه‌های آینده بیشینه دماهای فرین در نیمه غربی و نوار ارتفاعی رخ خواهد داد و کمینه رخداد فرین گرم نیز مربوط به دشت کویر و جنوب شرق کشور خواهد بود (Ahmadi et al., 2017). تحلیل روند شاخص‌های حدی دما نشان‌دهنده تغییرات معنادار در حوضه دریاچه ارومیه در طول سه دهه اخیر می‌باشد. در کل شاخص‌های حدی سرد به طور قابل توجهی کاهش یافته و در مقابل، شاخص‌های گرم افزایش یافته است. علاوه بر این روند روزهای سرد/ گرم بیشتر از شب‌های سرد/ گرم است که نشان‌دهنده افزایش روند دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه می‌باشد (Azizzadeh & Javan, 2018). ارزیابی روند شاخص‌های حدی اقلیمی در ایران توسط فتحیان و همکاران (Fathian et al., 2020) نیز نشان‌دهنده روند افزایشی شاخص‌های گرم و روند کاهشی شاخص‌های سرد بوده



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب ایران
Figure 1- Geographical location of the study area and the studied synoptic stations in the northwest of Iran

می‌باشد. (TN90p)

شاخص‌های آستانه‌ای: شامل شاخص‌هایی است که با تعداد روزهایی که دما از یک آستانه ثابت عبور می‌کند، بیان می‌شوند. تعداد سالانه روزهای یخی (ID)، روزهای یخبندان (FD)، شب‌های حاره‌ای (TR20) و روزهای تابستانی (SU25) در این طبقه قرار می‌گیرند. شاخص‌های دوره‌ای: این شاخص‌ها بیانگر دوره‌های خیلی گرم، خیلی سرد و طول فصل رشد هستند. طول دوره گرما (WSDI)، طول دوره سرما (CSDI) و طول دوره رشد (GSL) در این دسته قرار دارند. شاخص دامنه‌ای: این شاخص شامل دامنه تغییرات شبانه‌روزی دما (DTR) است (Alexander et al., 2006).

این شاخص‌ها توسط نرم‌افزار RCLimDex برآورد می‌شود. این نرم‌افزار بر اساس آستانه‌های تعریف شده برای هر شاخص، این شاخص‌ها را استخراج و میزان شیب آن‌ها را از طریق روش رگرسیون محاسبه می‌کند. هدف از این فرآیند، تعیین مجموعه استلندارد از شاخص‌هایی است که بتوان توسط آنها ویژگی‌های مناطق مختلف را بررسی و مقایسه نمود. با استفاده از این نرم‌افزار، شاخص‌های ۱۶ گانه محاسبه شده و روند و نرخ روند تغییرات شاخص‌ها به صورت نقشه نشان داده شد.

در این تحقیق کنترل کیفی داده‌ها و ارزیابی همگنی آنها با بسته نرم‌افزاری RCLimDex انجام شد. این برنامه در اولین اجرا مقادیر غیرمنطقی دما همچون کمتر بودن بیشینه دمای روزانه نسبت به کمینه دمای روزانه را استخراج و تصحیح می‌کند. همچنین داده‌های پرت شناسایی می‌شود. برای ارزیابی همگنی داده‌ها نیز از روش ران تست استفاده شده است.

شاخص‌های حدی دما

جهت بررسی تغییرات شاخص‌های حدی دما در شمال غرب ایران از ۱۶ شاخص حدی دمای معرفی شده توسط تیم کارشناسی آشکارسازی تغییر اقلیم و شاخص‌ها^۱ (ETCCDI) استفاده شد. فهرست این شاخص‌ها در جدول ۱ آمده است. به طور کلی این شاخص‌ها در ۵ دسته زیر تقسیم‌بندی شده‌اند که فراوانی، شدت و مدت دما را ارزیابی می‌کنند.

شاخص‌های مطلق: دربرگیرنده بیش‌ترین و کم‌ترین دمای بیشینه و کمینه در یک سال است که شامل شاخص‌های TN_x , TX_n , TX_x و TN_n هستند.

شاخص‌های بر پایه صدک‌ها: این شاخص‌ها به ترتیب شامل وقوع روزها و شب‌های سرد و گرم (TN_{10p} , TX_{90p} , TX_{10p}) و

1- Expert Team on Climate Change Detection and Indices

جدول ۱- فهرست و تعاریف شاخص‌های حدی دما

Table 1- List and definitions of temperature extreme indices

شاخص Index	نام Name	تعریف Definition
TX _x	بیشینه دمای بیشینه Maximum TX	بیشترین مقدار سالانه دمای بیشینه روزانه Monthly maximum value of daily maximum temp
TX _n	کمینه دمای بیشینه Minimum TX	کمترین مقدار سالانه دمای بیشینه روزانه Monthly minimum value of daily maximum temp
TN _x	بیشینه دمای کمینه Maximum TN	بیشترین مقدار سالانه دمای کمینه روزانه Monthly maximum value of daily minimum temp
TN _n	کمینه دمای کمینه Minimum TN	کمترین مقدار سالانه دمای کمینه روزانه Monthly minimum value of daily minimum temp
TX10	روزهای سرد Cold days	درصد روزهای با دمای بیشینه کمتر از صدک ۱۰ دوره مینا Percentage of days when TX < 10th percentile
TN10	شب‌های سرد Cold nights	درصد روزهای با دمای کمینه کمتر از صدک ۱۰ دوره مینا Percentage of days when TN < 10th percentile
TX90	روزهای گرم Warm days	درصد روزهای با دمای بیشینه بیش از صدک ۹۰ دوره مینا Percentage of days when TX > 90th percentile
TN90	شب‌های گرم Warm nights	درصد روزهای با دمای کمینه بیش از صدک ۹۰ دوره مینا Percentage of nights when TN > 90th percentile
ID	روزهای یخی Icing days	تعداد روزهای با دمای بیشینه کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد در سال Annual count of days when TX < 0 °C
FD	روزهای یخبندان Frost days	تعداد روزهای با دمای کمینه کمتر از صفر درجه سانتی‌گراد در سال Annual count of days when TN < 0 °C
TR20	شب‌های حاره‌ای Tropical nights	تعداد روزهای با دمای کمینه بیش از ۲۰ درجه سانتی‌گراد در سال Annual count of days when TN > 20 °C
SU25	روزهای تابستانی Summer days	تعداد روزهای با دمای بیشینه بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد در سال Annual count of days when TX > 25 °C
WSDI	شاخص طول دوره گرما Warm spell duration index	تعداد سالانه روزهایی که دمای بیشینه کمینه ۶ روز متوالی بیش از صدک ۹۰ دوره مینا است Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile
CSDI	شاخص طول دوره سرما Cold spell duration index	تعداد سالانه روزهایی که دمای کمینه کمینه ۶ روز متوالی کمتر از صدک ۱۰ دوره مینا است Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile
GSL	طول فصل رشد Growing season Length	تعداد روزهای بین اولین دوره کمینه ۶ روزه با دمای متوسط بیش از ۵ درجه و اولین دوره ۶ روزه با دمای متوسط کمتر از ۵ درجه بعد از ژوئیه Annual count between first span of at least 6 days with TG>5 °C after winter and first span after summer of 6 days with TG<5 °C
DTR	دامنه دمایی Diurnal temperature range	تفاوت بین میزان مطلق دمای کمینه و بیشینه در یک سال Annual mean difference between TX and TN

منبع: <http://ccma/seos.uvic.ca/ETCCDMI>

آزمون روند من-کندال اصلاح شده

برای بررسی وجود روند در سری‌های زمانی شاخص‌های حدی دما از آزمون من-کندال استفاده شده است. این آزمون را می‌توان بر روی یک سری زمانی که نرمال نیست و از هیچ توزیع خاصی پیروی نمی‌کند برازش داد. از این روش برای آزمون فرض تصادفی بودن توالی داده‌ها در مقابل وجود روند استفاده می‌گردد. کاربرد این روش توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه شده است (Tabari & Sun *et al.*, 2016؛ Talaei, 2011). حذف خودهمبستگی سری‌های زمانی با استفاده از روش حامد راثو (۱۹۹۸) انجام شده است.

گردش کلی جو

برای آگاهی از تغییرات در گردش کلی بزرگ مقیاس جو و همچنین مطالعه تأثیر گردش جوی بر شرایط حدی آب و هوایی، داده‌های ترکیبی میانگین گردش^۱ جو کل سال برای دوره آماری ۱۹۸۵-۱۹۶۱ به‌عنوان نماینده اقلیم پیشین (WMO, 1986) و دوره آماری ۲۰۱۶-۱۹۸۶ به‌عنوان دوره تظاهر تغییر اقلیم از داده‌های باز تحلیل NCEP/NCAR دریافت گردید. در بسیاری از تحقیقات انجام گرفته و نیز گزارشات IPCC، شروع نمود تغییرات اقلیمی را سال

۱۹۸۶ بیان می‌کنند. سپس نقشه‌های تفاضل^۱ از طریق تفریق دوره آماری جدید از دوره آماری قدیم به منظور نمایش تغییرات گردش کلی جو در این دو دوره با استفاده از نرم‌افزار grads ترسیم گردید. نقشه‌های ترکیبی با استفاده از متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، امگای سطح زمین، چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ضخامت جو و دمای هوای سطح زمین ترسیم گردید. سپس به تحلیل نقشه‌ها اقدام گردیده و نتایج آن با خروجی شاخص‌های حدی دما مقایسه گردید تا تأثیر گردش کلی جو منطقه بر تغییرات دما مشخص گردد.

نتایج

تحلیل روند شاخص‌های حدی دما

پس از محاسبه شاخص‌های حدی دما برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در شمال غرب ایران، روند منطقه‌ای این شاخص‌ها با روش من-کندال و درصد ایستگاه‌های با روند مثبت و منفی مشخص گردید (جدول ۲) و پراکندگی فضایی شیب هر کدام از شاخص‌ها به صورت نقشه تهیه شد (شکل‌های ۲ تا ۵). شکل ۲ توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی مطلق در شمال غرب ایران را برای دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۲ و شکل ۲ دیده می‌شود تمام شاخص‌های دمایی مطلق دارای روند افزایشی هستند. شاخص‌های بیشینه دمای بیشینه (TXx) و کمینه دمای بیشینه (TXn) در ۸۵ درصد ایستگاه‌ها (۱۷ ایستگاه) دارای روند مثبت و در ۱۵ درصد (۳ ایستگاه) دارای روند منفی است. به طور میانگین، میزان دمای بیشینه در شمال غرب ایران در دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۰ حدود ۰/۰۴ درجه در دهه افزایش می‌یابد. بیش‌ترین روند افزایشی دمای بیشینه در ایستگاه‌های خوی، پیرانشهر و سردشت دیده می‌شود، لذا نیمه غربی منطقه بیشترین افزایش دما را دارد.

شاخص کمینه دمای بیشینه (TNx) و کمینه دمای کمینه (TNn) به ترتیب در ۷۵٪ و ۷۰٪ ایستگاه‌های شمال غرب ایران دارای روند افزایشی هستند. میزان افزایش شاخص TNx حدود ۰/۰۳ درجه بوده در حالی که میزان افزایش شاخص TNn حدود ۰/۱ درجه سانتی‌گراد در دهه در طول دوره مورد مطالعه می‌باشد. بیش‌ترین روند افزایشی دمای کمینه نیز در ایستگاه‌های پیرانشهر و سردشت دیده می‌شود، لذا نیمه غربی منطقه بیشترین افزایش دمای کمینه را نیز دارد. بنابراین در شمال غرب ایران افزایش دما عمدتاً در دمای شبانه و دمای کمینه رخ داده است. به عبارت دیگر افزایش دمای این منطقه به دلیل کاهش تابش‌های خروجی (که تعیین کننده دمای شبانه است) می‌باشد که این تابش‌های خروجی نیز متأثر از مقدار گازهای گلخانه‌ای جو هستند. فتحیان و همکاران (Fathian et al., 2020) و دارند (Darand, 2020)

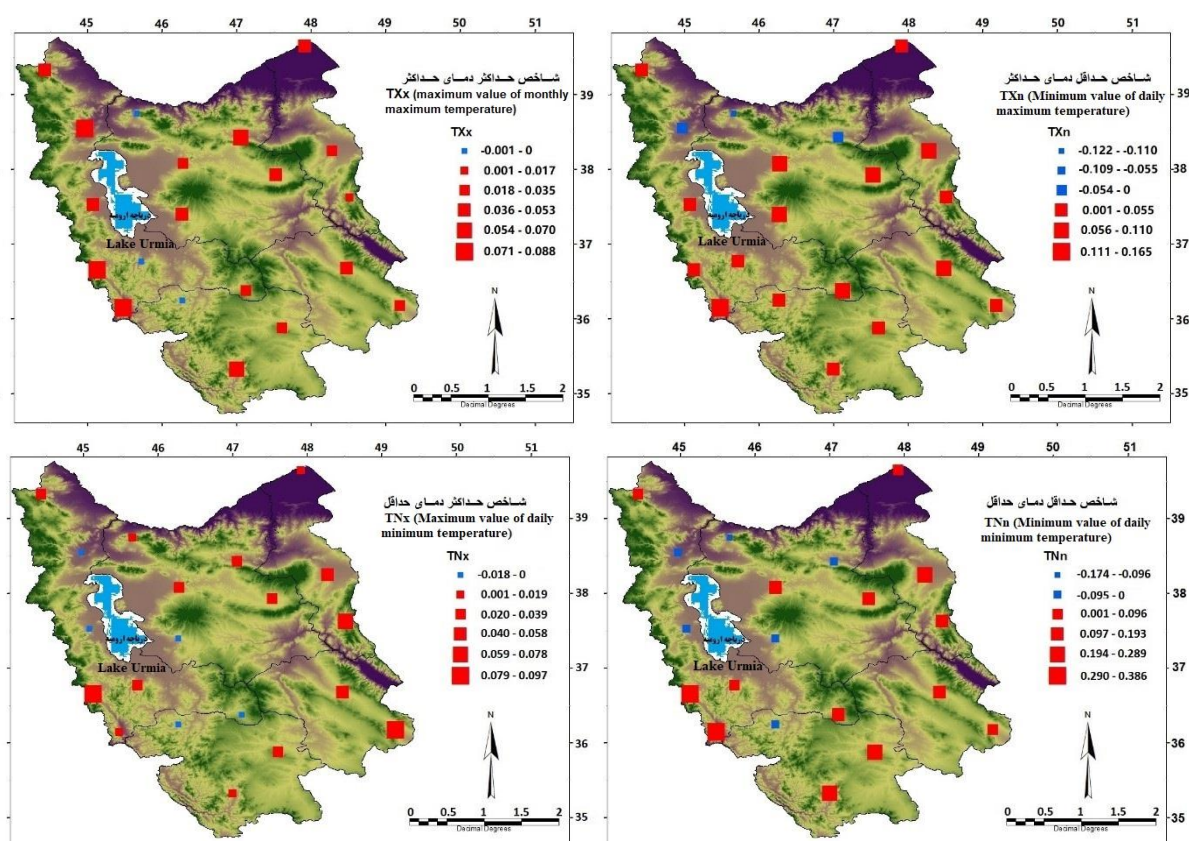
نشان دادند شاخص‌های دمایی مطلق در ایران رو به افزایش است و عزیززاده و جوان (Azizzadeh & Javan, 2018) در حوضه دریاچه ارومیه نیز به چنین نتایجی دست یافتند که با یافته‌های تحقیق حاضر مطابقت دارند. رحیم زاده و همکاران (Rahimzadeh et al., 2009) نیز روند افزایشی شاخص‌های TXn، TNn و TNx در بیشتر قسمت‌های ایران را نشان دادند.

توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی بر پایه صدک‌ها شامل روزهای گرم (TX90)، روزهای سرد (TX10)، شب‌های گرم (TN90) و شب‌های سرد (TN10) در شکل ۳ آورده شده است. همان طور که در این شکل ملاحظه می‌شود مقدار شاخص روزهای سرد و شب‌های سرد در کل منطقه مورد مطالعه با شیب ۰/۴۶- و ۰/۴۲- روز در دهه کاهش یافته است. بیشترین روند کاهشی روزهای سرد در ایستگاه‌های سردشت، مراغه، پیرانشهر و بیشترین روند کاهشی شب‌های سرد در ایستگاه‌های سردشت، پیرانشهر و بیجار دیده می‌شود. لذا قسمت‌های غربی منطقه شدیدترین روند کاهشی را تجربه کرده‌اند. به نظر می‌رسد که عواملی مانند رشد شهرنشینی، افزایش ترافیک، مصرف زیاد سوخت‌های فسیلی و ... سبب افزایش گازهای گلخانه‌ای و در نهایت کاهش روزها و شب‌های گرم می‌شود.

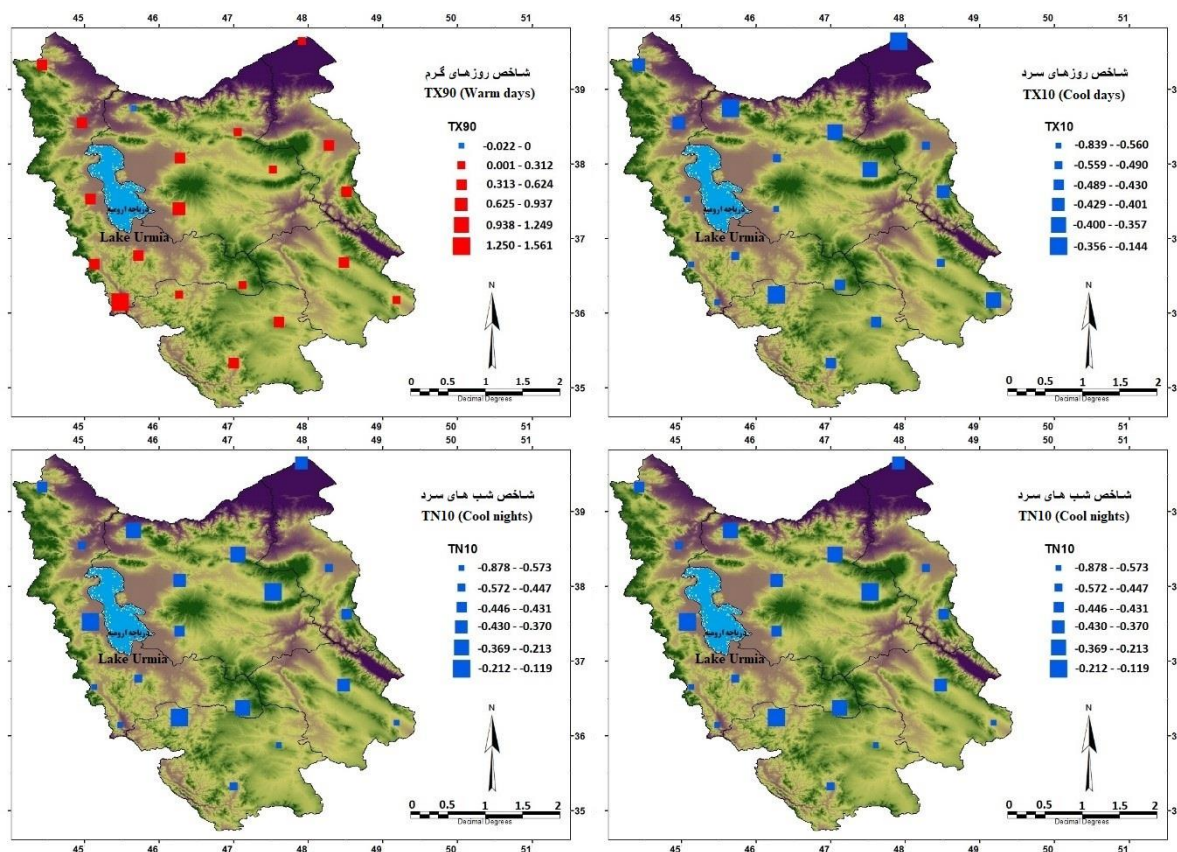
مقدار شاخص روزهای گرم و شب‌های گرم در ۹۵ درصد ایستگاه‌های منطقه دارای روند افزایشی هستند. شاخص سالانه روزهای گرم با میانگین شیب ۰/۴۱ روز در دهه در حال افزایش می‌باشد. ایستگاه‌های سردشت، مراغه، پیرانشهر شدیدترین افزایش را طی دوره مورد مطالعه تجربه کرده‌اند. در این میان ایستگاه جلفا با شیب ۰/۰۲- تنها ایستگاهی است که دارای روند کاهشی روزهای گرم می‌باشد. مقدار شاخص شب‌های گرم نیز با شیب ۰/۴۵ روز در دهه افزایش یافته است. ایستگاه‌های پیرانشهر، خرمدره و سردشت بیشترین روند افزایشی شب‌های گرم را طی ۲۵ سال مورد مطالعه داشته‌اند و ایستگاه سقز با شیب ۰/۱۶- تنها ایستگاهی است که دارای روند کاهشی شب‌های گرم می‌باشد (شکل ۳). این نتایج با یافته‌های عزیززاده و جوان (Azizzadeh & Javan, 2018) مطابقت دارد. آنها در بررسی روند شاخص‌های دما در حوضه دریاچه ارومیه، روند افزایشی TX90 و TN90 و روند کاهشی TX10 و TN10 را نشان دادند. سلایرین نیز (Darand, 2015؛ Soltani et al., 2015) و فاتیان (Fathian et al., 2020) چنین نتایجی را در ایران بدست آوردند.

جدول ۲- روند منطقه‌ای شاخص‌های حدی دما و درصد ایستگاه‌های با روند مثبت و منفی در شمال غرب ایران
Table 2- Regional trend of temperature extreme indices and the percentage of stations with positive and negative trends in the northwest of Iran

شاخص دمایی Temperature Index	روند منطقه‌ای Regional Trend	دامنه Range	درصد ایستگاه‌های با روند مثبت Percentage of stations with trend positive	درصد ایستگاه‌های با روند منفی Percentage of stations with negative trend
TXx	0.036	-0.02 - 0.09	85%	15%
TXn	0.042	-0.12 - 0.16	85%	15%
TNx	0.03	-0.02 - 0.10	75%	25%
TNn	0.10	-0.17 - 0.38	70%	30%
TX10	-0.46	-0.84 - (-0.14)	-	100%
TN10	-0.42	-0.88 - (-0.12)	-	100%
TX90	0.41	-0.02 - 1.56	95%	5%
TN90	0.45	-0.17 - 1.32	95%	5%
ID	-0.63	-2.09 - 0.18	10%	90%
FD	-0.90	-2.44 - 0.29	5%	95%
TR20	0.31	-0.01 - 1.50	90%	10%
SU25	0.81	0.12 - 1.66	100%	-
WSDI	1.71	0.43 - 5.37	100%	-
CSDI	-0.11	-0.75 - 0.35	30%	70%
GSL	1.10	-0.02 - 2.75	95%	5%
DTR	0.01	-0.05 - 8.08	65%	35%



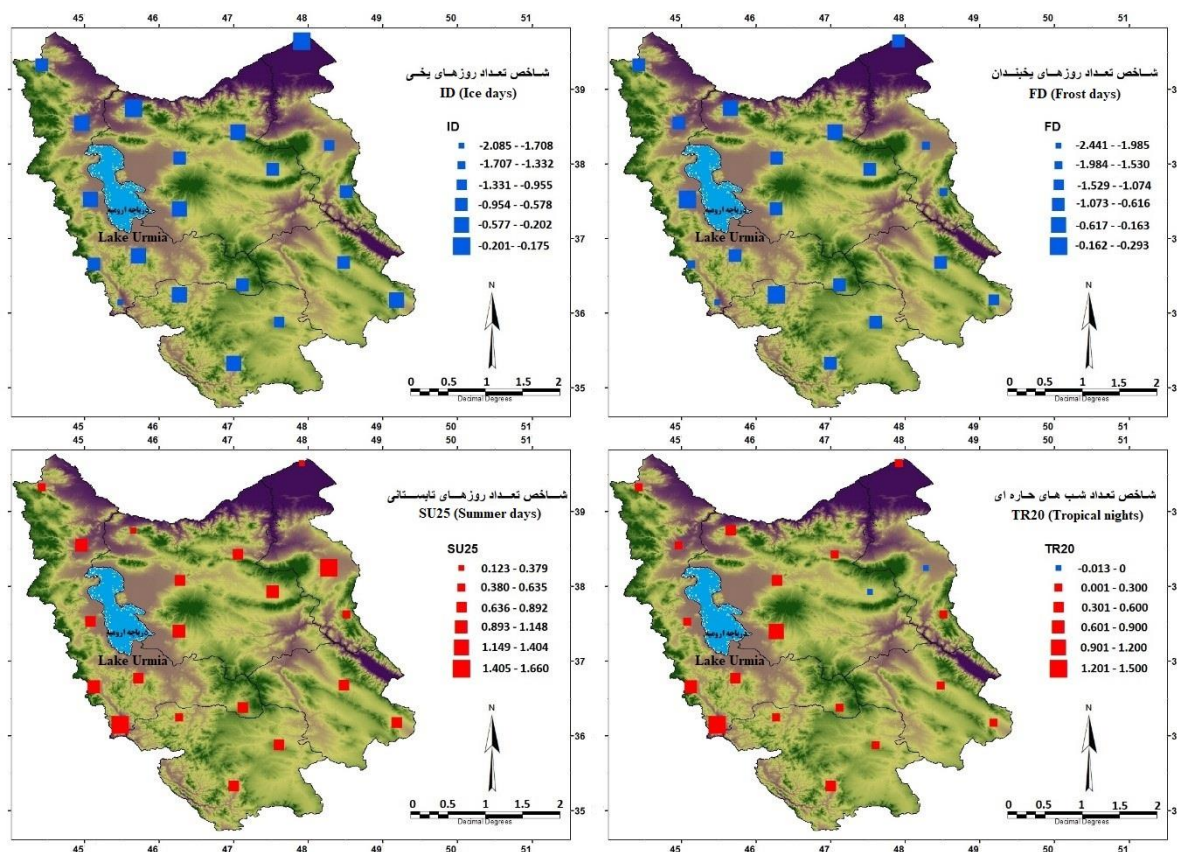
شکل ۲- توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی مطلق در شمال غرب ایران
Figure 2- Spatial distribution of slope of absolute temperature indices in northwest Iran



شکل ۳- توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی بر پایه صدک‌ها در شمال غرب ایران
Figure 3- Spatial distribution of slope of percentiles temperature indices in northwest Iran

کمترین روند در ایستگاه‌های جلفا و پارس آباد دیده می‌شود. مقدار شاخص شب‌های حاره‌ای در ۹۰ درصد ایستگاه‌های منطقه (۱۸ ایستگاه) دارای روند افزایشی هست. ایستگاه‌های سردشت، مراغه، پیرانشهر شدیدترین افزایش را طی دوره مورد مطالعه تجربه کرده‌اند. در این میان ایستگاه سراب و اردبیل دارای روند کاهشی شب‌های حاره‌ای هستند. به‌طور کلی، قسمت‌های غربی و مرکزی دارای روند افزایشی و قسمت‌های شرقی منطقه مورد مطالعه دارای روند کاهشی هستند. مطابق نتایج پژوهش‌های علیجانی و فرج زاده (Alijani & Faragzadeh, 2015) در شمال غرب ایران و سلطانی و همکاران (Soltani et al., 2015) در بیشتر ایستگاه‌های ایران بویژه در شمال غرب، شاخص‌های روزهای یخبندان و روزهای یخی دارای روند کاهشی و شاخص‌های روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای دارای روند افزایشی بوده‌اند که با نتایج پژوهش حاضر نیز مطابقت دارند. دارند (Darand, 2015) نشان داد شاخص‌های SU25 و TR20 روند افزایشی و FD روند کاهشی را نشان داده‌اند ولی نمایه روزهای یخی (ID) در طول دوره مورد مطالعه روندی را از خود نشان نداده است.

شکل ۴ توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی آستانه‌ای شامل روزهای یخبندان (FD)، روزهای یخی (ID)، روزهای تابستانی (SU25) و شب‌های حاره‌ای (TR20) در شمال غرب ایران را برای دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. همانطور که در جدول ۲ و شکل ۴ دیده می‌شود شاخص‌های روزهای یخبندان و روزهای یخی دارای روند کاهشی و شاخص‌های روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای دارای روند افزایشی هستند. تعداد روزهای یخبندان با شیب -0.90 و تعداد روزهای یخی با شیب -0.63 روز در دهه در حال کاهش است؛ در حالی که تعداد روزهای تابستانی با شیب 0.81 و تعداد شب‌های حاره‌ای با شیب 0.31 روز در دهه در حال افزایش می‌باشد. بیشترین روند کاهشی شاخص‌های روزهای یخبندان و روزهای یخی در غرب (سردشت و پیرانشهر) و شرق (اردبیل و خلخال) منطقه مورد مطالعه دیده می‌شود. ایستگاه سقز با شیب 0.29 تنها ایستگاهی است که دارای روند افزایشی روزهای یخبندان می‌باشد و ایستگاه‌های جلفا و پارس آباد نیز دارای روند افزایشی در تعداد روزهای یخی هستند. مقدار شاخص روزهای تابستانی در کل منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است که بیشترین روند افزایشی در ایستگاه‌های اردبیل و سردشت و

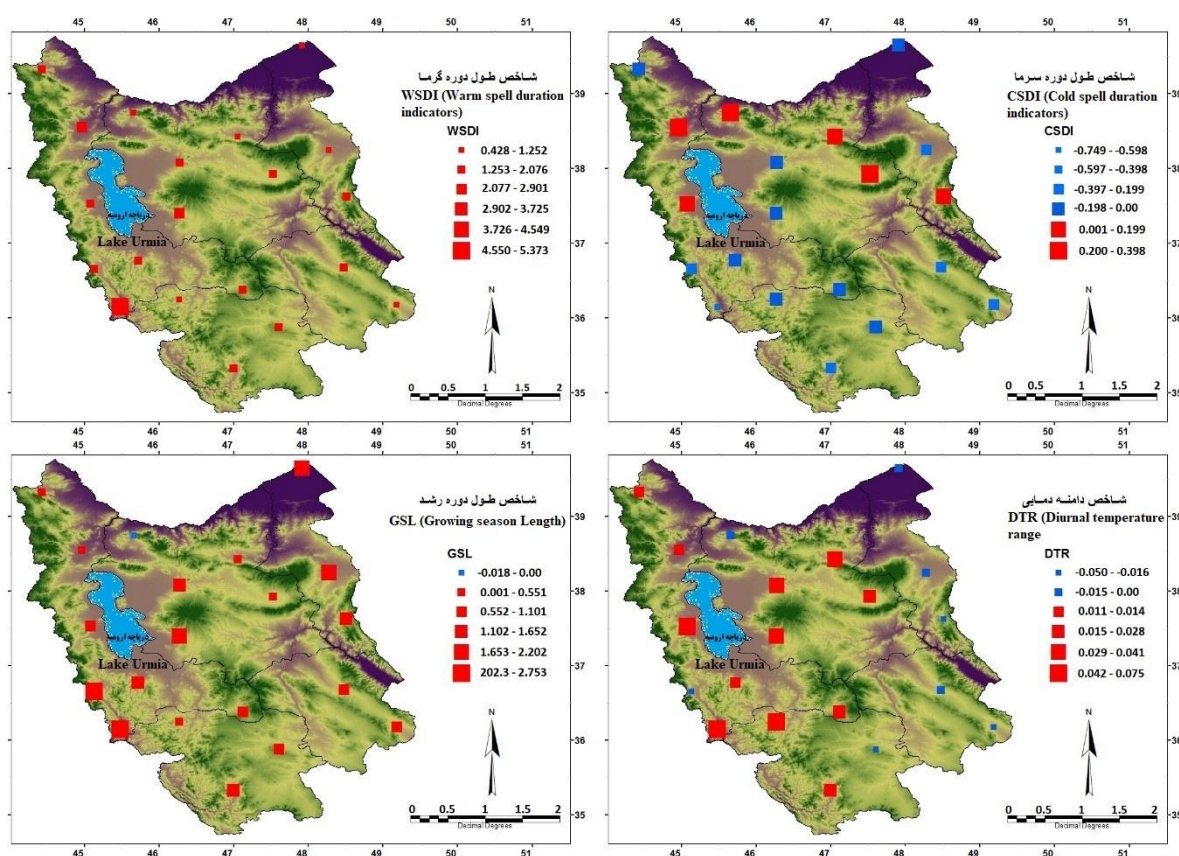


شکل ۴- توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی آستانه‌ای در شمال غرب ایران
Figure 4- Spatial distribution of slope of threshold temperature indices in northwest Iran

(Azizzadeh & Javan, 2018) برای حوضه دریاچه ارومیه؛ دارند و فتحیان و همکاران (Darand, 2015; Fathian et al., 2020) برای ایران روند افزایشی WSDI و GSL و روند کاهش CSDI را نشان دادند.

بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده در سطح جهانی (Zongxing et al., 2012; Guan et al., 2015; Ruml et al., 2017) و در سطح کشور (Darand, 2015)، روند دامنه دمایی (DTR) منفی می‌باشد. در حالی که بر اساس شکل ۵ و جدول ۲، این شاخص در ۶۵ درصد ایستگاه‌های شمال غرب ایران روند مثبت و افزایشی دارد. مشابه نتیجه فوق در تحقیقات علیجانی و فرج زاده (Alijani & Faragzadeh, 2015) نیز به دست آمده است. نرخ افزایشی این شاخص ۰/۰۱ درجه سانتی گراد به ازای هر دهه است. به عبارت دیگر دمای شبانه و روزانه با گذشت زمان به یکدیگر نزدیک خواهد شد. البته روند افزایشی و کاهش‌ی این شاخص با شیب خیلی کمی انجام گرفته است. در شمال غرب ایران، شدیدترین روند افزایشی در ایستگاه ارومیه با شیب ۰/۰۷ و شدیدترین روند کاهش با شیب ۰/۰۵- در پیرانشهر مشاهده می‌شود.

توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی دوره‌ای شامل طول دوره گرما (WSDI)، طول دوره سرما (CSDI)، طول دوره رشد (GSL) و شاخص دامنه‌ای شامل دامنه دمایی (DTR) در شکل ۵ آورده شده است. به طور کلی در شمال غرب ایران، تمامی ایستگاه‌ها روند افزایشی طول دوره گرما را تجربه کرده‌اند. میزان افزایش طول دوره گرما به طور میانگین ۱/۷ روز در دهه است و شدیدترین روند افزایشی در سردشت به میزان ۵/۳۷ روز در دهه می‌باشد. طول دوره سرما در ۷۰ درصد ایستگاه‌های منطقه دارای روند کاهش بوده که این روند با میانگین شیب ۰/۱۱- روز در دهه در حال کاهش می‌باشد. ایستگاه‌های سردشت و پیرانشهر شدیدترین کاهش طول دوره سرما را طی دوره مورد مطالعه تجربه کرده‌اند. روند افزایشی این شاخص در ایستگاه‌های شمالی منطقه مشاهده می‌شود. شاخص طول دوره رشد که یکی از شاخص‌های مؤثر بویژه در کشاورزی می‌باشد، در طی دوره مورد مطالعه در شمال غرب ایران در حال افزایش است. این شاخص در ۹۵ درصد ایستگاه‌ها دارای روند مثبت بوده و تنها ایستگاه جلفا دارای روند منفی می‌باشد. طول دوره رشد به طور میانگین ۱/۱ روز در هر دهه افزایش یافته است. علیجانی و فرج زاده (Alijani & Faragzadeh, 2015) برای شمال غرب ایران؛ عزیززاده و جوان



شکل ۵- توزیع فضایی شیب شاخص‌های دمایی دوره‌ای و دامنه‌ای در شمال غرب ایران

Figure 5- Spatial distribution of slope of periodic and range temperature indices in northwest Iran

(TN10p)، روزهای یخبندان (FD)، روزهای یخی (ID) و طول دوره سرما (SCDI) می‌باشد. شاخص‌های سرد بر خلاف شاخص‌های گرم، بیشتر روند کاهشی را نشان می‌دهند؛ به جز شاخص‌های کمینه دمایی و کمینه دمایی بیشینه که دارای روند مثبت در بیشتر ایستگاه‌های منطقه هستند. شیب مثبت این شاخص‌ها نیز با روند کاهشی شاخص‌های روزها و شب‌های سرد همخوانی دارد که بیانگر افزایش دما و کاهش روزها و شب‌های سرد می‌باشد. روند کاهشی شاخص‌های حدی سرد، نشان‌دهنده تأثیرات و پیامدهای ازدیاد جهانی گازهای گلخانه‌ای و افزایش دمای کره زمین می‌باشد. پس به‌طور کلی می‌توان گفت در شمال غرب ایران و در دوره مورد مطالعه، شاخص‌های حدی گرم روند افزایشی و شاخص‌های حدی سرد روند کاهشی دارند. این نتایج با تحقیقات سایرین (Zhang et al., 2005; Azizzadeh Soltani et al., 2015; Rahimzadeh et al., 2009; Javan, 2018) مطابقت دارد.

تغییرات در گردش بزرگ مقیاس جوی

شکل ۶-الف نقشه ترکیبی تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰

مقایسه شاخص‌های حدی گرم و سرد

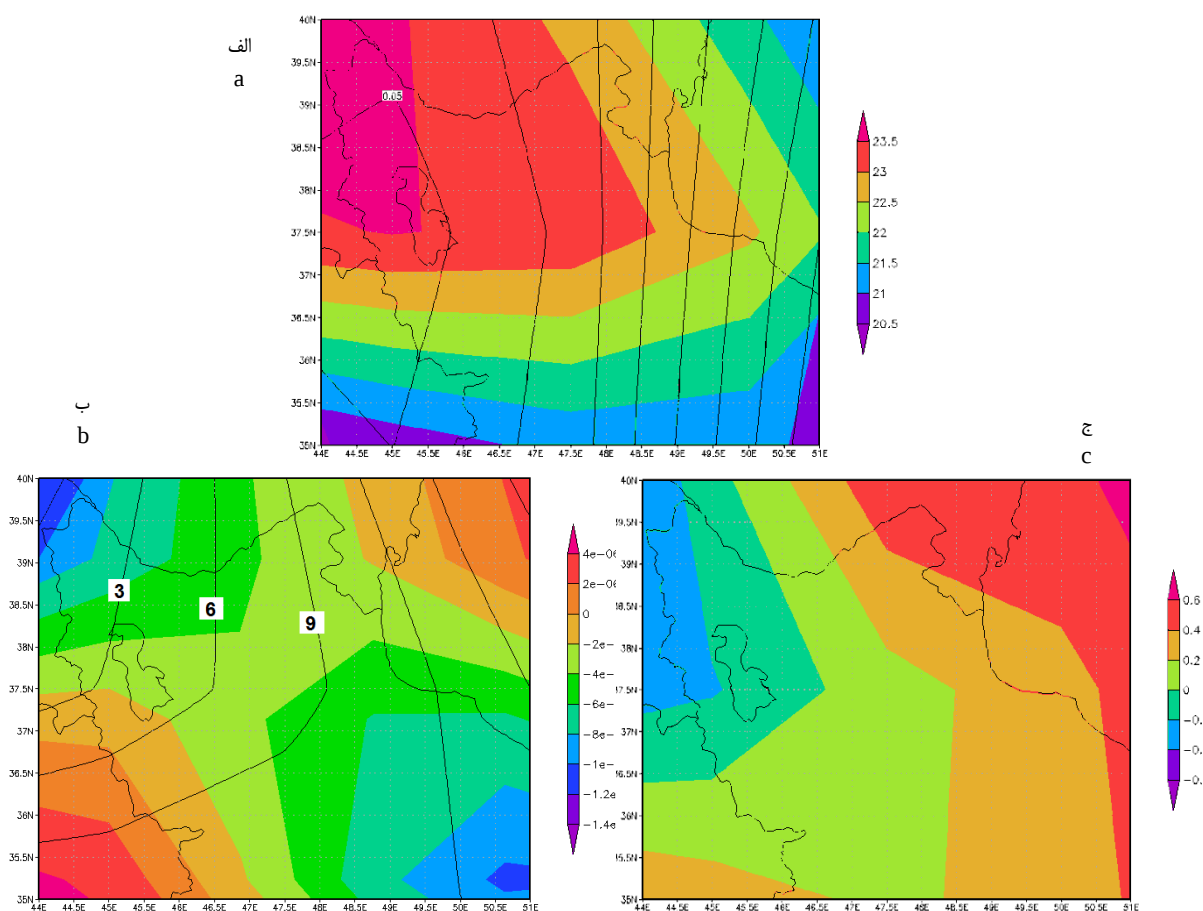
شاخص‌های حدی گرم که شامل بیشینه دمایی (TXx)، بیشینه دمایی کمینه (TNx)، روزهای گرم (TR20)، شب‌های گرم (SU25)، روزهای حاره‌ای (TX90p)، شب‌های تابستانی (TN90p) و طول دوره گرما (WSDI) و طول دوره رشد (GSL) می‌باشد، در بیشتر ایستگاه‌های منطقه دارای روند مثبت و افزایشی هستند. روند مثبت این شاخص‌ها در نتیجه تأثیرات گرمایش جهانی در اواخر قرن بیستم می‌باشد. افزایش فراوانی و شدت وقوع شاخص‌های حدی گرم، زنگ خطری برای ساکنین منطقه از منظر افزایش مرگ و میر، بوجود آمدن امراض ناشناخته و افزایش برخی از امراض بوده و نیز موجب تغییر نوع بارش‌ها، افزایش طوفان‌ها، خشکالی‌ها، نابودی نسل برخی از جانوران و گیاهان، آسیب برخی از محصولات زراعی و بوجود آمدن آفات گیاهی می‌گردد. اثرات اقتصادی- اجتماعی و زیست- محیطی امواج گرمایی نیز در مقیاس محلی بسیار زیاد بوده و می‌تواند مناطق وسیعی را تحت تأثیر قرار دهد (Alijani & Farajzadeh, 2015).

شاخص‌های حدی سرد شامل کمینه دمایی کمینه (TNn)، کمینه دمایی بیشینه (TXn)، روزهای سرد (TX10p)، شب‌های سرد

۱۹۸۵-۱۹۶۱ کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته که نشان‌دهنده تشدید جو پایدار بر روی منطقه (شمال غرب کشور) است. مشاهده نقشه ضخامت جو (نقشه پربند) نیز حکایت از افزایش ارتفاع جو منطقه در فصل زمستان دارد که این مقدار در شمال غرب کشور به ۳ متر می‌رسد. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که جو زمستانه منطقه پایدارتر گردیده است.

شکل ۶-ج نقشه تفاضل دمای هوای سطح زمین را بین سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۸۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ برای فصل زمستان نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، به غیر از شمال استان آذربایجان غربی که با کاهش دمای هوا به میزان ۰/۴ درجه مواجه شده که حاکی از سرد شدن اندک (قابل اغماض) زمستان‌های این منطقه نسبت به گذشته است، سایر منطقه مورد مطالعه افزایش دمای زمستانه را نمایش می‌دهد.

هکتوپاسکال (رنگی) و امگای سطح زمین (پربند) بین سالهای ۲۰۱۶-۱۹۸۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ در فصل زمستان را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، تمام شمال غرب با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل مواجه شده که این مقدار در استان آذربایجان غربی به ۲۴ متر می‌رسد و حاکی از تقویت سامانه پرفشار و پایداری بیشتر بر روی منطقه است. خطوط پربند، میزان امگای سطح زمین را به نمایش می‌گذارد. همانگونه که مشهود است، منطقه شمال غرب ایران افزایش میزان حرکت قائم جو به میزان ۰/۵ پاسکال بر ثانیه را نشان می‌دهد که همانند نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل، حاکی از افزایش پایداری جو منطقه در دوره ۲۰۱۶-۱۹۸۶ نسبت به دوره ۱۹۸۵-۱۹۶۱ می‌باشد. نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (رنگی) و ضخامت جو (پربند) بین سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۸۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ (شکل ۶-ب) حاکی از تشدید چرخندگی منفی بر روی منطقه است. به عبارت دیگر، در دوره ۲۰۱۶-۱۹۸۶ میزان چرخندگی نسبت به دوره



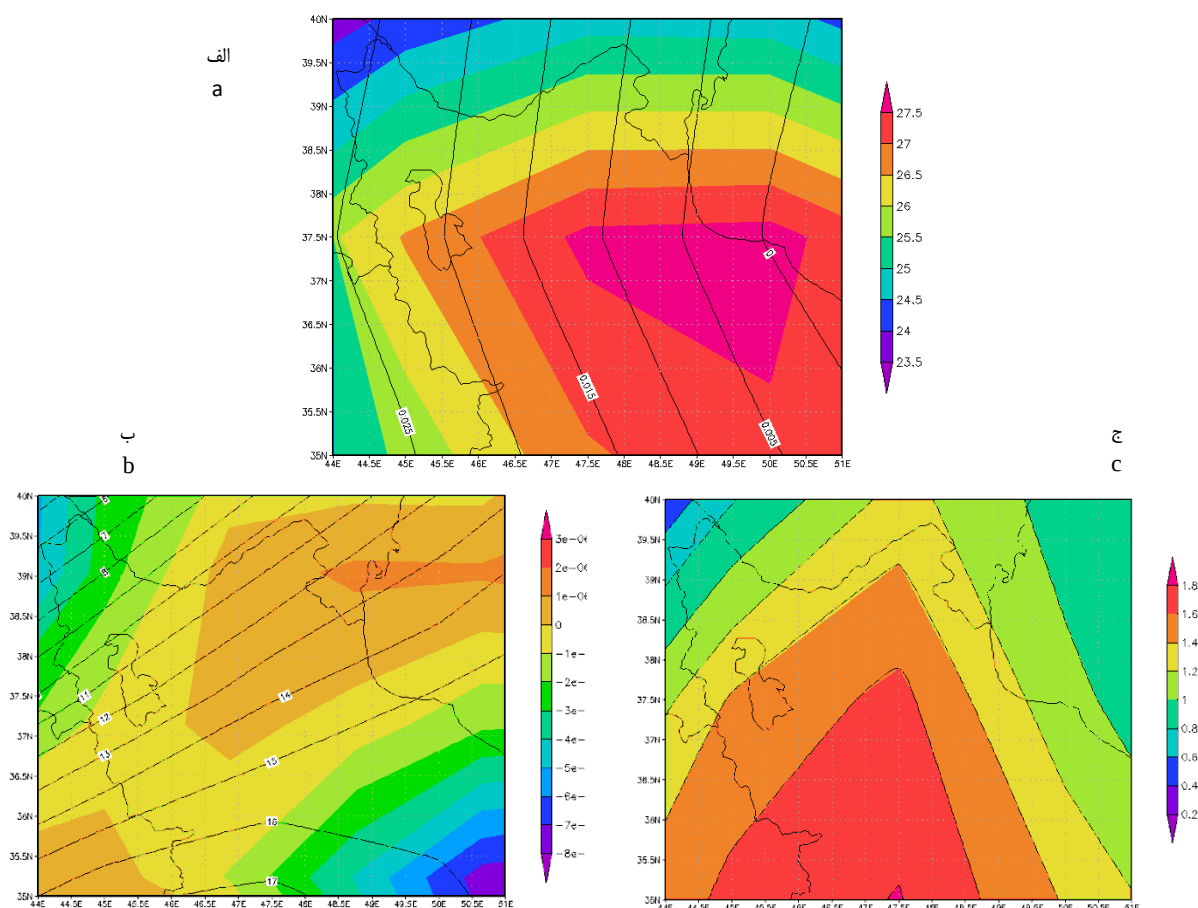
شکل ۶- نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و امگای سطح زمین (الف)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو (ب) و تفاضل دمای هوای سطح زمین (ج) برای فصل زمستان بین سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۸۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱

Figure 6- Difference map of Geopotential height at the level of 500 hPa and omega of the earth's surface (a), difference of the relative rotation at the level of 500 hpa and the atmosphere thickness (b) and the difference in surface air temperature (c) for Winter between 1986-2016 and 1961-1985

نقشه تفاضل دمای هوای سطح بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ (شکل ۷-ج) برخلاف فصل زمستان، منطقه مطالعاتی مقادیر مثبت دمای هوا را نشان می‌دهد که این مقدار حتی به ۱/۸ درجه نیز می‌رسد که حاکی از تشدید گرمایش در این فصل بر روی منطقه است.

در فصل تابستان تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ حاکی از افزایش این پارامتر در منطقه است که میزان آن حتی به ۲۷ متر می‌رسد که حکایت از تشدید پایداری جو منطقه دارد. میزان تفاضل سرعت قائم هوا (امگا) نیز همانند فصول گذشته اعداد مثبت را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تضعیف جریانات صعودی و در نتیجه گرایش منطقه به سوی جو باروتروپیک می‌باشد (شکل ۸-الف).

شکل ۷-الف نقشه ترکیبی تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (رنگی) و امگای سطح زمین (پریند) را برای فصل بهار نشان می‌دهد. همانگونه که مشهود است کل شمال غرب کشور با افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مواجه شده که این میزان به ۲۸ متر نیز می‌رسد که حاکی از تشدید جو پایدار بر روی منطقه است. میزان امگا نیز در کشور افزایش یافته که برای شمال غرب، این میزان به ۰/۰۲ پاسکال بر ثانیه می‌رسد. نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو فصل بهار (شکل ۷-ب) حاکی از کاهش چرخندگی نسبی بر روی منطقه مورد مطالعه است؛ به بیان دیگر جو بهاره منطقه پایدارتر شده است. نقشه ضخامت جو نیز افزایش ارتفاع جو را به نمایش می‌گذارد که تا ۱۵ متر نیز می‌رسد و نشان‌دهنده تقویت جو باروتروپیک بر روی منطقه است که پایداری هوای منطقه را به خوبی توجیه می‌کند. در

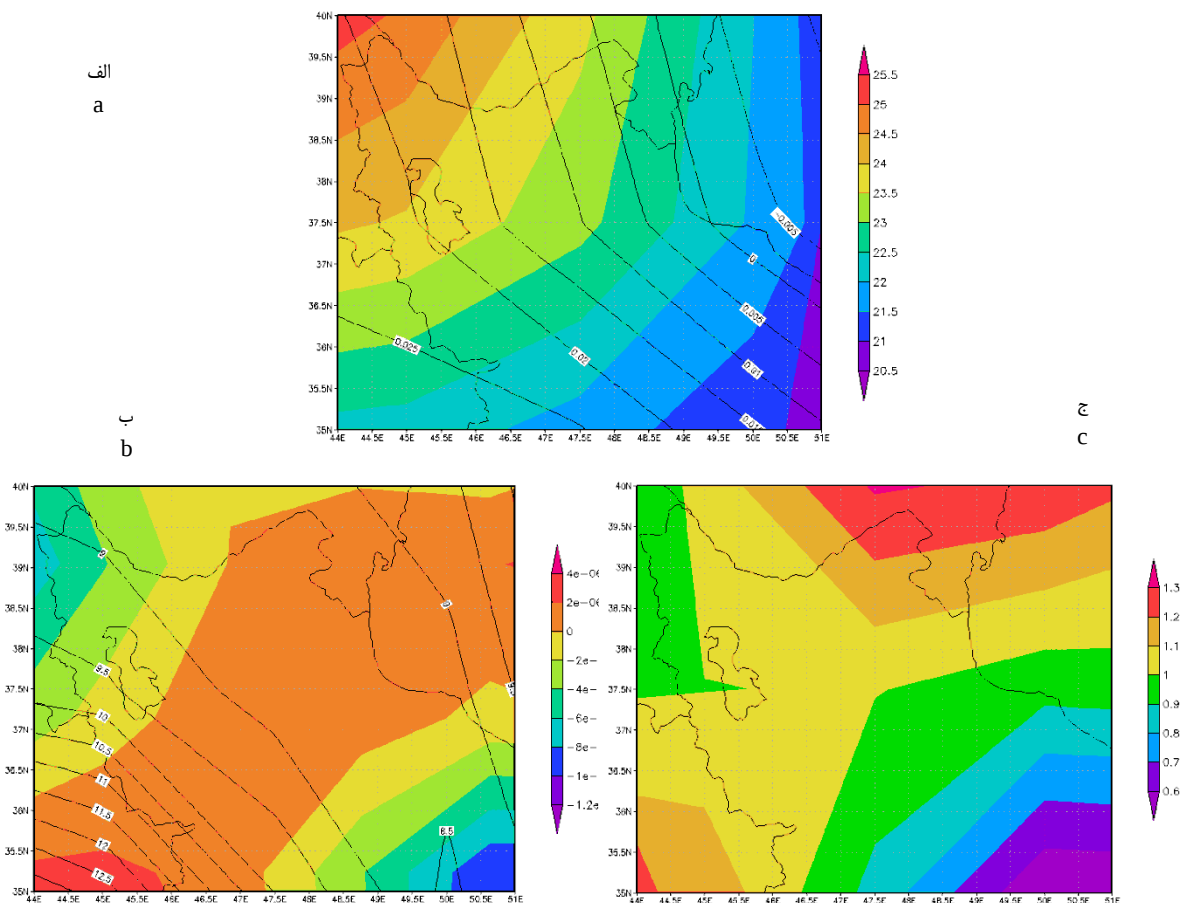


شکل ۷- نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و امگای سطح زمین (الف)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو (ب) و تفاضل دمای هوای سطح زمین (ج) برای فصل بهار بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱

Figure 7- Difference map of Geopotential height at the level of 500 hPa and omega of the earth's surface (a), difference of the relative rotation at the level of 500 hPa and the atmosphere thickness (b) and the difference in surface air temperature (C) for Spring between 1986-2016 and 1961-1985

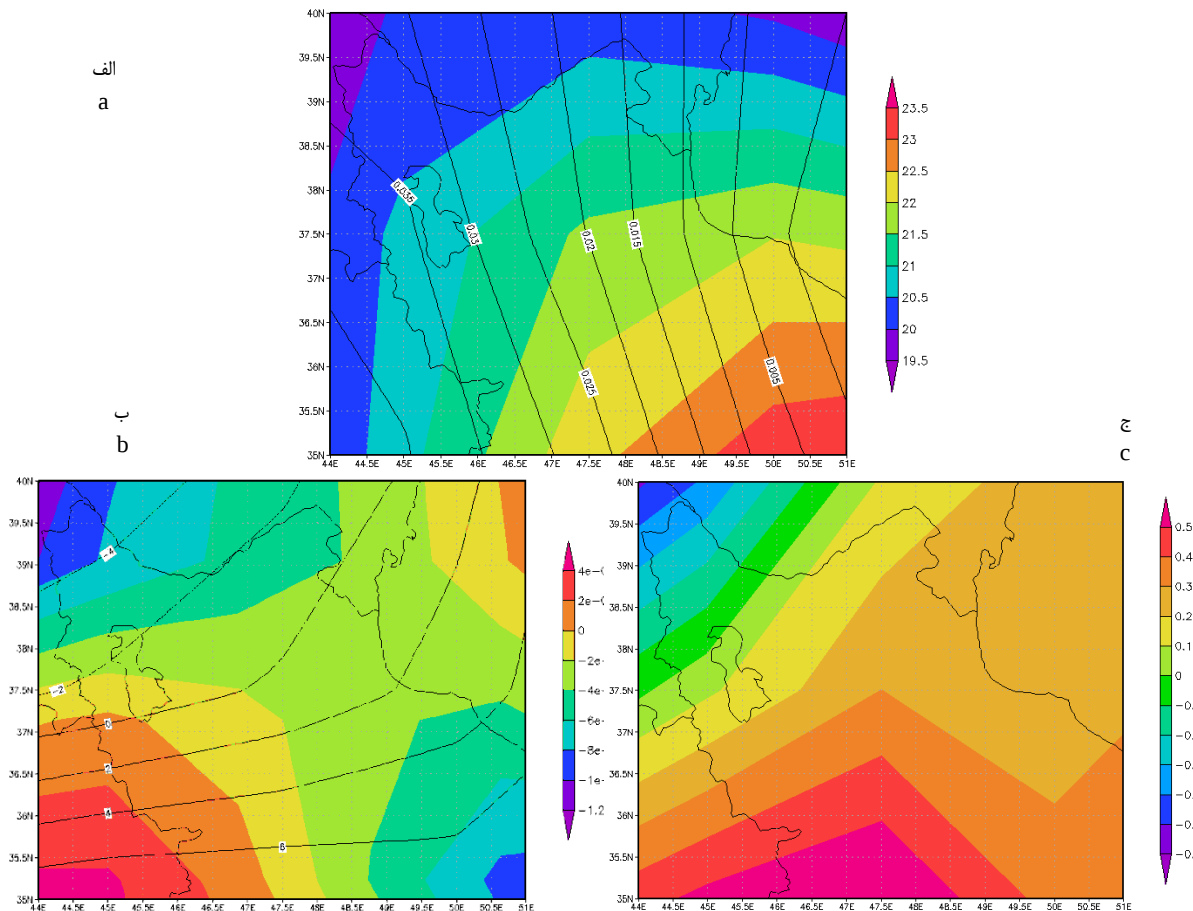
شکل ۹-الف نقشه ترکیبی تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (رنگی) و امگای سطح زمین (پربند) در فصل پاییز را نشان می‌دهد. در فصل پاییز نیز که آغاز استیلای موج بادهای غربی بر روی کشور است، تفاضل مثبت به میزان حتی ۲۳ متر در منطقه می‌رسد که نشان‌دهنده تضعیف جریانات غربی و در نتیجه حاکمیت جو پایدارتر می‌باشد. میزان حرکت قائم جو نیز همانند سایر فصول کمیت مثبت را نمایش می‌دهد که حاکی از تضعیف جریانات صعودی است که کاهش جابجایی عمود هوا را در برداشته و منجر به کمبود بارش می‌گردد. تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو فصل پاییز بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۶۱-۱۹۸۵ نیز همچنان مقادیر منفی چرخندگی را بر روی شمال غرب کشور نشان می‌دهد که به معنی تضعیف ناپایداری در این فصل بر روی منطقه است.

شکل ۸-ب نقشه ترکیبی تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو فصل تابستان را نمایش می‌دهد. همانند فصول گذشته، تفاضل چرخندگی نسبی بین دو دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۶۱-۱۹۸۵ کمیت منفی را بر روی بخش عظیمی از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تضعیف چرخندگی مثبت در سال‌های اخیر است که پایداری بیشتر جو را در برداشته است. نقشه ضخامت جو نیز کماکان مرتفع شدن جو منطقه را نشان می‌دهد. چرخندگی نسبی منفی و افزایش ضخامت جو به‌طور توامان حاکی از افزایش قدرت پرفشار جنب حاره در فصل تابستان است. **شکل ۸-ج** میزان تغییرات دما را بین دو دوره ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۶۱-۱۹۸۵ برای فصل تابستان نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، منطقه مورد مطالعه افزایش ۱.۲ درجه سلسیوس دمای هوا را ثبت کرده که حاکی از تأثیر گرمایش جهانی بر روی منطقه در این فصل از سال است.



شکل ۸- نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و امگای سطح زمین (الف)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو (ب) و تفاضل دمای هوای سطح زمین (ج) برای فصل تابستان بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۶۱-۱۹۸۵

Figure 8- Difference map of Geopotential height at the level of 500 hPa and omega of the earth's surface (a), difference of the relative rotation at the level of 500 hpa and the atmosphere thickness (b) and the difference in surface air temperature (C) for Summer between 1986-2016 and 1961-1985



شکل ۹- نقشه تفاضل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و امگای سطح زمین (الف)، تفاضل چرخندگی نسبی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و ضخامت جو (ب) و تفاضل دمای هوای سطح زمین (ج) برای فصل پاییز بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱

Figure 9- Difference map of Geopotential height at the level of 500 hPa and omega of the earth's surface (a), difference of the relative rotation at the level of 500 hPa and the atmosphere thickness (b) and the difference in surface air temperature (C) for Autumn between 1986-2016 and 1961-1985

سرد سال با افزایش دما در ایستگاه‌های جنوب منطقه و کاهش دمای اندک (قابل اغماض) در ایستگاه‌های شمال منطقه روبرو شده‌اند. به بیان دیگر کل منطقه مورد مطالعه، در بهار و تابستان گرم‌تر و در پاییز و زمستان در شمال منطقه اندکی سردتر گردیده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی روند تغییرات شاخص‌های حدی دما در شمال غرب ایران و ارتباط آن با گردش کلی بزرگ مقیاس جو پرداخته شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد تمام شاخص‌های دمایی مطلق دارای روند افزایشی هستند. بنابراین در شمال غرب ایران افزایش دما عمدتاً در دمای شبانه و دمای کمینه رخ داده است. مقدار شاخص TX10 و TN10 کاهش یافته است. مقدار شاخص TX90 و TN90 دارای روند افزایشی هستند. شاخص‌های FD و ID دارای روند کاهشی و شاخص‌های SU25 و TR20 دارای روند افزایشی هستند.

میزان تفاضل ضخامت جو نیز برای منطقه مورد مطالعه بین ۴- تا ۶ متر متغیر است که حاکی از افزایش ضخامت جو و در نتیجه پایداری بیشتر در جنوب منطقه مورد مطالعه و کاهش ضخامت جو در شمال منطقه مورد مطالعه (استان آذربایجان غربی) دارد. بطور کلی، جو پاییز منطقه نیز حاکی از تشدید پایداری و میل به جو باروتروپیک است در بخش عمده‌ای از منطقه مطالعاتی به جز ناحیه شمال غربی آن می‌باشد (شکل ۹-ب). شکل ۹-ج نقشه تفاضل دمای هوای سطح زمین را بین سال‌های ۱۹۸۶-۲۰۱۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ برای فصل پاییز نشان می‌دهد. مطابق شکل، نیمه جنوبی منطقه مطالعاتی با افزایش دما و نیمه شمالی آن با کاهش دما مواجه شده است. دلیل این امر کاهش رطوبت نسبی منطقه است که تعدیل آب و هوایی را تضعیف نموده است.

نکته حائز اهمیت در بررسی نقشه‌های تفاضل دمای فصلی این است که فصول گرم سال با افزایش دما در تمامی ایستگاه‌ها و فصول

زمستانه منطقه مورد مطالعه (شمال غرب ایران) می‌باشد. بررسی شاخص‌های حدی اقلیمی در جنوب غربی چین نشان داد که تقویت گردش آنتی‌سیکلونی و افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل، تغییرات اقلیمی در جنوب غرب چین را تشدید نموده است (Zongxing et al., 2012). در فصل بهار، علی‌رغم روند افزایشی ارتفاع ژئوپتانسیل و ضخامت جو که پایداری بیشتر جو را در پی خواهد داشت، شاهد افزایش دمای نزدیک به ۲ درجه‌ای منطقه نسبت به دوره ۱۹۸۵-۱۹۶۱ می‌باشیم. فصل تابستان نیز تقویت پرفشار جنب حاره و در نتیجه افزایش ۱/۲ درجه‌ای دمای هوا را نسبت به گذشته نشان می‌دهد. یان و همکاران (Yan et al., 2014) نیز در مطالعه خود بر روی کشور چین، به نتایج مشابهی دست یافتند. علاوه بر سایر پارامترها که تفاوت چندانی را نسبت به فصول پیش نشان نمی‌دهند، بررسی نقشه تفاضل دمای هوای سطح زمین فصل پاییز برای سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۸۶ و ۱۹۸۵-۱۹۶۱ حاکی از آن است که کل پهنه کشور به جزء شمال غربی آن، با افزایش دما مواجه شده است. تنها استان آذربایجان غربی کاهش دما به میزان ۰/۴ درجه نسبت به گذشته را نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت در بررسی نقشه‌های تفاضل دمای فصلی این است که فصول گرم سال با افزایش دما و فصول سرد سال با کاهش دما روبرو شده‌اند. به بیان دیگر منطقه مورد مطالعه، در بهار و تابستان گرم‌تر و در پاییز و زمستان سردتر گردیده است.

در شمال غرب ایران، تمامی ایستگاه‌ها روند افزایشی WSDI را تجربه کرده‌اند، ولی CSDI در ۷۰ درصد ایستگاه‌های منطقه دارای روند کاهشی بوده است و شاخص GSL در حال افزایش است. بر اساس نتایج تحقیقات انجام شده در سطح جهانی و در سطح کشور، روند DTR منفی می‌باشد؛ در حالی که این شاخص در ۶۵ درصد ایستگاه‌های شمال غرب ایران روند مثبت و افزایشی دارد. مشابه نتیجه فوق در تحقیقات علیجانی و فرج زاده (Alijani & Farajzadeh, 2015) نیز به دست آمده است. مقایسه شاخص‌های حدی گرم و سرد نشان می‌دهد که شاخص‌های گرم دارای روند مثبت و افزایشی هستند، در حالی که شاخص‌های سرد بیشتر روند کاهشی را نشان می‌دهند؛ به جز شاخص‌های کمینه دمای کمینه و کمینه دمای بیشینه که دارای روند مثبت در بیشتر ایستگاه‌های منطقه هستند. شیب مثبت این شاخص‌ها نیز با روند کاهشی شاخص‌های روزها و شب‌های سرد همخوانی دارد که بیانگر افزایش دما و کاهش روزها و شب‌های سرد می‌باشد. این نتایج در مطالعات مختلفی (Ahmadi; Darand, 2015; Azizzadeh & Javan, 2018; Nassaji Zavareh & Ghermezcheshmeh, 2023) گزارش شده است.

مطالعه گردش کلی جو منطقه با استفاده از ترسیم و تحلیل نقشه‌های تفاضل برای پارامترهای بزرگ مقیاس حاکی از تقویت پایداری جو، افزایش ضخامت آن و همچنین کاهش دمای هوای

References

1. Aguilar, E., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekang, L., Fernandes, A., Massoukina, M., & Thamba Umba, O. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2). <https://doi.org/10.1029/2008JD011010>
2. Ahmadi, M., Dadashi, A., & Ebrahimi, R. (2017). Prospects of Iran's warm climates based on the regional mesoscale model output REGCM4. *Geography*, 15(52), 67-81. (In Persian)
3. Ahmadi, M., Lashkari, H., Keykhosravi, G., & Azadi, M. (2015). Analysis of extreme temperature indicators in the detection of climate change in Greater Khorasan. *Geography*, 13(45), 53-75. (In Persian)
4. Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., & Tagipour, A. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D5). <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
5. Alijani, B. (2011). Spatial analysis of daily temperatures and precipitation extremes in Iran. *Applied Research in Geographical Sciences*, 20, 9-30. (In Persian)
6. Alijani, B., & Farajzadeh, H. (2015). Trend analysis of extreme temperature indices in the North West of Iran, *Geography and Planning*, 19(52), 229-256. (In Persian)
7. Alijani, B., Roshani, A., Parak, F., & Heidari, R. (2012). Trends in extreme daily temperature using climate change indices in Iran, *Geography and Environmental Hazards*, 1(2), 17-28. (In Persian)
8. Azizzadeh, M.R., & Javan, Kh. (2018). Trends of extreme temperature over the Lake Urmia basin, Iran, during 1987–2014. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(4), 55-72. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.233762.1006898>
9. Balling, R.C., Kiany, M.S.K., & Roy, S.S. (2016). Anthropogenic signals in Iranian extreme temperature indices. *Atmospheric Research*, 169, 96-101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.030>
10. Cao, Q., Yu, D., Georgescu, M., Han, Z., & Wu, J. (2015). Impacts of land use and land cover change on regional climate: a case study in the agro-pastoral transitional zone of China. *Environmental Research Letters*, 10(12), 124025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124025>
11. Darand, M. (2015). Assessment and detection of climate change in Iran during recent decades. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 9(30), 1-14. (In Persian)
12. Dashkhuu, D., Kim, J.P., Chun, J.A., & Lee, W.S. (2015). Long-term trends in daily temperature extremes over Mongolia. *Weather and Climate Extremes*, 8, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.11.003>

13. Dong, S., Yan, X., & Xiong, Z. (2013). Varying responses in mean surface air temperature from land use/cover change in different seasons over northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 33(3), 167-171. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.03.007>
14. Fathian, F., Ghadami, M., Haghighi, P., Amini, M., Naderi, S., & Ghaedi, Z. (2020). Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1119-1133. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03269-2>
15. Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A.M., Wang, D., & Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442, 405-419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.029>
16. Guan, Y., Zhang, X., Zheng, F., & Wang, B. (2015). Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China. *Global and Planetary Change*, 124, 79-94. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.008>
17. Hamed, K.H., & Rao, A.R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
18. IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
19. Iqbal, M.A., Penas, A., Cano-Ortiz, A., Kersebaum, K.C., Herrero, L., & Del Río, S. (2016). Analysis of recent changes in maximum and minimum temperatures in Pakistan. *Atmospheric Research*, 168, 234-249. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.016>
20. Jiang, C., Mu, X., Wang, F., & Zhao, G. (2016). Analysis of extreme temperature events in the Qinling Mountains and surrounding area during 1960-2012. *Quaternary International*, 392, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.04.018>
21. Keggenhoff, I., Elizbarashvili, M., Amiri-Farahani, A., & King, L. (2014). Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and Climate Extremes*, 4, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.05.001>
22. Klein Tank, A.M.G., Peterson, T.C., Quadir, D.A., Dorji, S., Zou, X., Tang, H., & Sikder, A.B. (2006). Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D16). <https://doi.org/10.1029/2005JD006316>
23. Kouzegaran, S., & Mousavi Baygi, M. (2015). Investigation of meteorological extreme events in the north-east of Iran. *Journal of Water and Soil*, 29(3), 750-764. (In Persian)
24. Marengo, J.A., Jones, R., Alves, L.M., & Valverde, M.C. (2009). Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15), 2241-2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>
25. Marofi, S., Sohrabi, M.M., Mohammadi, K., Sabziparvar, A.A., & Abyaneh, H.Z. (2011). Investigation of meteorological extreme events over coastal regions of Iran. *Theoretical and applied climatology*, 103(3-4), 401-412. <https://doi.org/10.1007/s00704-010-0298-3>
26. Muhire, I., & Ahmed, F. (2016). Spatiotemporal trends in mean temperatures and aridity index over Rwanda. *Theoretical and Applied Climatology*, 123(1-2), 399-414. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1353-2>
27. Nassaji Zavareh, M., & Ghermezcheshmeh, B. (2023). Assessment of spatial and temporal variability of extreme temperature by ETCCDI indices (North and West of Iran). *Journal of Environment and Water Engineering*, 9(1), 95-108. (In Persian)
28. Peng, X., She, Q., Long, L., Liu, M., Xu, Q., Zhang, J., & Xiang, W. (2017). Long-term trend in ground-based air temperature and its responses to atmospheric circulation and anthropogenic activity in the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 195, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.05.013>
29. Pourasghar, F., Eslahi, M., & Akbarzadeh, U. (2022). Studying of the extreme temperature events in East Azerbaijan for 2009-2049. *Journal of Climate Research*, 12(48), 143-156. (In Persian)
30. Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. *International Journal of Climatology*, 29(3), 329-343. <https://doi.org/10.1002/joc.1739>
31. Rahimzadeh, F., Hedayati Dezfouli, A., & Pourasgharian, A. (2011). Assessment of the process and extremes indices of temperature and precipitation in Hormozgan Province. *Geography and Development*, 9(21), 97-116. (In Persian)
32. Ruml, M., Gregorić, E., Vujadinović, M., Radovanović, S., Matović, G., Vuković, A., & Stojičić, D. (2017). Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961-2010. *Atmospheric Research*, 183, 26-41. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.08.013>
33. Sohrabi, M.M., Ryu, J.H., & Alijani, B. (2013). Spatial and temporal analysis of climatic extremes in the mountainous regions of Iran. *International Journal of Climate Change: Impacts & Responses*, 4(4). <https://doi.org/10.18848/1835-7156/CGP/v04i04/37183>
34. Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M.M., Molanejad, M., & Zavar-Reza, P. (2016). Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied*

- Climatology*, 126(3-4), 775-795. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1609-5>
35. Stone, B., Hess, J.J., & Frumkin, H. (2010). Urban form and extreme heat events: are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities? *Environmental Health Perspectives*, 118(10), 1425. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901879>
36. Sun, W., Mu, X., Song, X., Wu, D., Cheng, A., & Qiu, B. (2016). Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960–2013 under global warming. *Atmospheric Research*, 168, 33-48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.09.001>
37. Tabari, H., & Talaee, P.H. (2011). Temporal variability of precipitation over Iran: 1966–2005. *Journal of Hydrology*, 396(3-4), 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.034>
38. Taghavi, F., & Mohamadi, H. (2007). Investigation of return period of extreme climate events to identify the environmental consequences. *Journal of Environmental Studies*. 33(43), 11-20. (In Persian)
39. Tingley, M.P., & Huybers, P. (2013). Recent temperature extremes at high northern latitudes unprecedented in the past 600 years. *Nature*, 496(7444), 201-205. <https://doi.org/10.1038/nature11969>
40. Tong, S., Li, X., Zhang, J., Bao, Y., Bao, Y., Na, L., & Si, A. (2019). Spatial and temporal variability in extreme temperature and precipitation events in Inner Mongolia (China) during 1960–2017. *Science of the Total Environment*, 649, 75-89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.262>
41. Vincent, L.A., Aguilar, E., Saindou, M., Hassane, A.F., Jumaux, G., Roy, D., & Amelie, V. (2011). Observed trends in indices of daily and extreme temperature and precipitation for the countries of the western Indian Ocean, 1961–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D10). <https://doi.org/10.1029/2010JD015303>
42. Vincent, L.A., & Mekis, É. (2019). Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. In *Data, Models and Analysis* (pp. 61-77). Routledge.
43. Walsh, J.E., Ballinger, T.J., Euskirchen, E.S., Hanna, E., Mård, J., Overland, J.E., & Vihma, T. (2020). Extreme weather and climate events in northern areas: A review. *Earth-Science Reviews*, 209, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103324>
44. Wang, S., Zhang, M., Wang, B., Sun, M., & Li, X. (2013). Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973–2011. *Quaternary International*, 313, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.03.037>
45. *World Meteorological Organization (WMO) (1986). "Report of the International Conference on the assessment of the role of carbon dioxide and of other greenhouse gases in climate variations and associated impacts". Villach, Austria. Archived from the original on 21 November 2013. Retrieved 28 June 2009.*
46. World Meteorological Organization (2009). Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. Climate Data and Monitoring, WCDMP-No. 72.
47. Yan, G., Qi, F., Wei, L., Aigang, L., Yu, W., Jing, Y., & Qianqian, M. (2015). Changes of daily climate extremes in Loess Plateau during 1960–2013. *Quaternary International*, 371, 5-21. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.052>
48. Zhang, X.B., Aguilar, E., & Wallis, T. (2005). Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. *Journal of Geophysical Research*, 110. <https://doi.org/10.1029/2005JD006181>
49. Zhang, Y., Gao, Z., Pan, Z., Li, D., & Huang, X. (2017). Spatiotemporal variability of extreme temperature frequency and amplitude in China. *Atmospheric Research*, 185, 131-141. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.10.018>
50. Zhong, K., Zheng, F., Wu, H., Qin, C., & Xu, X. (2017). Dynamic changes in temperature extremes and their association with atmospheric circulation patterns in the Songhua River Basin, China. *Atmospheric Research*, 190, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.02.012>
51. Zongxing, L., He, Y., Wang, P., Theakstone, W. H., An, W., Wang, X., & Cao, W. (2012). Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961–2008. *Global and Planetary Change*, 80, 255-272. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.008>

The Effects of the Arabia Anticyclone (AA) on the Extreme and Widespread Precipitation of the Cold Season in Iran

H. Fahimi¹, A. Faraji^{2*}, B. Alijani³

1 and 2- Ph.D. in Climatology and Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

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

3- Professor, Department of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran

Received: 08-03-2024	How to cite this article:
Revised: 02-11-2024	Fahimi, H., Faraji, A., & Alijani, B. (2024). The effects of the Arabia Anticyclone
Accepted: 19-11-2024	(AA) on the extreme and widespread precipitation of the cold season in Iran.
Available Online: 19-11-2024	<i>Journal of Water and Soil</i> , 38(5), 649-667. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87969.1408

Introduction

A subtropical high system that significantly impacts the Iranian climate is the Arabia Anticyclone (Raziei, 2012). This high-pressure system is located southeast of the Red Sea, over the Arabian Peninsula and the Arabian Sea. It is one of the semi-permanent centers in the lower levels of the atmosphere, and its influence leads to notable climate changes and characteristics in the region (Karimi, 2016). This system is a component of atmospheric circulation affecting cold-period precipitation in Iran (Karimi *et al.*, 2021); due to its dynamic structure, it has a great ability to provide humid air, especially in the lower layers (Mohammadi & Lashkari, 2018). So far, some studies have been conducted on subtropical high's effect on the Iranian climate, but its impact on the occurrence of precipitation in Iran, especially during the cold period of the year, has received less attention. Therefore, in this study, we aimed to examine the role of the Arabia Anticyclone (AA) subtropical high in the pervasive extreme precipitation during the cold season in Iran. By analyzing its influence at different atmospheric levels, we sought to gain a clearer understanding of how this system affects precipitation patterns in Iran. The study also explores the changes in the AA at various atmospheric levels and its relationship with other atmospheric circulation systems, as well as how these factors contribute to the occurrence of extreme precipitation events in the region.

Materials and Methods

Daily precipitation data of Iranian synoptic stations from 1989 to the end of 2020 were extracted from the Meteorological Organization of Iran. Based on the relative index method, the 95th percentile index of extreme precipitation for all days and all the stations were calculated and extracted by MATLAB software. The criterion was as follows: If at least 20% of the synoptic stations in Iran have extreme precipitation (in case of spatial homogeneity), the days with pervasive/extreme precipitation were obtained, which amounted to 450 days in the entire period. The isohyetal map of 450 days of extreme/pervasive precipitation was drawn in Surfer software to identify the spatial homogeneity of days with extreme/pervasive precipitation because days with this kind of precipitation did not necessarily have spatial homogeneity. The 450 days with extreme/pervasive precipitation were arranged in ascending order, and 7 patterns with the highest extreme precipitation and the highest spatial homogeneity during the cold period of the year (October-March) were selected. Upper atmospheric data of the selected days were then specified to plot and analyze the synoptic maps. The required atmospheric data were geopotential altitude (meter), wind speed (m/s), wind direction, specific humidity (g/km), and average sea-level



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87969.1408>

pressure. The data used were ERA5 data extracted from <https://www.ecmwf.int>. The data were extracted at three levels: lower, middle, and upper. To synoptically analyze the selected patterns using the selected upper atmosphere data, the following maps were plotted in Grads software:

A) Combined map of geopotential altitude and winds was plotted at the selected levels to determine the geographical location of the subtropical high, its displacement at different levels of the troposphere, its penetration, and its impact on Iran.

B) Combined maps of specific humidity, geopotential altitude, and wind were plotted in order to identify the role of the subtropical high in the transfer of humidity and its transfer to Iran at different levels.

Conclusion

In selected patterns, the AA with its anticyclonic current and passing through tropical warm waters, leads to the transfer of tropical humidity to subtropical and extratropical regions. At different atmospheric levels, the location and establishment of the Anticyclone central nucleus and its degree of expansion towards the north and west are determined by the tropical penetration of the cut off lows and the western trough. The AA has the most dominance over Iran in the lower level. In fact, in the lower level, Iran is dominated by two patterns of cut off low in the western and northern regions and the AA in the southern and eastern regions.

Due to the greater penetration of the southern branch of the westerlies and the orbitalization of the western currents in the middle level, the AA is displaced eastward and southward. The interaction and accompaniment of the AA and the mid-latitude cut off low form an atmospheric river with a tropical origin. The AA plays an important role in transferring the atmospheric river to Iran and its humidity feeding. On the maps, the southerly and easterly displacement of the AA Arabia is an important factor in the lack of formation of an atmospheric river in East Central Africa. By transferring tropical humidity to Iran, the humidity of the extreme pervasive precipitation is supplied. Another major role played by the AA is to strengthen the ITCZ humidity in East Central Africa, where tropical humidity ascends through the cut off low, West trough, and jet streams. The AA takes the Indian Ocean humidity to eastern Central Africa with its anticyclonic movement. At the ground level, the AA diverts humidity from the Arabian Sea and the Persian Gulf to the western and northwestern regions, preventing Turkey low from entering the western and southwestern regions of Iran. Furthermore, by entering the South Red sea, prevents the entry of the Sudan low into the Middle East and prevents the entry of precipitation systems into Iran. However, in supplying humidity to the extreme pervasive precipitation of Iran, it plays a very important role both by creating an atmospheric river in interaction with the mid-latitude cut off low and by transferring humidity through its anticyclonic flow.

Keywords: Arabia anticyclone, Atmospheric river, Extreme and widespread rainfall, Iran

بررسی نقش پراارتفاع جنب‌حاره عربستان در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد ایران زمین

هلاله فهیمی^۱ - عبدالله فرجی^{۲*} - بهلول علیجانی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

چکیده

هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی نقش پراارتفاع عربستان بر بارش‌های فرین دوره سرد سال ایران است. به این منظور با استفاده از داده‌های ایستگاهی بارش روزانه ایران، روزهای بارش فرین استخراج شد. ۷ الگو با بیشترین بارش فرین و بیشترین همگنی مکانی جهت تحلیل‌های سینوپتیکی انتخاب گردید. با استفاده از داده‌های ERA5 نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و رطوبت ویژه ترسیم گردید. نتایج حاکی از آن است که پراارتفاع عربستان براساس موقعیت مکانی و تعامل با الگوهای گردشی عرض میانی نقش مهمی در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فصل سرد سال ایران دارد. موقعیت مکانی و میزان گسترش آن تحت‌تأثیر نفوذ حاره‌ای سامانه‌های غربی در ۲ تراز زیرین و میانی تغییر می‌یابد. بیشترین حاکمیت بر روی ایران را در تراز زیرین دارد زیرا در ترازهای بالاتر به علت نفوذ بیشتر شاخه جنوبی بادهای غربی، موقعیتی جنوبی‌تر یافته و اثرات آن بر ایران کاهش می‌یابد. طوری که از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا تأثیری بر ایران ندارد. تعامل پراارتفاع عربستان با سامانه‌های عرض میانی منجر به شکل‌گیری رودخانه جوی با منشأ حاره‌ای می‌شود. در عین حال عاملی مهم در انتقال رطوبت به شرق آفریقای مرکزی در منطقه حاره می‌باشد که محل منشأ شکل‌گیری رودخانه جوی است. در سطح زمین پراارتفاع عربستان رطوبت دریای عرب و خلیج فارس را به نواحی جنوب، جنوب‌غرب، غرب و شمال غرب می‌رساند و مانع از ورود گسترده کم‌فشار ترکیه به شمال‌غرب و غرب ایران می‌شود و با حاکمیت بر روی دریای سرخ جنوبی مانع ورود کم‌فشار سودان به خاورمیانه است. این نتیجه نشان می‌دهد که کم‌فشار سودان و مدیترانه عامل اصلی تمام بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد سال ایران نیستند. اگرچه پراارتفاع عربستان مانع ورود سامانه‌های بارشی به درون ایران است اما در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر مناطق جنوب و نیمه غرب ایران هم به‌صورت ایجاد رودخانه جوی در تعامل با سردچال عرض میانی و هم انتقال رطوبت از طریق جریان واچرخندی خود به درون ایران نقش بسیار مهمی دارد.

واژه‌های کلیدی: بارش فرین فراگیر، پراارتفاع جنب‌حاره، پراارتفاع جنب‌حاره عربستان، رودخانه جوی

مقدمه

هستند (Pepler, 2019). پراارتفاع‌های نیمه دائمی که در بیشتر ایام سال در عرض‌های جنب‌حاره و حوالی مدار ۳۰ تا ۴۰ درجه قرار دارند تحت عنوان پراارتفاع‌های جنب‌حاره شناخته شده‌اند (Zhou, 2005; Colbert, 2012; Wu, 2004) که از عناصر اصلی در ساختار گردش جوی (Karimi, 2021) و تعیین کننده قوی شرایط آب و هوا هستند (Seager, 2019). همچنین به همراه تاوه قطبی نقش مهمی در تغییر اقلیم دارند. پراارتفاع جنب‌حاره نتیجه فرونشست هوا در لبه قطبی سلول هدلی است (Seager, 2003; Rodwell, 2001) که یک محرک غالب در فصل زمستان است و در فصل تابستان توسط دیگر

پراارتفاع‌های جوی، سیستم‌های گردشی دائمی و نیمه‌دائمی

۱ و ۲- به ترتیب دکتری اقلیم‌شناسی و دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: abfaraji@znu.ac.ir)

۳- استاد گروه جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87969.1408>

افزایش بارش می‌شود. جابه‌جایی مرکز پراترفاع جنب‌حاره در میزان بارش، شدت و کاهش بارش‌های موسمی آسیا نقش مهمی دارد (Lu, 2001). پراترفاع جنب‌حاره اطلس شمالی نیز نقش مهمی در بارش‌های ایالات متحده ایفا می‌کند. حرکت رو به غرب پراترفاع اطلس شمالی (NASH¹) انتقال رطوبت و حرکت قائم جو را بر روی جنوب شرق آمریکا کنترل می‌کند. زمانی که لبه پشته NASH در جنوب غرب موقعیت نرمال خود قرار گیرد انتقال رطوبت بیشتر و در نتیجه بارش‌های تابستانی افزایش می‌یابد (Li, 2012). لبه غربی NASH در قاره آمریکا به کنترل انتقال رطوبت، حرکات قائم و بارندگی‌های جنوب‌شرق ایالات متحده و دریای کارائیب می‌انجامد (Bishop, 2019). اثرات NASH بر جریان سطوح پایین، فشار سطح دریا و حرکات قائم جو مشخص است (Nieto Ferreira, 2020) و با کنترل رودبادهای سطح پایین به تعدیل رطوبت و بارش شرق آمریکای مرکزی منجر می‌شود (Wei, 2019). زمانی که لبه غربی NASH در قسمت شمال غربی موقعیت نرمال خود قرار گیرد دماهای بالای غیر نرمال به علت ابرهای کمتر و کمبود بارش رخ می‌دهد و در نتیجه منجر به ناهنجاری‌های مثبت HI در جنوب‌شرق ایالات متحده می‌شود (Wu, 2019). پراترفاع جنوبی شمال غرب اقیانوس آرام (WNPSH) از شاخص‌های مهم اقلیم تابستانی در کشورهای همسایه غربی اقیانوس آرام شمالی است که تغییرات گسترده در کل اقیانوس آرام شمالی را نشان می‌دهد و با ایجاد آنومالی در گردش جو، تغییر جهت انتقال رطوبت و گرما، اثرات فصلی متفاوتی بر روی آب و هوای شرق آسیا دارد (Choi, 2019) و شدت آنومالی آن یک فاکتور مهم در تغییرات موسمی‌های تابستانه شرق آسیا (EAEM²) (Lee, 2006, 2013) و فعالیت‌های توفانی موسمی و توفان‌های استوایی شرق آسیا در فصل تابستان (Xigan, 2013; Lu, 2001) شناخته شده است. نقش WNPSH به‌عنوان کنترل کننده سیستم موسمی تابستانه به تعاملات جو- دریا مرتبط است (Sun, 2012). با شدت یافتن WNPSH انتقال رطوبت توسط بادهای آنومالی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال منجر به رخداد بارش‌های زیاد در موسمی‌های آسیای شرقی و اقیانوس هند می‌شود (Sun, 2012).

در ایران نیز مطالعاتی بر روی سیستم‌های پراترفاع جنب‌حاره بر روی اقلیم ایران انجام شده است. به‌عنوان مثال سلیقه و صادق نیا (Salighe & Sadeghnia, 2010) نشان دادند که تغییرات و جابه‌جایی پراترفاع جنب‌حاره به لایه‌های بالاتر جو شرایط را برای صعود هوای مرطوب موسمی و ایجاد بارش‌های موسمی فراهم می‌کند. خورشید دوست و همکاران (Khorshiddost et al., 2014)،

الگوهای فشار سطوح بالای جو همراهی می‌شود (Seager, 2003) و به‌صورت قائم از لایه مرزی سیاره‌ای تا تروپوپاوز گسترش می‌یابد (Wu, 2004). تغییرات در ارتفاع پراترفاع جنب‌حاره ناشی از تغییرات ایجاد شده در نواحی حاره و عرض میانی از جمله فعالیت‌های همرفت حاره است (Lau, 2015). همچنین افزایش دما و گرمای محسوس سطح زمین منجر به شکل‌گیری پراترفاع‌های جنب‌حاره تراز بالای جو بر روی قاره‌ها (Wu, 2004) و افزایش ارتفاع هسته‌های پراترفاع می‌شود (Alijan, 2022). فرونشینی هوا در مناطق پراترفاع جنب‌حاره بسیار رایج است که کمبود بارش و تبخیر زیاد را ایجاد کرده است (Davis et al., 2013) و این امر به شکل‌گیری بزرگ‌ترین بیابان‌های جهان در مناطق با حاکمیت پراترفاع‌های جنب‌حاره منجر شده است (Lamb, 1972). پراترفاع‌های جنب‌حاره در فصل تابستان تقویت می‌شوند و تأثیر زیادی بر کاهش بارندگی مناطق تحت حاکمیت خود دارند (Zhou, 2005; Colbert, 2012). این سامانه در نیمه گرم سال نواحی وسیعی از تروپوسفر زیرین، میانی و فوقانی را در برمی‌گیرد و با استقرار دراز مدت در نواحی جنب‌حاره شرایط اقلیمی خشک و بیابانی ایجاد می‌کند (Farajzade et al., 2009). از طرفی پراترفاع‌های جنب‌حاره می‌توانند عاملی مهم در انتقال رطوبت (Zhaou, 2005; Raziei, 2012; Lashkari et al., 2019) بویژه در تراز زیرین تروپوسفر باشند که در مورد ایران آب‌های عرض‌های جنوبی را به سامانه‌های فعال بارشی بر روی ایران انتقال می‌دهند (Lashkari et al., 2019; Raziei, 2012). پراترفاع جنب‌حاره در طی فصل گرم و سرد جابه‌جایی مکانی دارد. طی فصل گرم به عرض‌های بالاتر انتقال می‌یابد و بر روی قسمت‌هایی از شمال ایران، دریای مدیترانه، نواحی مرکزی اروپا و آمریکای شمالی مستقر است و طی فصل سرد به عرض‌های پایین‌تر انتقال می‌یابد و در زمان گسترش منجر به حاکمیت شرایط پایدار جوی می‌شود (Movahedi et al., 2015). پراترفاع جنب‌حاره مهم‌ترین عامل اقلیمی دوره گرم قاره‌های آسیا و آفریقا شناخته شده است (Farajzade et al., 2013) و مهم‌ترین پدیده سینوپتیکی خاورمیانه و از جمله ایران است. طی نیم قرن گذشته روزهای تشدید و حضور پراترفاع جنب‌حاره نسبت به روزهای تضعیف این سامانه دینامیکی افزایش یافته است (Halabian & Shabankari, 2012) و افزایش شاخص شدت و سطح آن در تمام فصول مشاهده شده است (Aloipour et al., 2018). عساکره و فاتحیان (Asakere & Fatahey, 2019)، افزایش شدت و مساحت آن بر روی ایران را نمایانگر حاکمیت اقلیم خشک قاره‌ای دانسته‌اند. در نیمکره شمالی افزایش مساحت و تغییرات زمانی- مکانی و شدت این الگوی گردشی تأثیر زیادی در کنترل ریزش‌های جوی مناطق جنب‌حاره دارد. این اثرات یا کاهش بارش را در بردارد که با ایجاد شرایط پایدار جوی در زمان حاکمیتش رخ می‌دهد و یا با افزایش انتقال رطوبت در صورت وجود شرایط ناپایداری منجر به

1- North Atlantic Subtropical High

2009)، وجود سامانه پرارتفاع عربستان را به همراه ناوه شمال آفریقا و واچرخند اسپانیایی در تراز زیرین و میانی جو جزء سامانه‌های مؤثر بر انتقال رطوبت بر روی نواحی جنوب غرب ایران می‌داند. در دوره گرم در صورت قرارگیری پرارتفاع عربستان در عرض‌های پایین و بر روی دریای عرب و خلیج عدن، بیشتر نواحی ایران بارش دریافت می‌کنند. در دوره گرم سال پرارتفاع عربستان باعث ایجاد شرایط واچرخندی بر کشور ایران شده و مانع ورود سامانه‌های بارشی می‌شود (Karimi et al., 2019). لشکری و همکاران (Lashkari et al., 2017)، خشکسالی‌های شدید را نتیجه ادغام پرارتفاع‌های آזור، عربستان، آفریقا و سیری می‌داند. در این صورت پرارتفاع عربستان کاملاً به سمت غرب حرکت می‌کند و در تمام طول دوره بارشی بر روی خشکی شبه جزیره عربستان قرار می‌گیرد و در صورت ادغام با زبانه پرارتفاع آفریقا منجر به راندن کم‌فشار سودان به عرض‌های جنوبی شده و مانع گسترش آن به عرض‌های بالاتر می‌شود. برون و همکاران (Boron et al., 2019)، دریافتند زمانی که پرارتفاع عربستان در تراز میانی تروپوسفر بر روی دریای سرخ مستقر شود منجر به پایداری دینامیک و گرمایش بی‌دررو می‌شود که نتیجه آن تشدید گرمای زیرین و تداوم موج گرمایی است. مجیدی راد و رحیمی هرآبادی (Majidirad & Rahimi Herabadi, 2021)، اثرات جابه‌جایی سیستم پرارتفاع عربستان و اثرگذاری آن بر وقوع و تشدید خشکسالی در ایران پرداخته‌اند. علی‌پور (Alipour, 2018)، بیان می‌کند که بارش تمام نواحی ایران به جز قلمرو دریای خزر که تحت نفوذ فرود دریای سیاه و دریای سیاه-دریای مدیترانه است، تحت حاکمیت پرارتفاع دینامیکی جنب‌حاره است که در زمان حاکمیت خود به کنترل بارش و در عمل به متوقف شدن آن می‌انجامد. در واقع یک همبستگی منفی بین شدت پرارتفاع جنب‌حاره و بارش وجود دارد که با افزایش شدت تابستانه این سامانه دینامیکی، بارش‌های تابستانه ایران کاهش معناداری داشته است.

تحقیقات صورت گرفته نشان از اهمیت نقش مراکز پرارتفاع جنب حاره در اقلیم منطقه تحت نفوذ این سامانه دینامیکی است. تأثیرات آنها بر دما، بارش و تغییرات فصلی بیان شده است. تاکنون مطالعاتی بر روی تأثیر پرارتفاع جنب حاره بر روی اقلیم ایران انجام شده است اما تأثیر پرارتفاع جنب حاره بر رخداد بارش‌های فرین ایران طی دوره سرد سال کمتر مورد توجه بوده است. لذا در این تحقیق بر آن شدیم تا نقش پرارتفاع جنب‌حاره عربستان را در بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد سال در ایران و در ترازهای مختلف جوی بررسی کنیم تا تصویر و درک روشن‌تری از نقش این سامانه بر بارش‌های فرین دوره سرد سال ایران داشته باشیم و اینکه تغییرات آنها در ترازهای مختلف جوی و در ارتباط با دیگر سامانه‌های گردش جوی چگونه است و چگونه می‌تواند در رخداد بارش‌های فرین ایران نقش داشته باشد.

وجود پرارتفاع جنب‌حاره در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال را عامل ایجاد گرد و غبار می‌داند. همچنین براتی و همکاران (Barati et al., 2018) وجود پرارتفاع آזור و نزدیک شدن آن به کم‌فشار ایران-پاکستان را عامل ایجاد گرد و غبار دانسته‌اند. یک سیستم پرارتفاع جنب‌حاره که اقلیم ایران را به شدت متأثر می‌کند پرارتفاع عربستان است (Raziei, 2012). یک پرارتفاع که در جنوب‌شرق دریای سرخ و بر فراز شبه جزیره عربستان و دریای عرب قرار می‌گیرد و یکی از مراکز شبه ساکن در ترازهای زیرین جو است که منجر به تغییرات در ویژگی‌های اقلیمی منطقه تحت‌نفوذ خود می‌شود. این سامانه یکی از مؤلفه‌های گردش جوی مؤثر بر بارش‌های دوره سرد سال ایران است (Karimi et al., 2019) که به علت ساختار دینامیکی خود توانایی بسیاری در فراهم ساختن هوای مرطوب بویژه در لایه‌های زیرین دارد (Mohammadi & Lashkari, 2018) و در صورت همراهی با رودباد جنب‌حاره منجر به ایجاد ترسالی می‌شود (Lashkari et al., 2019). در زمان فعالیت این پرارتفاع، ناوه‌های شرق مدیترانه، دریای سرخ و ناوه‌های موجود بر روی ایران نقشی مهم و تعیین‌کننده دارند. انتقال هوای گرم و مرطوب در تراز میانی تروپوسفر در جریانات جنوب‌غربی به درون ناوه‌های ذکر شده در تقویت آن‌ها بر روی ایران نقش مهمی دارند و نه تنها منجر به شرایط خشک و پایدار نمی‌شوند بلکه شرایط مناسب بارشی را فراهم می‌کنند (Raziei, 2012). در صورتی که پرارتفاع عربستان حرکت شرق‌سو داشته باشد و بر روی دریا‌های عرب و عمان مستقر شود مناسب‌ترین الگو برای انتقال رطوبت به سامانه‌های بارشی ورودی به ایران است (Karimi et al., 2019). با جابه‌جایی شرق‌سوی پرارتفاع عربستان در تراز زیرین سامانه‌های بارشی ورود گسترده‌ای بر روی ایران خواهند داشت و منجر به افزایش بارش در مناطق بیشتری از ایران خواهند شد. همچنین جابه‌جایی شرق‌سوی پرارتفاع عربستان باعث حرکت واچرخندی آن بر روی آب‌های گرم دریای عرب و عمان می‌شود که رطوبت آن‌ها را به درون سامانه‌های سودانی انتقال می‌دهد (Lashkari & Mohammadi, 2015; Mohammadi & Lashkari, 2021). از طرفی پرارتفاع عربستان می‌تواند شرایط خشک و پایداری ایجاد کند. به‌عنوان نمونه قرارگیری پرارتفاع عربستان بر روی شبه جزیره عربستان سبب می‌شود جریان واچرخندی گرم و خشک به درون ایران هدایت شده و شرایط پایدار و توفان‌های گرد و غبار را سبب شود (Zangane, 2015). شروع و پایان دوره بارشی در ایران ارتباط نزدیکی با جابه‌جایی عرضی پرارتفاع جنب‌حاره عربستان دارد. قرارگیری مرکز پرارتفاع عربستان بر روی شبه جزیره عربستان، اتیوپی، مصر و سودان مانع از فعال شدن کم‌فشار سودان می‌شود. بنابراین یکی از سامانه‌های مهم و مؤثر بر بارش ایران از فعالیت باز می‌ماند (Mohammadi & Lashkari, 2021; Zangane, 2015). خوشحال و همکاران (Khoshhal et al., 2021).

داده‌ها و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

بخش زیادی از ایران در منطقه جنب‌حاره قرار دارد (Masoudinan, 2011) و با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص خود در منطقه انتقالی نسبت به الگوهای بزرگ مقیاس گردش عمومی و ردسپهری (تروپوسفری) قرار دارد و محل برهمکنش سیستم‌های گردش حاره، جنب‌حاره و برون حاره است (Mofidi, 2004; Mostafaei et al., 2016) که این برهمکنش منجر به تنوع زمانی-مکانی بارش می‌شود (Alijani, 1997). در این صورت تعاملات الگوهای گردشی حاره-برون حاره می‌توانند بر ایران اثر بگذارند. آب و هوای ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی خود در فصول مختلف سال تحت تأثیر الگوهای گردشی مختلف، از نواحی حاره، جنب‌حاره و برون حاره قرار می‌گیرد. از منطقه برون حاره، پرفشار سبیری، رودباد جبهه قطبی، بادهای غربی، فرودهای بلند مدیترانه از مناطق جنب‌حاره و حاره نیز تحت تأثیر پرفشار آزور، کم فشار گنگ، فرود خلیج فارس و پرفشار جنب‌حاره طی فصول مختلف است. پرفشارها نقش مهمی بر بارش‌های ایران دارند. استقرار پرفشار بر روی شمال دریای سیاه، شرق اروپا و دریاچه آرال، اقیانوس اطلس و غرب دریای مدیترانه با تقویت و هدایت کم‌فشار سودان به سمت جنوب شرق ایران منجر به رخداد بارش می‌شوند (Lashkari, 2019). گسترش پرفشار سبیری به سمت شرق به فعال شدن سیکلون‌های مدیترانه‌ای و ایجاد بارش می‌انجامد (Mostafaei et al., 2016). پرفشار شمال غرب دریای خزر و نفوذ به عرض‌های ۲۰ درجه شمالی بر روی ایران و

همراه شدن با کم‌فشار عربستان (Alijani et al., 2019) شرایط را برای رخداد بارش فراهم می‌کنند. در زمستان عمدتاً وجود سامانه‌های پرفشار در عرض‌های بالاتر با ریزش هوای سرد به عرض‌های پایین منجر به ایجاد ناپایداری می‌شوند و هر کدام به تقویت سامانه‌های کم‌فشار می‌انجامد. این امر نقش مهمی در رخداد بارش‌های زمستانی ایران خصوصاً جنوب شرق دارند.

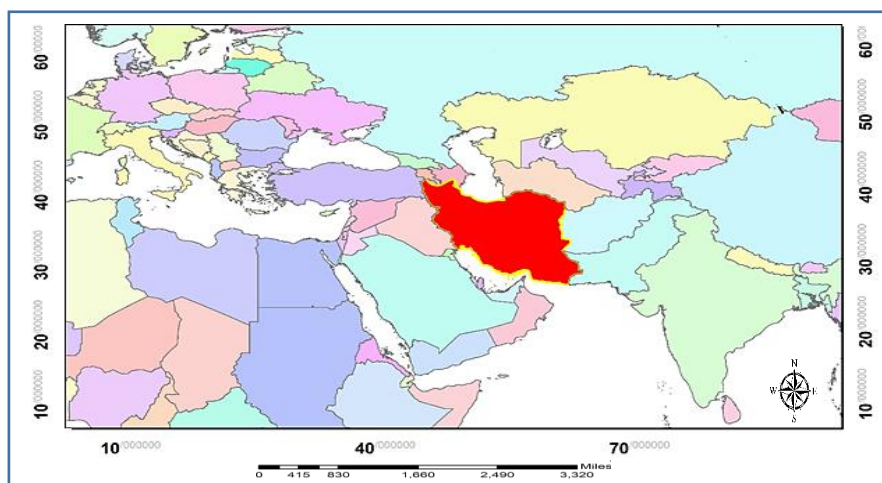
با توجه به اینکه هدف از این پژوهش بررسی نقش پرارتفاع عربستان بر روی بارش‌های فرین دوره سرد سال ایران است به منظور شناخت و آگاهی نسبت به موقعیت، گسترش و اثرگذاری پرارتفاع عربستان بر روی ایران و تعاملات آن با دیگر الگوهای گردشی، محدوده مورد مطالعه ۱۰ تا ۹۰ درجه شرقی و ۰ تا ۶۰ درجه شمالی انتخاب شد که ایران در محدوده مورد نظر قرار می‌گیرد (شکل ۱).

داده‌ها و روش تحقیق

برای انجام این پژوهش از دو دسته داده‌های سطح زمین و داده‌های جو بالا استفاده شده است.

الف: داده‌های سطح زمین (محیطی)

از داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک کشور استفاده شده است. داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور از زمان تأسیس هر ایستگاه تا ۲۵ ژانویه ۲۰۲۰ تهیه شد. در این میان به استخراج ایستگاه‌هایی پرداخته شد که ۳۰ سال دوره آماری داشته باشند. موقعیت ایستگاه‌ها در شکل ۲ آمده است.



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه

Figure 1- the location of the studied Area

ب: داده‌های جو بالا

داده‌های مورد استفاده جو بالا، ارتفاع ژئوپتانسیل^۱ (HGT) برحسب متر، مؤلفه باد مداری^۲ (VWIND) و نصف‌النهاری^۳ (UWIND) برحسب متر بر ثانیه، رطوبت ویژه^۴ (SHUM) برحسب گرم بر کیلوگرم و میانگین فشار سطح دریا^۵ (MSLP) (برحسب هکتوپاسکال) هستند. داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل به‌منظور ترسیم نقشه الگوهای گردشی و داده‌های مؤلفه بادهای مداری و نصف‌النهاری به‌منظور ترسیم رودبادهای انتخاب شده‌اند. داده‌های منتخب، داده‌های ERA5 با تفکیک مکانی ۲۵٪ در ۲۵ درجه و تفکیک زمانی روزانه و ساعتی (۰۰.۰۰، ۰۶.۰۰، ۱۲.۰۰، ۱۸.۰۰) هستند که از تارنمای <https://www.ecmwf.int> استخراج شده‌اند. استخراج داده‌ها در ۶ تراز ۱۰۰۰، ۸۵۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال (تراز زیرین)، ۷۰۰، ۵۰۰ و ۴۰۰ (تراز میانی) صورت گرفته است. استفاده از داده‌های جوی در دو تراز زیرین و میانی به‌منظور یافتن پیوند و ارتباط بین بارش‌های فرین فراگیر با پراترفاع جنب‌حاره در هر دو تراز زیرین و میانی است. انتخاب ترازهای مختلف امکان شناسایی بهتر الگوهای گردشی و رطوبت، بررسی تغییرات آن‌ها و شرایط ناپایداری جو را فراهم می‌کند.

مراحل انجام تحقیق به شرح ذیل انجام شد. **گام اول:** داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک از سازمان هواشناسی کشور از زمان تأسیس تا ۲۵ ژانویه ۲۰۲۰ تهیه شد. طول دوره آماری برای انجام پژوهش حاضر، ۳۰ سال در نظر گرفته شد. استخراج ایستگاه‌های با ۳۰ سال دوره آماری از سال ۱۹۸۹ تا ۲۵ ژانویه ۲۰۲۰ انجام شد. برای آن که بتوان بارش‌های فرین را در طی دوره طولانی‌تر بررسی کرد از دوره آماری ۳۰ ساله استفاده شد. این معیار منجر به حذف بیشتر ایستگاه‌هایی شد که کمتر از ۳۰ سال داده آماری داشتند. انتخاب دوره آماری طولانی‌تر، حذف ایستگاه‌های بیشتری را سبب می‌شد به همین دلیل از انتخاب دوره طولانی‌تر اجتناب شد. سپس در بین ایستگاه‌های به‌دست آمده ایستگاه‌های که داده‌های گم‌شده داشتند حذف گردیدند. زیرا بسیاری از آنها داده‌های مفقودی زیاد و حتی یک ساله داشتند که بازسازی داده‌ها با طول دوره طولانی، صحیح نیست. در نهایت ۸۴ ایستگاه در سراسر کشور باقی ماندند که ۳۰ سال داده بارش روزانه بدون داده مفقودی داشتند و همچنین پراکندگی مناسبی در سطح کشور داشتند. ایستگاه‌های به دست آمده از لحاظ وجود داده‌های پرت آزمون شدند که هیچ کدام

داده پرت نداشتند (شکل ۲). **گام دوم:** معیار تعیین بارش فرین انتخاب شد. تعریف بارش فرین مبتنی بر یک آستانه است. این آستانه نمایه مطلق (بر اساس یک مقدار عددی مشخص) و یا نسبی (همانند شاخص صدکی) است. در نظر گرفتن یک عدد مشخص به‌منظور تعریف بارش فرین و برای تمام ایستگاه‌ها نمی‌تواند صحیح باشد. مقدار بارشی که در یک ایستگاه کم‌باران، بارش فرین محسوب می‌شود ممکن است در ایستگاهی مرطوب و پرباران، بارشی معمول برای آن منطقه است (Borzoï & Azizi, 2015). در نتیجه استفاده از شاخص صدکی برای تعریف بارش فرین مناسب‌تر تشخیص داده شد. شاخص صدکی ۹۵ انتخاب شد. در این پژوهش بارش‌های فرین بارش‌هایی هستند که برابر و یا بیشتر از صدک ۹۵ باشد. بارش‌های فرین تمام ایستگاه‌ها برای تمام روزها طی ۳۰ سال دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۵ ژانویه ۲۰۲۰ با استفاده از نرم‌افزار متلب استخراج شد. برای هر ایستگاه و برای تمام روزهای ۳۰ سال، بر اساس نمایه نسبی شاخص صدکی ۹۵ آستانه بارش فرین به دست آمد. بارش هر روز که برابر و یا بیشتر از آستانه بود روز با بارش فرین تعریف شد. **گام سوم:** معیار فراگیر بودن روزهای با بارش فرین مشخص گردید. چنانچه یک‌سوم ایستگاه‌ها (۲۸ ایستگاه) از بین ۸۴ ایستگاه منتخب به شرط همگنی مکانی، بارش فرین داشته باشند روز با بارش فرین فراگیر شناخته شد. در نهایت بر اساس آستانه تعریف شده، ۴۵۰ روز در طی ۳۰ سال به‌عنوان روزهای با بارش فرین - فراگیر شناخته شد. نقشه هم‌بارش روزهای با بارش فرین - فراگیر ترسیم گردید تا توزیع فضایی همگن ایستگاه‌های با بارش فرین شناسایی شود. زیرا روزهای با بارش فرین - فراگیر لزوماً توزیع فضایی همگنی نداشتند. **گام چهارم:** در میان روزهای با بارش فرین - فراگیر، الگو که بیشترین بارش فرین و بیشترین همگنی مکانی را داشتن انتخاب شدند. در این میان ۲ الگو دارای تداوم ۲ روزه، یک الگو تداوم ۳ روزه و ۶ الگو تداوم یک روزه هستند که در جدول ۱ آمده است. **گام پنجم:** بر اساس داده‌های جو بالا در محیط نرم‌افزاری GRADS نقشه‌های سینوپتیک برای الگوهای انتخابی (جدول ۱) ترسیم شد. با استفاده از داده‌های جو بالا نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، رطوبت ویژه و میانگین فشار سطح دریا ترسیم گردید. به‌منظور تحلیل سینوپتیکی الگوهای انتخابی نقشه‌های زیر ترسیم شد:

الف) نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیل و باد در ترازهای انتخابی ترسیم گردید تا موقعیت جغرافیایی پراترفاع جنب حاره، جابه‌جایی آن در ترازهای مختلف تروپوسفر، میزان نفوذ و تأثیر آن بر ایران مشخص گردد.

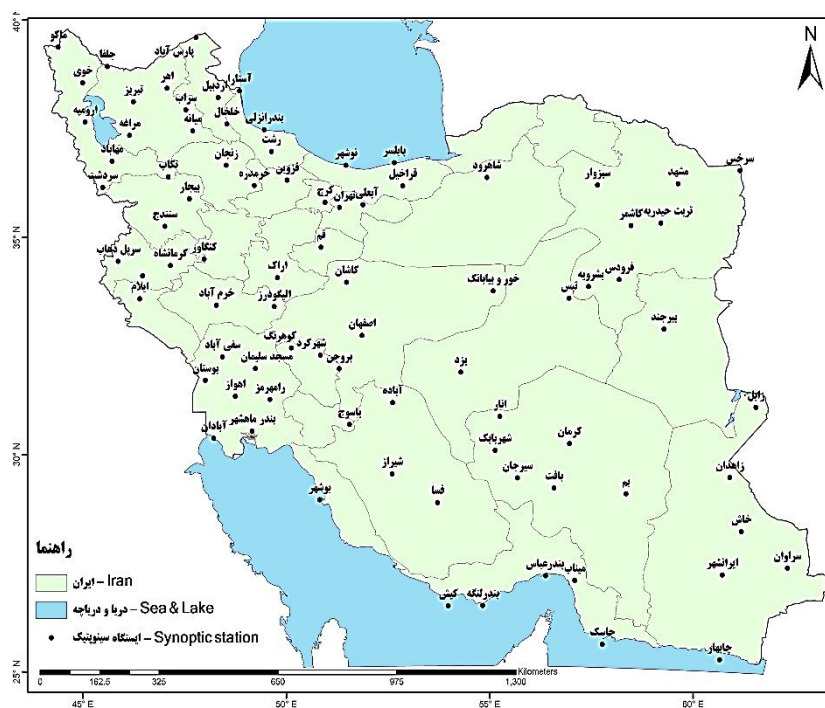
ب) نقشه‌های ترکیبی رطوبت ویژه، ارتفاع ژئوپتانسیل و باد ترسیم شد تا بتوان نقش پراترفاع جنب حاره را در انتقال رطوبت و انتقال آن به ایران در ترازهای مختلف شناسایی کرد.

- 1- Geopotential
- 2- V-component of wind
- 3- U-component of wind
- 4- Specific humidity
- 5- Mean sea level pressure

جدول ۱- الگوهای انتخابی برای انجام تحلیل سینوپتیکی

Table 1- Selected patterns for synoptic analysis

تداوم Duration (Number of days)	الگوهای انتخابی Selected Patterns			
	روز	ماه	سال	
	Day	Month	Year	
۱ (One Day) روز	26	March	مارس	2003
۱ (One Day) روز	13	January	ژانویه	2004
۱ (One Day) روز	29	January	ژانویه	2013
۱ (One Day) روز	10	November	نوامبر	2015
۱ (One Day) روز	13	February	فوریه	2017
۱ (One Day) روز	25	November	نوامبر	2018
۲ (Two Day) روز	25	March	مارس	2019
	26			



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینویتیکی انتخابی

Figure 2- Geographic location of selected synoptic stations

نتایج و بحث

میانی تحلیل شدند. به این ترتیب ترازهای ۸۵۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال (تراز زیرین)، ۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰ هکتوپاسکال (تراز میانی) انتخاب شدند تا موقعیت، گسترش، تغییرات پرارتفاع جنب حاره عربستان و تعاملات آن با دیگر الگوهای گردشی جو در ترازهای مختلف جوی بررسی شوند.

از آنجا که این پژوهش نتیجه بررسی چندین الگو است، آوردن تمام الگوها و نقشه‌های آنها در مقاله حاضر امکان‌پذیر نیست. لذا از نقشه‌ها و تفاسیر روز ۲۶ مارس ۲۰۱۹ به‌عنوان نمونه استفاده شده است. اما نتایج به‌دست آمده بر اساس ۷ الگوی انتخابی است. نقشه‌های ارتفاع ژئوتانسیل و رطوبت ویژه در هر دو تراز زیرین و

الگوی نمونه ۲۶ مارس ۲۰۱۹

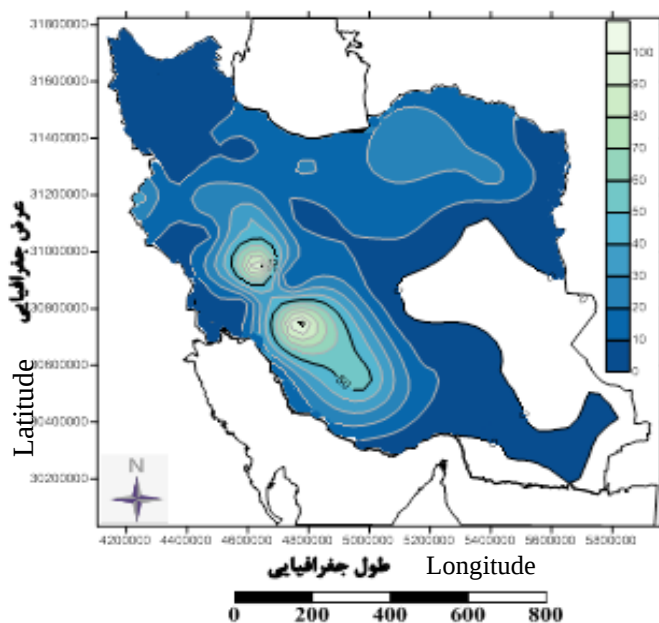
طی بازه زمانی ۱۶ مارس تا ۱ آوریل ۲۰۱۹ با ورود سامانه‌های بارشی قدرتمند به کشور بارش‌های شدید و فراگیر منجر به جاری شدن سیل در مناطق مختلف کشور شد (Alijani et al., 2019) که منجر به ایجاد سیل در بیشتر استان‌های ایران شد. در این بازه زمانی روز ۲۵ و ۲۶ مارس، ایران شدیدترین بارش‌ها را دریافت کرده است (شکل ۳). ۲۶ مارس در ۱۶ ایستگاه بارش بیش از ۲۰ میلی‌متر ثبت شده است. بیشترین بارش در این روز مربوط به ایستگاه‌های کوه‌رنک با ۱۱۲، یاسوج ۱۱۱ میلی‌متر بوده است.

الف: تراز زیرین (۸۵۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال)

الگوی پراارتفاع عربستان در جنوب‌شرق سردچال عرض میانی که هسته آن بر روی ترکیه واقع شده است شکل گرفته است (شکل ۴، A, B). هسته آن با ۱۵۰۰ ژئوپتانسیل متر بر روی دریای عمان، جنوب شرق ایران و شمال اقیانوس هند واقع شده و نواحی وسیعی از جنوب شرق، شرق و جنوب ایران را در بر گرفته است. بین سردچال عرض میانی که نفوذ حاره‌ایی دارد و پراارتفاع عربستان همگرایی رخ داده است. جریان واچرخندی پراارتفاع عربستان در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال جنوبی- شمالی است که تا نواحی شمال غرب ایران ادامه دارد (شکل ۴، A). نیمه غربی ایران تا ۵۵ درجه شرقی تحت حاکمیت جریان جنوبی- شمالی پراارتفاع عربستان و همچنین

همگرایی این سامانه با سردچال عرض میانی است. نیمه شرقی ایران نیز تحت حاکمیت جریان پراارتفاع عربستان با جهتی جنوب‌غرب- شمال‌شرق قرار دارد. جریان جنوبی شمالی پراارتفاع عربستان همچنین عاملی مهم در جلوگیری از ورود گسترده کم ارتفاع عرض میانی به نواحی غرب ایران است (شکل ۴، A).

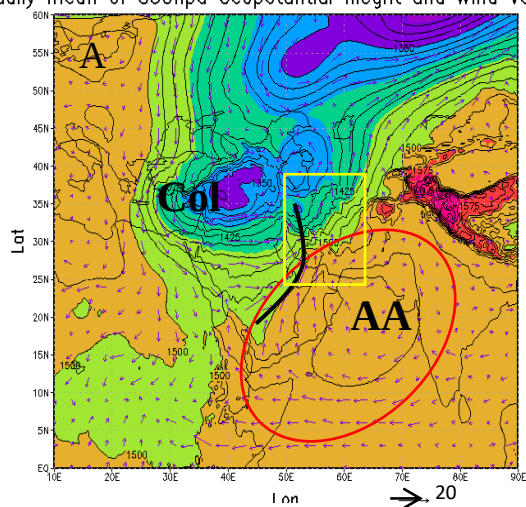
در تراز زیرین شاهد انتقال رطوبت حاره به برون حاره توسط عوامل دینامیکی برون حاره هستیم که نفوذ حاره‌ایی داشته‌اند (شکل ۵، A, B). با بررسی نقشه‌های رطوبت ویژه و ارتفاع ژئوپتانسیل مشخص شد که در محل نفوذ سردچال دینامیکی عرض میانی به منطقه حاره و تعامل با پراارتفاع عربستان، رطوبت ویژه با جهتی نصف‌النهاری به مناطق برون حاره منقل و منجر به شکل‌گیری رودخانه جوی شده‌اند. در محل همگرایی دو الگوی سردچال و پراارتفاع عربستان حجم بیشتری از رطوبت حاره به برون حاره وارد می‌شود. رطوبت منطقه ITCZ در شرق آفریقای مرکزی توسط سردچال ترکیه که به ۱۵ درجه شمالی رسیده است و پراارتفاع عربستان در جهت نصف‌النهاری جنوب‌غرب- شمال شرق به منطقه برون حاره هدایت می‌شود و سبب شکل‌گیری رودخانه جوی شرق آفریقای مرکزی شده‌اند. پراارتفاع عربستان نیز به‌عنوان عامل دینامیکی منطقه جنب حاره به انتقال رطوبت حاره به برون حاره در جهت جریان واچرخندی خود می‌انجامد و منجر به تقویت رودخانه جوی (AR) می‌شود.



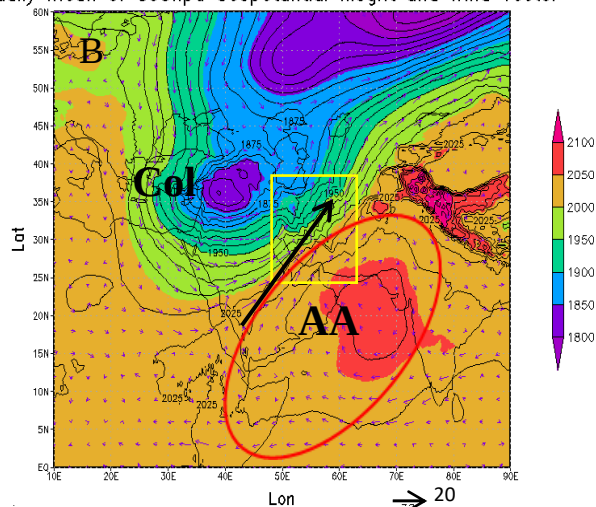
شکل ۳- نقشه بارش روز ۲۶ مارس ۲۰۱۹ ایران

Figure 3- Precipitation map of Iran on March 26, 2019

daily mean of 850hpa Geopotential height and Wind Vector



daily mean of 800hpa Geopotential height and Wind Vector

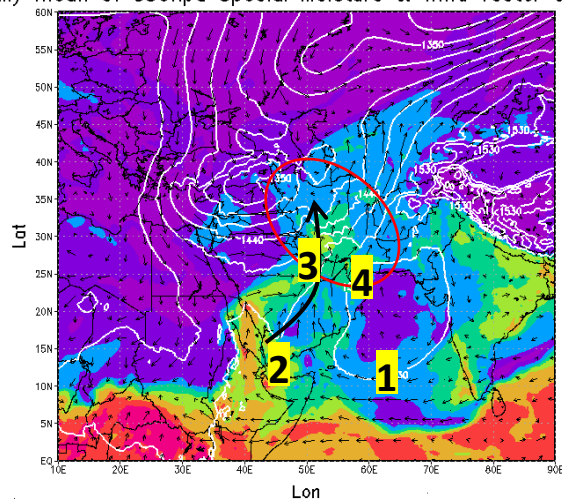


شکل ۴- خطوط مشکی ممتد میانگین روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل (ژئوپتانسیل متر)، فلش‌های بنفش جریان باد وکتور (متر بر ثانیه)، دایره قرمز پرارتفاع عربستان، فلش مشکی محل همگرایی پرارتفاع عربستان و سردچال عرض میانی در روز ۲۶ مارس سال ۲۰۰۳ در تراز زیرین و مستطیل زرد کشور ایران را نشان می‌دهند.

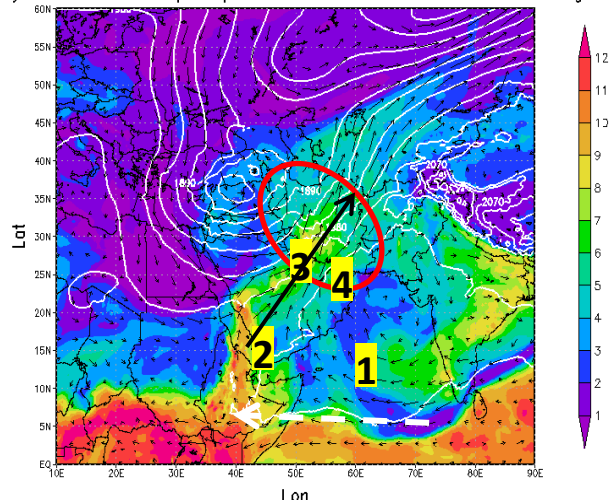
Col(cut off low), AA(Arabic Anticyclone)

Figure 4- Continuous black lines of daily average geopotential height (geopotential meters), purple Arrows of vector wind flow (meters per second), red circle of high altitude of Arabia, black Arrow of convergence point of high altitude of Arabia and mid-latitude Cut off low on March 26 2003 in the lower level and the yellow rectangle show the country of Iran.

Daily mean of 850hpa Special Moisture & Wind Vector & hgt



Daily mean of 800hpa Special Moisture & Wind Vector & hgt



شکل ۵- نقشه‌های میانگین روزانه میزان رطوبت ویژه (نواحی رنگی)، ارتفاع ژئوپتانسیل (منحنی‌های مشکی)، جریان باد (فلش‌های مشکی) در تراز زیرین (۸۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) روز ۲۶ مارس ۲۰۰۳ هستند. فلش مشکی منقطع نشان دهنده مسیر رودخانه‌های جوی شرق آفریقای مرکزی، فلش سفید منقطع مسیر انتقال رطوبت اقیانوس هند به آفریقای مرکزی توسط پرارتفاع عربستان، بیضی قرمز موقعیت جغرافیایی ایران را نشان می‌دهد. اعداد چشمه‌های رطوبتی تغذیه کننده رودخانه جوی و ایران توسط پرارتفاع عربستان را نشان می‌دهند. چشمه‌های رطوبتی: ۱: حاره؛ ۲ دریای عرب؛ ۳ دریای سرخ جنوبی، ۴ خلیج فارس، ۵ دریای عمان

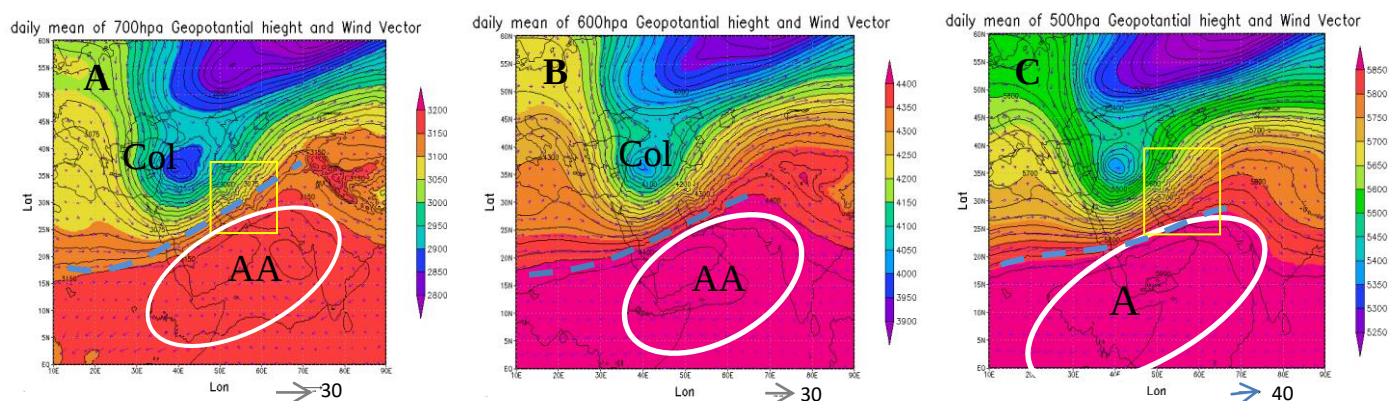
Figure 5- Daily average maps of specific humidity (colored Areas), geopotential height (black curves), wind flow (black Arrows) at the bottom level (800 and 850 hPa) on March 26, 2003. The broken black Arrow shows the path of atmospheric rivers in East Central Africa, the white broken Arrow shows the path of moisture transfer from the Indian Ocean to Central Africa by the high altitude of Arabia, the red oval shows the geographical location of Iran. The numbers show the moisture springs feeding the Atmospheric River and Iran by the high altitude of Arabia. Tropical moisture springs: 1 Arabian Sea, 2 South Red Sea, 3 Persian Gulf, 4 Sea of Oman.

است. در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال هسته پراترفاع عربستان انتقالی جنوب‌سو و غرب‌سو داشته و به نواحی شرق آفریقای شمالی و نواحی جنوبی شبه جزیره عربستان نفوذ کرده است (شکل ۶B). به همین دلیل همگرایی دو جریان شاخه جنوبی بادهای غربی و پراترفاع عربستان در شرق آفریقای شمالی بر روی سودان شروع شده و با عبور از دریای سرخ وارد شبه جزیره عربستان شده است. هر چه به ترازهای بالاتر صعود کنیم شاخه جنوبی بادهای غربی مداری تر و نفوذ بیشتری در منطقه جنب حاره و حاره دارد که این امر انتقال بیشتر جنوب‌سوی پراترفاع عربستان را پی‌دارد طوری که در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال تأثیر و نفوذ پراترفاع عربستان بر روی ایران کاهش چشمگیری داشته و تمام ایران به جز سواحل دریای عمان تحت نفوذ منطقه واگرایی سردچال و شاخه جنوبی بادهای غربی هستند (شکل ۶C). گسترش پراترفاع عربستان در منطقه حاره و بر روی اقیانوس هند و شرق آفریقای مرکزی به انتقال رطوبت و دمای اقیانوس هند به درون منطقه حاره شرق آفریقای مرکزی کمک می‌کند. این امر به افزایش حجم رطوبتی منطقه ITCZ بر روی آفریقا می‌انجامد. رودخانه جوی (AR) در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال در شرق آفریقای مرکزی در امتداد منطقه همگرایی دو الگوی سردچال عرض میانی و پراترفاع عربستان وارد ایران شده است. پراترفاع عربستان رطوبت اقیانوس هند، دریای عرب و جنوب دریای سرخ را به رودخانه جوی (AR) شبه جزیره عربستان تزریق می‌کند و از طریق رودخانه جوی (AR) وارد ایران می‌شوند (شکل ۶A, ۶B). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال رودخانه جوی (AR) شرق آفریقای مرکزی تضعیف و کوتاه شده و تا دریای سرخ می‌رسد.

جریان واچرخندی پراترفاع عربستان با جهتی شرقی - غربی رطوبت را از اقیانوس هند به آفریقای مرکزی می‌رساند که به تقویت نقطه منشاء رودخانه جوی (AR) کمک می‌کند. حداکثر حجم رطوبتی بر روی شبه جزیره عربستان نیز در محل همگرایی دو جریان پراترفاع عربستان و سردچال ترکیه است. پراترفاع عربستان رطوبت اقیانوس هند و دریای عرب را به رودخانه جوی (AR) بر روی شبه جزیره عربستان وارد می‌کند. رطوبت دریای عمان نیز از طریق جریان واچرخندی پراترفاع عربستان با جهتی جنوب غرب - شمال شرق به جنوب شرق و سواحل دریای عمان وارد می‌شود و به تغذیه رطوبتی رودخانه جوی (AR) و سواحل جنوبی ایران می‌انجامد (شکل ۵A, ۵B).

ب: تراز میانی (۵۰۰، ۶۰۰، ۷۰۰ هکتوپاسکال)

در تراز میانی، شاخه جنوبی بادهای غربی نفوذ حاره ایی داشته‌اند که منجر به جابه‌جایی جنوب‌سو و شرق‌سوی هسته مرکزی پراترفاع عربستان نسبت به تراز زیرین شده است (شکل ۶A, ۶B, ۶C). هسته پراترفاع عربستان بر روی ۲۰ درجه شمالی و بر روی اقیانوس هند واقع شده است. با انتقال جنوب‌سوی پراترفاع عربستان، تعامل و همگرایی دو الگوی پراترفاع عربستان و شاخه جنوبی بادهای غربی در عرض‌های پایین‌تر رخ داده است. در تراز میانی تنها سواحل دریای عمان و جنوب شرق ایران تحت نفوذ جریان واچرخندی پراترفاع عربستان قرار دارد. مناطق بیشتری از ایران تحت حاکمیت سیستم‌های غربی است (شکل ۶A). گسترش پراترفاع جنب‌حاره عربستان بر روی آفریقای مرکزی تا ۱۵ درجه شمالی را فرا گرفته



شکل ۶- خطوط مشکی روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل (ژئوپتانسیل متر)، فلش‌های بنفش جریان باد و کتور (متر بر ثانیه). دایره سفید پراترفاع عربستان، خط منقطع آبی منحنی بیرونی شاخه جنوبی بادهای غربی در ۲۶ مارس سال ۲۰۰۳ در تراز میانی (۷۰۰، ۶۰۰، ۵۰۰ هکتوپاسکال) و مستطیل زرد کشور ایران را نشان می‌دهند. AA (Arabic Anticyclone)

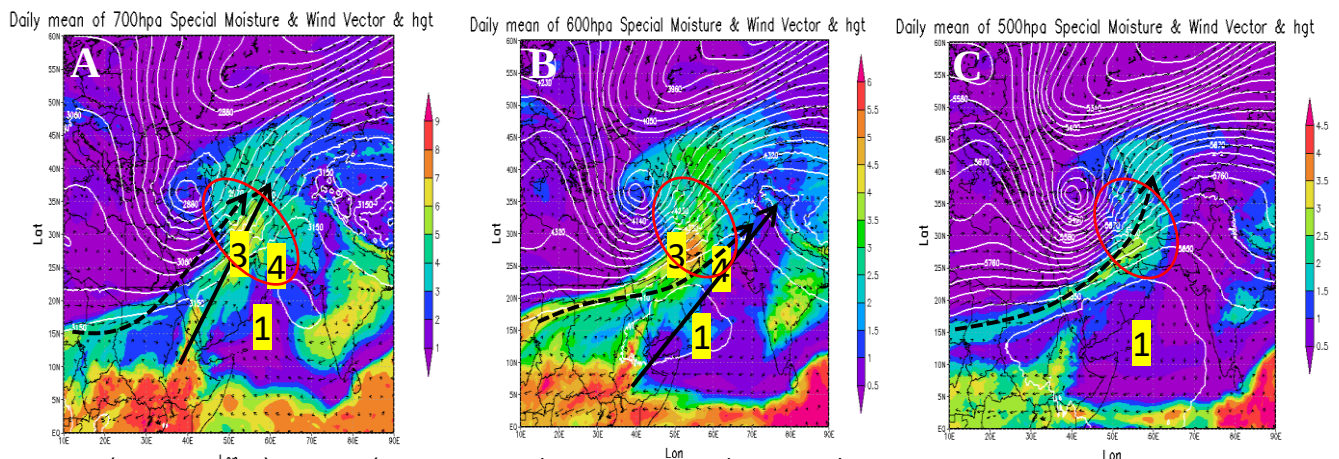
Figure 6- Continuous black lines of daily average geopotential height (geopotential meters), purple Arrows of vector wind flow (meters per second). The white high-altitude circle of Saudi Arabia, the blue broken line, the outer curve of the southern branch of the western winds on M (AR)ch 26, 2003 at the middle level (700, 600, 500 hectopascals) and the yellow rectangle show the country of Iran.

عرب و اقیانوس هند که بیشتر از ۱۶ گرم است و رطوبت دریای سرخ جنوبی از طریق جریان واچرخندی پرفشار عربستان در امتداد منطقه واگرایی کم فشار ترکیه وارد ایران شده است (شکل A.۸). وجود رطوبت بیشتر بر روی شبه جزیره عربستان نتیجه هدایت و انتقال رطوبت از چشمه‌های رطوبتی مختلف حاره، جنب حاره و برون حاره توسط دو الگوی کم فشار ترکیه و پرفشار عربستان است که با همگرا شدن بر روی شبه جزیره عربستان حجم رطوبتی آنجا را افزایش می‌دهند. نیمه جنوبی ایران فشار بیشتر است و بین ۱۰۱۰ تا ۱۰۲۰ هکتوپاسکال است. جریان باد نشان می‌دهد که پرفشار عربستان نقش مهمی بر روی ایران در سطح زمین دارد. انتقال حجم بیشتری از رطوبت اقیانوس هند و دریای سرخ جنوبی توسط جریان واچرخندی پرفشار عربستان در سطح زمین صورت گرفته است. جریان جنوبی- شمالی پرفشار عربستان با عبور از دریای عرب، رطوبت آن را وارد خلیج فارس می‌کند. رطوبت خلیج فارس نیز توسط جریان پرفشار عربستان به نواحی غرب و شمال غرب ایران وارد می‌شود. به علت وجود رشته کوه زاگرس رطوبت وارد مناطق مرکزی و شمالی نمی‌شود. جریان واچرخندی پرفشار عربستان بر روی شرق آفریقای مرکزی، دریای سرخ جنوبی، جنوب شبه جزیره عربستان و بر روی ایران مانع از ورود کم فشار ترکیه به ایران و کم فشار سودان به خاورمیانه شده است. کم فشار سودان بر روی آفریقای مرکزی با ۱۰۰۵ هکتوپاسکال شکل گرفته است (شکل A.۸).

در شکل ۵ در هر سه تراز مشهود است که رطوبت از غرب آفریقا به خاورمیانه و از جمله ایران وارد می‌شود. با کاهش رطوبت در شرق آفریقا امکان شکل‌گیری رودخانه جوی (AR) حتی با وجود عوامل صعود دینامیکی امکان پذیر نبوده است. در تراز ۵۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال پراارتفاع عربستان با جابه‌جایی غرب سوی خود، رطوبت دریای سرخ جنوبی و اقیانوس هند را بر روی شرق آفریقای مرکزی و شمالی و بر روی شبه جزیره عربستان به رودخانه جوی (AR) تریق می‌کند (شکل B, C, ۷). از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا پراارتفاع عربستان با جابه‌جایی غرب سو و جنوب سوی خود، در تغذیه رطوبتی رودخانه جوی (AR) بر روی ایران نقشی ندارد. رطوبت دریای سیاه، شرق دریای مدیترانه و دریای سرخ شمالی همانند ترازهای زیرین به درون رودخانه جوی (AR) از طریق سردچال وارد می‌شود (شکل B, C, ۷).

میانگین فشار سطح دریا (MSLP)

سردچال عرض میانی ترازهای فوقانی منجر به شکل‌گیری یک هسته کم فشار بر روی ترکیه در سطح زمین شده است که عمق نفوذ آن تا جنوب شبه جزیره عربستان است. پرفشار عربستان، اقیانوس هند، شرق آفریقای مرکزی، دریای سرخ جنوبی و جنوب شبه جزیره عربستان را تا ۱۹ درجه شمالی در برگرفته است (شکل A.۸). در ۲۰ درجه شمالی بر روی شبه جزیره عربستان همگرایی دو جریان کم فشار ترکیه و پرفشار عربستان رخ داده است. بیشترین حجم رطوبتی دریای سرخ در جنوب آن با ۱۸ گرم مشاهده می‌شود. رطوبت دریای



شکل ۷- نقشه‌های میانگین روزانه میزان رطوبت ویژه (نواحی رخی)، ارتفاع ژئوپتانسیل (منحنی‌های مشکی)، جریان باد (فلش‌های مشکی) در تراز میانی (۷۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ هکتوپاسکال) روز ۲۶ مارس ۲۰۰۳ هستند. فلش مشکی منقطع نشان دهنده مسیر رودخانه جوی غرب آفریقای شمالی، فلش مشکی در نقشه‌های A, B رودخانه جوی شرق آفریقای مرکزی و بیضی قرمز موقعیت جغرافیایی ایران را نشان می‌دهد. اعداد چشمه‌های رطوبتی تغذیه کننده رودخانه جوی و ایران را توسط پراارتفاع عربستان را نشان می‌دهند. چشمه‌های رطوبتی حاره: ۱ دریای عرب، ۳ خلیج فارس، ۴ دریای عمان.

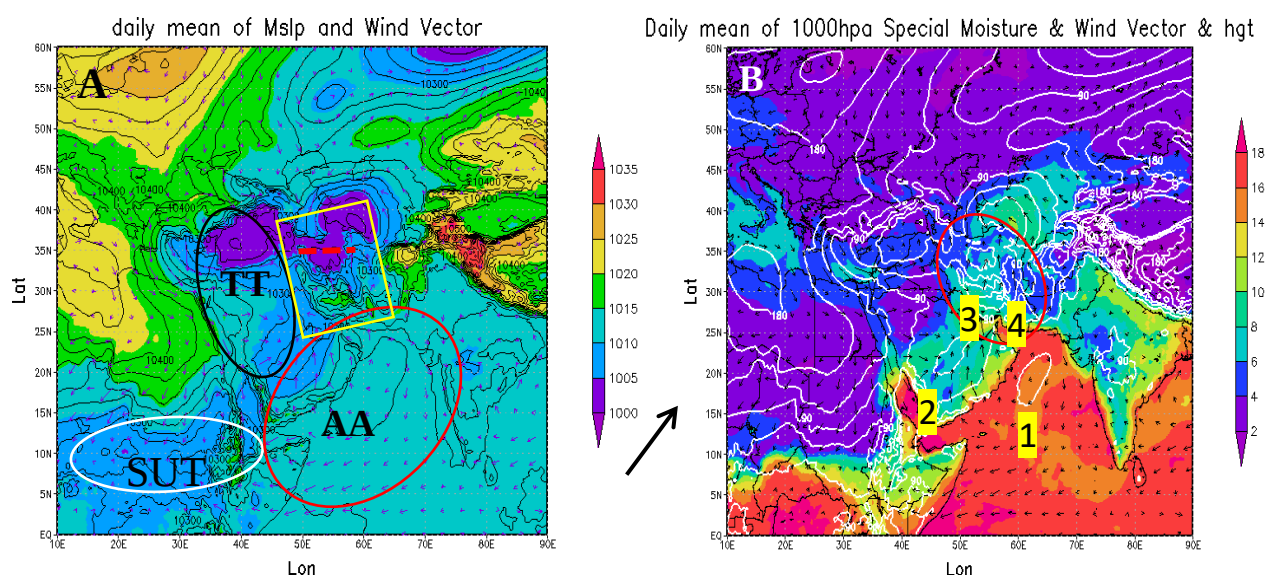
Figure 7- Daily average maps of specific humidity (colored areas), geopotential height (black curves), wind flow (black arrows) in the middle level (700, 600, 500 hectopascals) on March 26, 2003. The dashed black Arrow shows the course of the Atmospheric River in West North Africa, the black Arrow in maps A, B shows the Atmospheric River in East Central Africa and the red oval shows the geographical location of Iran. The numbers show the moisture springs feeding the Atmospheric River and Iran by the high altitude of Arabia. Tropical moisture springs: 1 Arabian Sea, 3 Persian Gulf, 4 Oman Sea.

مانع از ورود کم فشار سودان به شبه جزیره عربستان شده است.

نتایج

اگرچه تاکنون مطالعاتی در رابطه با نقش پرفشار عربستان بر اقلیم ایران و انتقال رطوبت به ایران کار شده است (Lashkari & Mohammadi, 2015; Mohammadi & Lashkari, 2018; Raziei, 2012; Khoshal et al., 2009; Karimi et al., 2019)، اما به‌طور منسجم و کلی موقعیت قرارگیری پرفشار عربستان در ترازهای مختلف جوی، تعامل آن با سیستم‌های عرض میانی، نقش آن در انتقال رطوبت حاره و شکل‌گیری رودخانه‌های جوی که منجر به تأمین رطوبت بارش‌های ایران می‌شود بررسی نشده‌اند که در این پژوهش به آن‌ها دست یافته‌ایم.

چند هسته کم فشار بر روی خاورمیانه و ایران مشاهده می‌شود. کم فشار شکل گرفته بر نیمه شمالی ایران با هسته مرکزی ۱۰۰۵ هکتوپاسکال در نقشه میانگین فشار سطح دریا از برخورد دو توده هوای گرم پرفشار عربستان که تا نواحی شمالی ایران پیشروی کرده است و توده هوای سرد شمالی است که دارای همرفت وزشی بر روی دریای خزر است و با جهتی شمال شرق- جنوب غرب به نواحی شمالی ایران وارد شده است. در غرب ایران جریان جنوب شرق- شمال غرب پرفشار عربستان مشاهده می‌شود که بیشتر نواحی غرب ایران را در بر گرفته است و رطوبت خلیج فارس را به این نواحی تزریق می‌کند. در جنوب شبه جزیره عربستان کم فشار شکل گرفته ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بر روی نقشه MSLP به علت همگرایی دو جریان کم فشار ترکیه و پرفشار عربستان است. همچنین هسته کم‌فشار جنوب دریای سرخ نیز محل برخورد دو توده هوای ذکر شده است. ورود پرفشار عربستان به جنوب شبه جزیره عربستان و جنوب دریای سرخ



شکل ۸- نقشه A نقشه میانگین فشار سطح دریا است. فشار سطح دریا (منحنی‌های مشکی)، باد وکتور تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (فلش‌های بنفش)، دایره قرمز پرفشار عربستان، دایره سفید (کم‌فشار سودان)، دایره مشکی (کم‌فشار ترکیه)، خط قرمز منقطع محل همگرایی دو جریان پرفشار عربستان و جریان‌های برون حاره روز ۲۶ مارس ۲۰۰۳. مستطیل زرد موقعیت جغرافیایی ایران.

TT(Turkey Trough), SUT(Sudan Trough), AA(Arabic Anticyclone)

نقشه B، رطوبت ویژه تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (منحنی‌های سفید) و جریان باد وکتور تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (فلش‌های مشکی) هکتوپاسکال در فلش مشکی محل همگرا شدن دو الگوی پراتفعا عربستان و کم فشار ترکیه. بیضی قرمز موقعیت جغرافیایی ایران. اعداد چشمه‌های رطوبتی منطقه حاره در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال. چشمه رطوبتی حاره: ۱ دریای عرب. ۲ دریای سرخ جنوبی. ۳ خلیج فارس. ۴ دریای عمان.

Figure 8- Map A is the average sea level pressure map. Sea level pressure (black curves), 1000 hPa level vector wind (purple Arrows), high pressure red circle in Saudi Arabia, white circle (low pressure in Sudan), black circle (low pressure in Turkey), red line Discontinuity of the convergence of two high-pressure currents of Arabia and extratropical currents on March 26, 2003. The yellow rectangle is the geographic location of Iran.

Map B, specific humidity at 1000 hectopascals (white curves) and vector wind flow at 1000 hectopascals (black Arrows) - hectopascals in the black arrow is the convergence of the two patterns of high pressure in Arabia and low pressure in Turkey. The red oval is the geographical location of Iran. The number of humid springs in the tropical region at the level of 1000 hectopascal. Tropical moisture spring: 1 Arabian Sea. 2 Southern Red Sea. 3 Persian Gulf. 4 Sea of Oman.

پژوهش حاضر نشان از نقش مهم پراارتفاع عربستان در انتقال رطوبت حاره به ایران و رخداد بارش دارد. در ۷ الگوی مورد بررسی (جدول ۱)، پراارتفاع عربستان در جنوب و جنوب‌شرق سیستم‌های عرض میانی واقع شده است. زبانه‌های پراارتفاع عربستان با حرکت و اچرخندی خود رطوبت آب‌های گرم حاره‌ای اقیانوس هند، دریای عرب و دریای سرخ جنوبی و آب‌های گرم جنب‌حاره خلیج فارس و دریای عمان را به منطقه برون‌حاره و ایران انتقال می‌دهد. میزان نفوذ سردچال عرض میانی در تراز زیرین و شاخه جنوبی بادهای غربی در تراز میانی شاخص مهم تعیین‌کننده جایگاه و موقعیت هسته پراارتفاع عربستان و میزان گسترش آن به سمت غرب و شمال ایران است. در تراز زیرین نفوذ شدید سردچال عرض میانی ترکیه به مناطق حاره و جنب‌حاره و گسترش منطقه واگرایی آن بر روی شبه‌جزیره عربستان و ایران، منجر به استقرار هسته پراارتفاع عربستان در عرض‌های پایین و بر روی پاکستان، شمال شبه‌جزیره عربستان، دریای عمان و اقیانوس هند می‌شود. در تراز زیرین پراارتفاع عربستان نفوذ بیشتری بر روی نواحی شرق، جنوب‌شرق، سواحل جنوبی، مرکزی و غرب ایران دارد. در تراز میانی اگرچه زبانه‌های جنوبی سردچال ترکیه به سمت عرض‌های شمالی عقب نشینی می‌کنند اما شاخه جنوبی بادهای غربی گسترش زیادی در مناطق جنب‌حاره و حاره دارد. شاخه جنوبی در جنوب سردچال ترکیه یک ناوه را شکل داده است که منطقه واگرایی آن مناطق بیشتری از ایران را در بر می‌گیرد. با نفوذ بیشتر ناوه شاخه جنوبی بادهای غربی، هسته پراارتفاع عربستان جابه‌جایی جنوب‌سو دارد طوری که بر روی دریای عرب و در مواردی در حواشی جنوب-شرق شبه جزیره عربستان قرار می‌گیرد. این نفوذ، منجر به انتقال جنوب‌سوی هسته پراارتفاع عربستان به جنوب مدار ۱۵ درجه شمالی و در مواردی ۱۰ درجه شمالی می‌شود. در نتیجه گسترش آن بر روی ایران کاهش می‌یابد و محدود به نواحی جنوب‌شرق و شرق ایران می‌شود. از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا پراارتفاع عربستان نقشی بر روی اقلیم ایران ندارد. بیشترین اثر آن بر روی ایران در تراز زیرین و سپس در تراز میانی تا ۶۰۰ هکتوپاسکال است. به بیانی دیگر هر چه به ترازهای بالاتر صعود کنیم میزان تأثیر پراارتفاع عربستان بر روی ایران کاهش می‌یابد. نقش مهم دیگر پراارتفاع عربستان تقویت رطوبتی منطقه ITCZ در شرق آفریقای مرکزی است که محل صعود رطوبت حاره توسط سردچال، ناوه غربی و پراارتفاع عربستان هستند. ای جی دی وریس (A vries, 2012)؛ دی وریس و همکاران (A Almazroui et al., 2016)، المزوری و همکاران (Kumar et al., 2019) نیز نفوذ تراف های عرض‌های بالاتر به منطقه حاره را عاملی مهم در انتقال رطوبت حاره به برون‌حاره دانسته‌اند. در بیشتر ترازها هسته پراارتفاع عربستان بر روی آب‌های گرم دریای عرب و دریای عمان واقع شده است.

پراارتفاع عربستان همچنین عامل مهمی در انتقال برون‌حاره‌ای رطوبت حاره با جهتی جنوب‌غرب-شمال‌شرق در تراز میانی و با جهتی جنوبی-شمالی در تراز زیرین است. تعامل پراارتفاع عربستان با سردچال عرض میانی منجر به شکل‌گیری رودخانه جوی با منشأ حاره‌ایی از شرق آفریقای مرکزی می‌شود که با جهتی جنوب‌غرب-شمال‌شرق و با عبور از روی دریای سرخ و شبه جزیره عربستان وارد ایران می‌شود. مهم‌ترین مسیر ورود رودخانه‌های جوی به ایران، جنوب‌غربی است (Salimi & Saligheh, 2016). در تراز زیرین، پراارتفاع عربستان رطوبت اقیانوس هند و دریای عرب را به رودخانه جوی (AR) بر روی شبه جزیره عربستان وارد می‌کند. رطوبت دریای عمان نیز از طریق جریان و اچرخندی پراارتفاع عربستان با جهتی جنوب‌غرب-شمال‌شرق به جنوب شرق و سواحل دریای عمان وارد می‌شود و به تغذیه رطوبتی رودخانه جوی (AR) و سواحل جنوبی ایران می‌انجامد. در تراز میانی پراارتفاع عربستان رطوبت اقیانوس هند، دریای عرب و جنوب دریای سرخ را به رودخانه جوی (AR) شبه جزیره عربستان تزریق می‌کند و از طریق رودخانه جوی (AR) وارد ایران می‌شوند. در تراز ۵۰۰ و ۶۰۰ هکتوپاسکال پراارتفاع عربستان با جابه‌جایی غرب‌سوی خود، رطوبت دریای سرخ جنوبی و اقیانوس هند را بر روی شرق آفریقای مرکزی و شمالی و بر روی شبه جزیره عربستان به رودخانه جوی (AR) تزریق می‌کند (شکل ۷، B.C). از تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا پراارتفاع عربستان با جابه‌جایی غرب سو و جنوب‌سوی خود، در تغذیه رطوبتی رودخانه جوی (AR) بر روی ایران نقشی ندارد. در این صورت رطوبت دریای سیاه، شرق دریای مدیترانه و دریای سرخ شمالی از طریق سردچال عرض میانی به درون رودخانه جوی (AR) وارد می‌شود. جابه‌جایی غرب‌سو و شرق‌سوی پراارتفاع عربستان به همراه تراف عرض میانی نقش مهمی در مسیر رودخانه‌های جوی (AR) وارد شده به ایران دارند (Lashkari & Esfandiari, 2021).

محل همگرایی بین دو سامانه سردچال عرض میانی و پراارتفاع عربستان در ترازهای مختلف جو با توجه به جابه‌جایی دو سامانه نسبت به هم تغییر یافته است. تنها در تراز زیرین بین سردچال و پراارتفاع عربستان همگرایی رخ می‌دهد. در تراز میانی از ۶۰۰ هکتوپاسکال به بالا با شکل‌گیری ناوه غربی شاخه جنوبی بادهای غربی، همگرایی بین ناوه غربی و پراارتفاع عربستان است. در تراز زیرین (۸۵۰ و ۸۰۰ هکتوپاسکال) به علت جریان جنوبی-شمالی پراارتفاع عربستان محل همگرایی دو سامانه نیز جنوبی-شمالی است که مناطق غرب ایران را در بر گرفته است. در تراز میانی همگرایی دو سامانه جهتی نصف‌النهاری (جنوب‌غرب-شمال‌شرق) دارد و با عبور از دریای سرخ جنوبی، شبه‌جزیره عربستان و خلیج فارس وارد ایران می‌شود. در تمام ترازها شروع همگرایی دو سامانه از دریای سرخ

جنوبی است و تنها مسیر آن تغییر می‌یابد.

در نقشه‌های سطح زمین، بر روی شبه‌جزیره عربستان همگرایی دو جریان کم‌فشار ترکیه و پرفشار عربستان رخ داده است که در محل همگرایی دو سامانه یک کم‌فشار شکل می‌گیرد. رطوبت دریای عرب، اقیانوس هند و رطوبت دریای سرخ جنوبی از طریق جریان واچرخندی پرفشار عربستان در امتداد منطقه واگرایی کم‌فشار ترکیه وارد مناطق جنوب‌غرب، غرب و شمال غرب ایران می‌شوند. جریان باد نشان می‌دهد که در سطح زمین نقش پرفشار عربستان مهم‌تر از کم‌فشار ترکیه است و بیشترین نقش را در انتقال رطوبت مناطق حاره و جنب‌حاره به مناطق جنوب‌غرب، غرب و شمال‌غرب ایران دارد. همچنین بیشتر مناطق ایران تحت حاکمیت پرفشار عربستان است. در الگوهای مورد بررسی، پرفشار عربستان با انتقال رطوبت بیشتر از مناطق حاره و جنب‌حاره به ایران باعث تأمین رطوبت بارش‌های فرین ایران طی دوره سرد سال شده است که مطابق با کارهای رضیئی (Raziei, 2012) و کریمی و همکاران (Karimi et al., 2019) است. در این پژوهش در نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل و جریان باد مشهود است که جریان واچرخندی پرفشار عربستان بر روی شرق آفریقای مرکزی، دریای سرخ جنوبی، جنوب شبه‌جزیره عربستان و بر روی نواحی غرب ایران، مانع از ورود کم‌فشار ترکیه و کم‌فشار سودان به ایران شده‌اند در نتیجه این دو سامانه نقشی در بارش‌های فرین صدک ۹۵ نداشته‌اند. این نتایج با تحقیقات انجام گرفته بر بارش‌های فرین ایران که نشان داده‌اند کم‌فشار سودان (Rastgoo & Ranjbar, 2018; Saadatabadi, 2018; Borna, 2016; Parak et al., 2015; Movahedi et al., 2015) و کم‌فشار مدیترانه (Mostafaei et al., 2002; Alijani, 2002; Dadashi & Kashki, 2016) طی فصل سرد سال عامل مهم و اصلی رخداد بارش‌های فرین هستند و با آوردن رطوبت از دریای عرب، دریای سرخ، خلیج فارس و دریای عمان جنوب غرب و غرب ایران را متأثر می‌سازند (Heydarizad et al., 2018). همسو نیست. محمدی و لشکری (Mohamadi & Lashkari, 2021). لشکری و محمدی (Lashkari & Mohamadi, 2015) نیز در این رابطه بیان کرده‌اند که، جابه‌جایی شرق سوی پراارتفاع عربستان باعث حرکت واچرخندی آن بر روی آب‌های گرم دریای عرب و دریای عمان می‌شود که رطوبت آنها را به درون سامانه‌های سودانی انتقال می‌دهد و به تقویت آن می‌انجامد. در حالی که در این پژوهش پراارتفاع عربستان مانعی بر گسترش سامانه سودانی بر روی خاورمیانه است. از نتایج مهم این تحقیق این است که کم‌فشار سودان و مدیترانه عامل اصلی تمام بارش‌های فرین فراگیر ایران نیستند.

بر اساس نقشه‌های میانگین فشار سطح دریا، در غرب ایران جریان جنوب‌شرق - شمال‌غرب پرفشار عربستان حاکم است و رطوبت خلیج فارس را به این نواحی تزریق می‌کند. وجود رطوبت بیشتر بر

روی شبه‌جزیره عربستان نتیجه هدایت و انتقال رطوبت از چشمه‌های رطوبتی مناطق حاره، جنب‌حاره و برون‌حاره توسط دو سامانه کم‌فشار ترکیه و پرفشار عربستان است که با همگرا شدن بر روی شبه‌جزیره عربستان حجم رطوبتی آنجا را افزایش می‌دهند. همگرایی دو سامانه، منجر به انتقال حجم بیشتری از رطوبت اقیانوس هند و دریای سرخ جنوبی توسط جریان واچرخندی پرفشار عربستان و رطوبت دریای مدیترانه و دریای سرخ شمالی و مرکزی توسط جریان چرخندی کم‌فشار ترکیه به روی شبه‌جزیره عربستان و خلیج فارس شده است. جریان جنوبی - شمالی پرفشار عربستان با عبور از دریای عرب، رطوبت آن را وارد خلیج فارس می‌کند. رطوبت خلیج فارس نیز توسط جریان پرفشار عربستان به نواحی جنوب، جنوب‌غرب و غرب که در دامنه غربی رشته کوه زاگرس واقع شده‌اند وارد می‌شوند. به عبارتی در سطح زمین پرفشار عربستان مهم‌ترین الگوی گردشی و رطوبت خلیج فارس مهم‌ترین منبع رطوبتی بارش‌های غرب و جنوب غرب ایران است.

نتیجه‌گیری

پراارتفاع جنب حاره عربستان بر اساس موقعیت قرارگیری و تعامل با الگوهای گردشی عرض میانی، نقش مهمی در تأمین رطوبت بارش‌های فرین - فراگیر با صدک ۹۵ دوره سرد سال ایران دارد. در ترازهای مختلف جو، جایگاه و موقعیت استقرار هسته مرکزی پراارتفاع عربستان و میزان گسترش آن به سمت شمال و غرب ایران را سامانه‌های عرض میانی تعیین می‌کنند. بیشترین حاکمیت پراارتفاع عربستان بر روی ایران در تراز زیرین است و در تراز میانی کاهش می‌یابد. در واقع در تراز زیرین ایران تحت حاکمیت دو الگوی سردچال عرض میانی ترکیه در مناطق غرب و شمال و پراارتفاع عربستان در مناطق جنوبی و شرقی است. با توجه به نفوذ بیشتر شاخه جنوبی بادهای غربی و مداری شدن جریانات غربی در تراز میانی، پراارتفاع عربستان جابه‌جایی شرق سو و جنوب سو دارد که هسته آن به ۱۵ و حتی ۱۰ درجه عرض شمالی می‌رسد. در نتیجه از حاکمیت و اثرات آن بر ایران در تراز میانی کاسته می‌شود. پراارتفاع عربستان منجر به ناپایداری جو بر روی ایران نمی‌شود اما عاملی مهم در تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر فصل سرد سال ایران است. تأمین رطوبت بارش‌های فرین فراگیر ایران در فصل سرد سال توسط پراارتفاع عربستان با ایجاد رودخانه جوی با منشاء حاره‌ایی و انتقال رطوبت حاره به برون حاره صورت می‌گیرد که به شرح ذیل می‌باشد:

الف: شکل‌گیری رودخانه جوی با منشاء حاره‌ایی و از شرق آفریقای مرکزی به علت تعامل و همراه شدن پراارتفاع عربستان با سردچال عرض میانی: این رودخانه‌ی جوی در اثر تعامل دو الگوی پراارتفاع عربستان و سردچال عرض میانی تشکیل و وارد ایران

رودخانه جوی است.

در سطح زمین و تراز زیرین، پراارتفاع عربستان رطوبت دریای عرب و خلیج فارس را به نواحی غرب و شمال غرب ایران می‌رساند و مانع از ورود گسترده کم فشار مدیترانه به نواحی غرب و جنوب غرب ایران می‌شود. همچنین ورود زبانه‌های پراارتفاع عربستان به دریای سرخ جنوبی مانع از ورود کم فشار سودان به خاورمیانه است. در نتیجه پراارتفاع عربستان می‌تواند مانع از ورود دو سامانه مهم بارشی کم فشار سودان و کم فشار مدیترانه در روزهای با بارش فرین فراگیر دوره سرد سال ایران شود. به عبارتی کم فشار سودان و کم فشار مدیترانه و سامانه ادغامی کم فشار سودان - مدیترانه عامل اصلی تمام بارش‌های فرین فراگیر ایران نیستند.

می‌شود. پراارتفاع عربستان با جریان واچرخندی خود بر روی آب‌های گرم اقیانوس هند، دریای عرب و خلیج فارس به تغذیه رطوبتی رودخانه جوی شرق آفریقای مرکزی که با جهتی جنوب غرب - شمال - شرق و با عبور از روی دریای سرخ و شبه جزیره عربستان وارد ایران می‌شود، می‌انجامد. با جابه جایی جنوب سو و شرق سوی پراارتفاع عربستان که بیشتر در تراز میانی رخ می‌دهد این رودخانه جوی تشکیل نمی‌شود.

ب: تقویت رطوبتی منطقه ITCZ در شرق آفریقای مرکزی: پراارتفاع عربستان با حرکت واچرخندی خود رطوبت اقیانوس هند را به شرق آفریقای مرکزی می‌رساند و منجر به تقویت رطوبتی منطقه ITCZ در شرق آفریقای مرکزی می‌شود که محل منشاء شکل گیری

References

1. A de Vries, A.J., Tyrlis, E., Edry, D., Krichak, S.O., Steil, B., & Lelieveld, J. (2013). Extreme precipitation events in the Middle East: dynamics of the Active Red Sea Trough. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(13), 7087-7108.
2. Almazroui, M., Kamil, S., Ammar, K., Keay, K., & Alamoudi, A.O. (2016). Climatology of the 500-hPa Mediterranean storms associated with Saudi Arabia wet season precipitation. *Climate Dynamics*, 47(9), 2029-2042. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50569>
3. A de Vries, A.J., Feldstein, S.B., Riemer, M., Tyrlis, E., Sprenger, M., Baumgart, M., & Lelieveld, J. (2016). Dynamics of tropical-extratropical interactions and extreme precipitation events in Saudi Arabia in autumn, winter and spring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1862-1880. <https://doi.org/10.1002/qj.2781>
4. Alijani, B., Mirzaee, N., & Jahedi, A. (2002). A Synoptic analysis comprehensive and heavy rainfall in Iran: case study 16-31 st 2019. *Climate Change and Climate Disaster*, 1(2), 70-114. (In Persian)
5. Alijani, B., Toulabi Nejad, M., & Karbalaie Darei, A. (2019). Investigating the effects of global warming on subtropical high pressure. *Physical Geography Research*, 51(1), 33-50. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.258677.1007223>
6. Alijani, B. (1997). Climate of Iran, Payam Noor University Publications. (In Persian)
7. Alipour, Y., Hedjazizadeh, Z., Akbary, M., & Saligheh, M. (2018). A study of the subtropical high pressure 500 hPa level changes in the Iran's atmosphere with emphasis on climate change. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 7(18), 1-16. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/JNEH.2017.3206>
8. Asakereh, H., & Fatahey, M. (2019). Analysis of annual changes of subtropical high pressure ridge over Iran. *Geography and Planning*, 23(69), 191-211. (In Persian). <https://www.magiran.com/p2087446>
9. Barati, Gholamreza, & Lashkari, H. (2018). the role of convergence of pressure systems on the occurrence of dust storms in Khuzestan province. *Geography and Development Quarterly*, 9(22), 39-56. (In Persian)
10. Bishop, D.A., Williams, A.P., Seager, R., Fiore, A.M., Cook, B.I., Mankin, J.S., & Rao, M.P. (2019). Investigating the causes of increased twentieth-century fall precipitation over the southeastern United States. *Journal of Climate*, 32(2), 575-590. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0244.1>
11. Borna, R. (2016). Identification of synoptic patterns of heavy rainfall in Maron basin (case study: rainfall on November 29, 2012). *Quarterly Journal of Physical Geography*, 36, 47-59. (In Persian)
12. Boron, A., Zohoriyan Pordel, M., Lashkari, H., Shakiba, A., & Mohamadi, Z. (2019). Synoptic analysis of Saudi Arabian sub-tropical high pressure in height waves of Khuzestan Province. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 2(1), 55-67. (In Persian)
13. Borzoi, F., & Azizi, G. (2015). Suggesting a simple criterion to estimate heavy rainfall in Iran. *Physical Geography Research*, 47(3), 347-365. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.55335>
14. Choi, W., & Kim, K.Y. (2019). Summertime variability of the western North Pacific subtropical high and its synoptic influences on the East Asian weather. *Scientific Reports*, 9(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44414-w>
15. Colbert, A.J., & Soden, B.J. (2012). Climatological variations in North Atlantic tropical cyclone tracks. *Journal of Climate*, 25(2), 657-673. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00034.1>
16. Dadashi Roudbari, A., & Kashki, A. (2018). Synoptic evaluation heavy precipitation Khorasan Razavi Province March 29, 2007. *Geographical Planning of Space*, 8(29), 75-90. (In Persian)

17. Davis, N.A., & Birner, T. (2013). Seasonal to multidecadal variability of the width of the tropical belt. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 7773-7787. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50610>
18. Farajzadeh Asl, M., Karimi Ahmadabad, M., Ghaemi, H., & Mobasheri, M.R. (2009). Mechanism of water vapor transport in winter rainfall over the West of Iran (A case study: 1-7 January 1996). *The Journal of Spatial Planning*, 13(1), 193-217. (In Persian). <http://hsmasp.modares.ac.ir/article-21-7869-en.html>
19. 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. (In Persian)
20. Karimi, M., Khoshakhlagh, F., Shamsi por, A.A., & Noruzi, F. (2019). Arabian subtropical high pressure circulation patterns in the middle troposphere and its relationship with Iran's Precipitation. *Journal of Geography and Planning*, 23(69), 233-255. (In Persian)
21. Karimi, M., Noruzi, F., Jafari, M., Khoshakhlagh, F., & Shamsipour, A. (2022). Arabian anticyclone's spatial variations at 850 hPa simultaneously with precipitation of October to March in Iran. *Physical Geography Research*, 53(4), 509-529. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.330917.1007647>
22. Khoshal, G., Khosravi, M., & Nazareipoor, H. (2009). Identification humidity resources and course of super heavy precipitation in Bushehr Province. *Geography and Development*, 7(16), 7-28. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gdij.2009.1173>
23. Lamb, H.H. (1972). Climate, Present, Past and Future: Fundamentals and climate now", Volume I of Climate
24. Lashkari, H., & Esfandiari, N. (2021). Synoptic and thermodynamic patterns of atmospheric rivers associated to heavy precipitation in the cold period of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 10(29), 125-144. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/jneh.2020.33830.165>
25. Lashkari, H., Matkan, A.A., Azadi, M., & Mohammadi, Z. (2017). Synoptic analysis of the role of Saudi Arabia subtropical high pressure subtropical and polar jet streams and severe droughts in South and South West of Iran. *Journal of Researches in Earth Sciences*, 8(2), 141-163. (In Persian)
26. Lashkari, H., Matkan, A., Azadi, M., & Mohamadi, Z. (2018). Synoptic patterns lead to premature precipitation in the South and South West of Iran during the period (1979-2015). *Geography and Planning*, 22(64), 247-266. (In Persian)
27. Lashkari, H., & Mohamadi, 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). <https://doi.org/10.22059/JPHGR.2015.53679>
28. Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2019). Study on the role of annual movements of Arabian subtropical high pressure in the late start of precipitation in southern and southwestern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 2069-2076. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2716-x>
29. Lau, W.K., & Kim, K.M. (2015). Robust Hadley circulation changes and increasing global dryness due to CO₂ warming from CMIP5 model projections. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(12), 3630-3635. <https://doi.org/10.1073/pnas.1418682112>
30. Lee, E.J., Yeh, S.W., Jhun, J.G., & Moon, B.K. (2006). Seasonal change in anomalous WNPSH associated with the strong East Asian summer monsoon. *Geophysical Research Letters*, 33(21). <https://doi.org/10.1029/2006GL027474>
31. Lee, S.S., Seo, Y.W., Ha, K.J., & Jhun, J.G. (2013). Impact of the western North Pacific subtropical high on the East Asian monsoon precipitation and the Indian Ocean precipitation in the boreal summertime. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(2), 171-182. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0018-x>
32. Li, L., Li, W., & Kushnir, Y. (2012). Variation of the North Atlantic subtropical high western ridge and its implication to Southeastern US summer precipitation. *Climate Dynamics*, 39(6), 1401-1412. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1214-y>
33. Lu, R. (2001). Interannual variability of the summertime North Pacific subtropical high and its relation to atmospheric convection over the warm pool. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 79(3), 771-783. <https://doi.org/10.2151/jmsj.79.771>
34. Majidirad, N., & Rahimi Herabadi, S. (2021). The behavior of spatio-temporal spatial elevation changes and their impact on the intensification of droughts, with emphasis on the management of rural systems responses. *Climate Change Research*, 2(5), 59-80. <https://doi.org/10.30488/CCR.2020.261823.1032>
35. Masoudian, A. (2012). The weather of Iran. Mashhad: Sharia Tos Publications. (In Persian)
36. Mitro, S.U.K.A.R.N.I. (2010). The influence of the subtropical high-pressure systems on rainfall and temperature distribution in Suriname and implications for rice production in the Nickerie District. *The University of the West Indies*
37. Mofidi, A., (2005). Synoptic climatology of torrential rains originating from the Red Sea in the Middle East. *Geographical Research*, 4(75), 71-93. (In Persian)
38. Khorshiddoust, M., Mohammadi, G.H., Hosseini Sadr, A., Javan, K., & Jamali, A. (2014). Synoptic analysis of effective factors on dust frequency in West of Iran. *Journal of Geography and Planning*, 17(46), 47-66.
39. Kumar, K., & Phanikumar, D.V. (2019). Influence of tropical-extratropical interactions on the dynamics of

- extreme rainfall event: A case study from Indian region. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 85, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2018.12.002>
40. Mohammadi, Z., & Lashkari, H. (2018). Effects of spatial movement of Arabia subtropical high pressure and subtropical Jet on synoptic and thermodynamic patterns of intense wet years in the south and south west Iran. *Physical Geography Research*, 50(3), 491-509. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.249422.1007165>
 41. Mohammadi, Z., Lashkari, H., & Mohammadi, M.S. (2021). Synoptic analysis and core situations of Arabian anticyclone in shortest period precipitation in the south and southwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(12), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07572-8>
 42. Movahedi, S., & Kashki, A. (2015). Investigating the spatio-temporal extent of the tropical cyclone in the Northern Hemisphere. *Geography and Environmental Planning*, 3(59), 209-224.
 43. Mostafaei, H., Alijani, B., & Saligheh, M. (2016). Synoptic analysis of widespread heavy rains in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(4), 65-76. (In Persian). <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2533-en.html>
 44. Nieto Ferreira, R., & Rickenbach, T.M. (2020). Effects of the north Atlantic subtropical high on summertime precipitation organization in the southeast United States. *International Journal of Climatology*, 40(14), 5987-6001. <https://doi.org/10.1002/joc.6561>
 45. Pepler, A., Dowdy, A., & Hope, P. (2019). A global climatology of surface anticyclones, their variability, associated drivers and long-term trends. *Climate Dynamics*, 52(9), 5397-5412. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4451-5>
 46. Rastgoo, Z., & Ranjbar Saadatabadi, A. (2018). Study of heavy and extreme rain in Bushehr province in term of synoptic-dynamic. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 1(1), 77-96.
 47. Razei, T., Mofidi, A., Santos, J.A., & Bordi, I. (2012). Spatial patterns and regimes of daily precipitation in Iran in relation to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1226-1237.
 48. Rodwell, M.J., & Hoskins, B.J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15), 3192-3211. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3192:SAASM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3192:SAASM>2.0.CO;2)
 49. Saaroni, H., & Ziv, B. (2000). Summer rain episodes in a Mediterranean climate, the case of Israel: climatological-dynamical analysis. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 20(2), 191-209. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(200002\)20:2<191::AID-JOC464>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(200002)20:2<191::AID-JOC464>3.0.CO;2-E)
 50. Saligheh, M., & Sadeghini, A. (2010). Investigation subtropical high pressure spatial variations in summer rainfalls of the southern half of Iran. *Geography and Development*, 8(17), 83-98. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.1135>
 51. Salimi, S., & Saligheh, M. (2016). The effects of atmospheric rivers on Iran climate. *Physical Geography Research Quarterly*, 48(2), 247-264. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.59366>
 52. Seager, R., Murtugudde, R., Naik, N., Clement, A., Gordon, N., & Miller, J. (2003). Air-sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. *Journal of Climate*, 16(12), 1948-1966. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<1948:AIATSC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1948:AIATSC>2.0.CO;2)
 53. Seager, R., Osborn, T.J., Kushnir, Y., Simpson, I.R., Nakamura, J., & Liu, H. (2019). Climate variability and change of Mediterranean-type climates. *Journal of Climate*, 32(10), 2887-2915. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0472.1>
 54. Sun, J., & Ming, J. (2019). Possible mechanism for the weakening relationship between Indian and central East Asian summer rainfall after the late 1970s: role of the mid-to-high-latitude atmospheric circulation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131, 517-524. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0586-5>
 55. Wang, B., Xiang, B., & Lee, J.Y. (2013). Subtropical high predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(8), 2718-2722. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214626110>
 56. Wei, W., Li, W., Deng, Y., & Yang, S. (2019). Intraseasonal variation of the summer rainfall over the Southeastern United States. *Climate Dynamics*, 53(1), 1171-1183. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4345-6>
 57. Wu, G., Liu, Y., & Liu, P. (2004). Formation of the summertime subtropical anticyclones. In *East Asian Monsoon*. (pp. 499-544). https://doi.org/10.1142/9789812701411_0014
 58. Wu, X., Xu, L., Hong, Y., Chen, J., Qiu, Y., Hu, B., & Li, M. (2019). The air pollution governed by subtropical high in a coastal city in Southeast China: Formation processes and influencing mechanisms. *Science of The Total Environment*, 692, 1135-1145. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.341>
 59. Xiang, B., Wang, B., Yu, W., & Xu, S. (2013). How can anomalous western North Pacific subtropical high intensify in late summer?. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 2349-2354. <https://doi.org/10.1002/grl.50431>
 60. Zangeneh, S., Lashkari, H., & Moradi, M. (2015). Synoptic analysis of Saudi pressure and effect on drought the South and South West of Iran. *Geography and Environmental Sustainability*, 5(2), 17-31.
 61. Zhou, T.J., & Yu, R.C. (2005). Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 27, 110(D8), <https://doi.org/10.1029/2004JD005413>
 62. Heydarizad, M., Raeisi, E., Sori, R., & Gimeno, L. (2018). The identification of Iran's moisture sources using a

- Lagrangian particle dispersion model. *Atmosphere*, 9(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/atmos9100408>
63. Parak, F., Roshani, A., & Alijani, B. (2015). Synoptic investigation of the role of the Sudanese low pressure system during wet and drought years in the Southern Half of Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 4(3), 75-90. <https://doi.org/10.22067/geo.v4i3.40062>

Contents

Investigation of Nitrate Adsorption Isotherms by Iron (III) and Zinc-coated Biochars Using Ultrasonic	541
M.R. Alashti, M. Khoshravesh, F. Sadegh-Zadeh, H.M. Azamathulla	
Assessment of Useful Life of Negarestan Reservoir Dam Using Hypsometric Curve by Modified Strahler Method and Satellite Imagery	555
A. Zahiri, Kh. Ghorbani, H. Feiz Abady, H. Sharifan	
The Effect of Deficit Irrigation and Regulated Deficit Irrigation on Yield and Water Productivity of the Watermelon	575
N. Bahremand, H. Aroiee, A. Aien	
Enhancing the Accuracy of Land Use/Cover Map Using Some Spectral Indices in Sarab County–East Azerbaijan	591
A. Sarabchi, H. Rezaei, F. Shahbazi	
Effect of Biochar and Activated Carbon from Organic Waste on the Immobilization of Heavy Metals (Pb, Zn, Cd) and Corn Plant Growth in Contaminated Soil	607
M. Malehmir Chegini, A. Golchin	
Trend Analysis of Temperature Changes in Northwest of Iran Using Extreme Indices and Its Relation to Atmospheric Circulation	629
Kh. Javan, A. Movaghari	
The Effects of the Arabia Anticyclone (AA) on the Extreme and Widespread Precipitation of the Cold Season in Iran	649
H. Fahimi, A. Faraji, B. Alijani	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 38

No. 5

2024

Published by: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

Manager in Charge: Valizadeh, R. (Ruminant Nutrition) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editor in Chief: Fotovat, A. (Soil Science) Prof., Ferdowsi University of Mashhad

Editorial Board:

Alizadeh, A.	Irrigation and Drainage	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Bazrafshan, J.	Agricultural Meteorology	Assoc. Prof., Faculty of Agricultural Engineering and Technology
Fotovat, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Ghadiri, H.	Soil Science	Prof. Griffith University
Khorassani, R.	Soil Science	Assoc. Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Khormali, F.	Soil Science	Prof., Agricultural Sciences & Natural Resources University of Gorgan
Lakzian, A.	Soil Science	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Liaghat, A.	Irrigation and Drainage	Prof., University of Tehran
Mosaedi, A.	Irrigation and Civil Eng.	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Mousavi Baygi, M	Agricultural Meteorology	Prof., Ferdowsi University of Mashhad
Oustan, Sh.	Soil Science	Prof., Tabriz University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

Address: Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Iran

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

Web Site: <https://jsw.um.ac.ir/>

Journal of Water and Soil is published bimonthly (six issues per year).

Contents

Investigation of Nitrate Adsorption Isotherms by Iron (III) and Zinc-coated Biochars Using Ultrasonic	541
M.R. Alashti, M. Khoshravesh, F. Sadegh-Zadeh, H.M. Azamathulla	
Assessment of Useful Life of Negarestan Reservoir Dam Using Hypsometric Curve by Modified Strahler Method and Satellite Imagery	555
A. Zahiri, Kh. Ghorbani, H. Feiz Abady, H. Sharifan	
The Effect of Deficit Irrigation and Regulated Deficit Irrigation on Yield and Water Productivity of the Watermelon	575
N. Bahremand, H. Aroiee, A. Aien	
Enhancing the Accuracy of Land Use/Cover Map Using Some Spectral Indices in Sarab County–East Azerbaijan	591
A. Sarabchi, H. Rezaei, F. Shahbazi	
Effect of Biochar and Activated Carbon from Organic Waste on the Immobilization of Heavy Metals (Pb, Zn, Cd) and Corn Plant Growth in Contaminated Soil.....	607
M. Malehmir Chegini, A. Golchin	
Trend Analysis of Temperature Changes in Northwest of Iran Using Extreme Indices and Its Relation to Atmospheric Circulation	629
Kh. Javan, A. Movaghari	
The Effects of the Arabia Anticyclone (AA) on the Extreme and Widespread Precipitation of the Cold Season in Iran.....	649
H. Fahimi, A. Faraji, B. Alijani	