

نشریه علمی آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



شماره ۴

جلد ۳۸

سال ۱۴۰۳

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

شماره پیاپی: ۹۶

عنوان مقالات

ارزیابی و مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی فاقد آمار هواشناسی استان لرستان ۴۳۱
مصطفی فلاحی خوشحی - علیرضا کربلائی درئی - زهرا حجازی زاده - پرستو همه زاده

بررسی تأثیر خاک‌ورزی و کوددهی بر اساس نیاز گیاه بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius*)
در شرایط دیم ۴۴۷
دنیا پرمه - حمیدرضا چقازردی - فرزاد مندنی - علی بهشتی آل آقا - دانیال کهریزی

تأثیر کانی‌های رسی و کاتیون‌های تبادلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی ۴۶۵
فاطمه رخس - احمد گلچین - علی بهشتی آل آقا

ارزیابی رقومی تناسب سرزمین برای کشت آبی برخی از محصولات زراعی با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین
(آبیک-قزوین) ۴۸۱
فاطمه جنتی - فریدون سرمیدیان

رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از $Mg-Zn-Mn-Al-LDH$: اثر اسید مالیک و نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی ۴۹۷
زهرا موحدی راد - محسن حمیدپور

ارزیابی وضعیت پتاسیم در خاک جنگل‌های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد ۵۱۱
زینب براتی - حمیدرضا اولیایی - ابراهیم ادهمی - مهدی نجفی قبری

ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از اطلاعات آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک (مطالعه موردی: آبخوان
آبرفتی شمال شرق گچساران) ۵۲۷
اکبر خدری - امیر صابری نصر - نصرالله کلاتتری

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 4 مهر - آبان 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

خرمالی، 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 (شش شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 431 ارزیابی و مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی فاقد آمار هواشناسی استان لرستان
مصطفی فلاحی خوشحی - علیرضا کربلانی درئی - زهرالحاجزی زاده - پرستو همه زاده
- 447 بررسی تأثیر خاک‌ورزی و کوددهی بر اساس نیاز گیاه بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) در شرایط
دیم
دنیا پرمه - حمیدرضا چقازردی - فرزاد مندنی - علی بهشتی آل آقا - دانیال کهریزی
- 465 تأثیر کانی‌های رسی و کاتیون‌های تبدلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی
فاطمه رخش - احمد گلچین - علی بهشتی آل آقا
- 481 ارزیابی رقومی تناسب سرزمین برای کشت آبی برخی از محصولات زراعی با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین (آییک - قزوین)
فاطمه جنتی - فریدون سرمیدیان
- 497 رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از Mg-Zn-Mn-Al-LDH: اثر اسید مالیک و نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی
زهرا موحدی راد - محسن حمیدپور
- 511 ارزیابی وضعیت پتاسیم در خاک جنگل‌های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد
زینب براتی - حمیدرضا اولیایی - ابراهیم ادهمی - مهدی نجفی قیری
- 527 ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از اطلاعات آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک (مطالعه موردی: آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران)
اکبر خدری - امیر صابری نصر - نصرالله کلاتری

Evaluation and Comparison of Satellite Rainfall Products in Mountainous Areas with Lack of Meteorological Data of Lorestan Province

M. Fallahi khoshhi^{1*}, A.R. Karbalaee Doree², Z. Hedjazizadeh³, P. Hamezadeh⁴

1- Researcher, The Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Lorestan Branch, Lorestan, Iran

(*- Corresponding Author Email: mostafa.fallahi67@gmail.com)

2 and 3- Assistant Professor and Professor, Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran, respectively.

4- Graduate in Water Structures, Faculty of Agriculture, University of Lorestan, Lorestan, Iran

Received: 05-03-2024
Revised: 27-08-2024
Accepted: 31-08-2024
Available Online: 31-08-2024

How to cite this article:

Fallahi khoshhi, M., Karbalaee Doree, A.R., Hedjazizadeh, Z., & Hamezade, P. (2024). Evaluation and comparison of satellite rainfall products in mountainous areas without statistics of Lorestan province. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 429-443. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87068.1395>

Introduction

The large temporal and spatial changes of precipitation, especially in mountainous areas, have turned it into a controversial variable in climate models. Measuring precipitation (rain and snow) along with its distribution and changes is very important to improve our understanding of global water cycle and energy, water resources monitoring, hydrological modeling. Lack of reliable data is one of the most important challenges in rainfall analysis. Due to the significant temporal and spatial variability of precipitation in mountainous areas, accurate spatially distributed data is crucial for effective water resource assessment and management. However, many mountainous regions have limited rain gauge stations. Today, satellite products are commonly used to measure precipitation in these areas, but the variability among these products raises concerns about their accuracy in mountainous regions. Additionally, the quality of satellite products differs between various products and across different climatic regions, making it essential to thoroughly evaluate them before use. The purpose of this research was to evaluate the precipitation data of two satellite products (GPM, PERSIAN) and reanalysis data (ECMWF) in the estimation of precipitation in mountainous areas without stations in Lorestan province.

Method

This study utilized rainfall data from 24 synoptic and rain gauge stations across Lorestan province. Emphasis was placed on stations situated in or near mountainous regions. The selected stations were chosen based on their suitable spatial distribution and record length. The rainfall data spanned the period from 2015 to 2021 and included daily, monthly, and annual measurements. To evaluate satellite rainfall algorithms and estimate rainfall in regions with limited data, data from the GPM and PERSIAN satellites were employed, along with ECMWF reanalysis data. The PERSIAN rainfall algorithm is a remote sensing-based method that utilizes artificial neural networks. It calibrates infrared data with passive microwave estimates and converts longwave infrared images into rainfall estimates using a three-step process. The spatial resolution of this product is $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, and it offers hourly, daily, and monthly temporal resolution. The PERSIAN rainfall algorithm data can be accessed from <https://chrsdata.eng.uci.edu>. The GPM mission aims to provide continuous observations of Earth's precipitation. It employs the GPM Microwave Imager (GMI) and Dual-frequency Precipitation Radar (DPR) to observe both snow and rain. The final product, called IMERG, is generated through multiple runs of the algorithm for each observation time. Initial estimates are quickly provided, and subsequent estimates improve as more information becomes



©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.2024.87068.1395>

available. The spatial resolution of the GPM product is $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, and it offers hourly, daily, and monthly temporal resolution. IMERG data can be obtained from <https://gpm.nasa.gov/data>. CMWF reanalysis data is derived from the combination of short-term simulations of numerical weather prediction models with ground-based observational data. These simulations are controlled with observational data, and the resulting reanalysis database provides global coverage from 1979 with a spatial resolution ranging from $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ to 3° . The temporal resolution of ECMWF reanalysis data is hourly, daily, and monthly. More information about ECMWF data can be found at <https://www.ecmwf.int/> (Azizi, 2019). To evaluate the accuracy of the products, R-squared correlation (R^2), root mean square error (RMSE), standard deviation (MAD), correlation coefficient (R), error deviation (MBE) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) were used. Also, the probability of detection (POD), false alarm ratio (FAR), and critical success index (CSI) indices were used to validate the data.

Results

The results showed that none of the three products are suitable for estimating daily precipitation in mountainous areas. However, on a monthly scale, these products provide reasonable estimates. Among the three, the GPM satellite product demonstrated better accuracy on a monthly scale, based on error levels and the spatial distribution of estimated precipitation. On an annual scale, GPM also performed best, as indicated by both statistical errors and the spatial patterns of average annual precipitation. According to the MBE index, on daily and monthly scales, the ECMWF product tended to overestimate precipitation, while the PERSIANN and GPM products underestimated it. On an annual scale, GPM and ECMWF products overestimated precipitation, whereas PERSIANN underestimated it.

Keywords: ECMWF, GPM, Mountain, PERSIAN, Precipitation, Satellite

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۲۹-۴۴۳

ارزیابی و مقایسه محصولات بارش ماهواره‌ای در مناطق کوهستانی فاقد آمار هواشناسی استان لرستان

مصطفی فلاحی خوشحی^{۱*} - علیرضا کربلانی درئی^۲ - زهراجازی زاده^۳ - پرستو همه زاده^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

اندازه‌گیری بارش همراه با توزیع و تغییرات زمانی-مکانی آن برای بهبود درک ما از چرخه آب، نظارت بر منابع آب و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی مهم است. کمبود داده‌های قابل‌اعتماد به‌خصوص در مناطق کوهستانی یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در اندازه‌گیری بارش است. امروزه محصولات ماهواره‌ای به‌عنوان ابزاری برای اندازه‌گیری بارش در این مناطق مورد استفاده قرار می‌گیرند اما اختلاف بین محصولات موجود دقت آن‌ها را برای مناطق کوهستانی به چالش می‌کشد، بنابراین ارزیابی کامل محصولات ماهواره‌ای قبل از کاربرد آن‌ها ضرورت دارد. هدف از این تحقیق، ارزیابی داده‌های بارش دو محصول ماهواره‌ای (GPM, PERSIAN) و داده‌های بازکاوی (ECMWF) در برآورد بارش در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان است. برای ارزیابی دقت محصولات از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAD)، ضریب همبستگی (CORR)، انحراف خطا (MBE) و ضریب نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. همچنین برای اعتبارسنجی داده‌ها از شاخص‌های احتمال آشکارسازی (POD)، نسبت هشدار اشتباه (FAR)، شاخص موفقیت بحرانی (CSI) استفاده شد. نتایج نشان داد که هیچ‌یک از سه محصول نماینده مناسبی برای برآورد بارش در مقیاس روزانه در مناطق کوهستانی نیستند. در مقیاس ماهانه این محصولات نتایج مطلوبی برای برآورد بارش ارائه می‌دهند. از بین سه محصول، با داده‌های مختلف، محصول ماهواره GPM با توجه به میزان خطاها و همچنین الگوی مکانی بارش تخمین زده‌شده، از دقت بهتری در مقیاس ماهانه برخوردار است. در مقیاس سالانه نیز با توجه به مقدار خطاهای آماری و همچنین الگوهای مکانی میانگین بارش سالانه، ماهواره‌ی GPM عملکرد بهتری در برآورد مقدار بارش را نشان داد. همچنین با توجه به نتایج شاخص MBE در مقیاس روزانه و ماهانه محصولات ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN و GPM کم برآورد در تخمین بارش هستند. در مقیاس سالانه محصولات GPM و ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN کم برآورد هستند.

واژه‌های کلیدی: بارش، کوهستان، GPM، ECMWF، PERSIAN

مقدمه

بارش یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژیکی زمین است و

تأثیرات زیادی بر جان و دارایی انسان دارد (Vasavi et al., 2022). بارش، مهم‌ترین و مؤثرترین منبع آب یک حوزه آبخیز است که از نظر زمانی و مکانی دارای تنوع قابل‌توجهی است و اغلب توزیع نامنظم و ناهمگن از خود نشان می‌دهد (Wang et al., 2020). برآورد و اندازه‌گیری دقیق بارش پیش‌نیاز توسعه پایدار در زمینه‌های اقتصادی، کشاورزی، اکولوژیکی و اجتماعی است (Tan et al., 2018). علاوه بر این، بارش مهم‌ترین داده ورودی برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی رواناب است (Zeng et al., 2018). حوزه‌های آبخیز کوهستانی به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات آب‌وهوایی از اهمیت ویژه‌ای

۱- پژوهشگر جهاد دانشگاهی، واحد لرستان، لرستان. ایران
 (*- نویسنده مسئول: Email: mostafa.fallahi677@gmail.com)
 ۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار و استاد، آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
 ۴- دانش‌آموخته سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان. ایران
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87068.1395>

برخورد دارند (Panthi et al., 2015). به واسطه شرایط خاص این مناطق، از جمله شیب‌های تند، توپوگرافی ناهموار، صعب‌العبور بودن و عدم امکان دسترسی مطلوب و عدم استقرار نیروی انسانی و محدودیت‌های فنی و اقتصادی، شرایط استقرار شبکه پایش مناسب بارش در این حوضه‌ها فراهم نیست (Ruan et al., 2017). در کنار ایستگاه‌های سینوپتیک در اکثر مناطق ایران شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی به‌طور فشرده‌تری بارش را اندازه‌گیری می‌کنند ولی با این‌وجود به دلیل تنوع مکانی و زمانی زیاد بارش و به‌ویژه تغییرپذیری آن در اقلیم‌های متفاوت، محققان غالباً در تهیه نقشه‌های بارش با مشکلاتی به‌ویژه در مناطق کوهستانی مواجه می‌شوند (Ghairi Sara & Yazdan Panah, 2013). در سال‌های اخیر، روش‌های برآورد بارش با استفاده از محصولات ماهواره‌ای در مقیاس جهانی و با وضوح زمانی و مکانی بالا به‌عنوان جایگزینی برای داده‌های زمینی توسعه یافته است (Jiang et al., 2016). مزیت بررسی بارندگی با استفاده از روش‌های سنجنش‌ازدور، شناخت بهتر پدیده بارش و پارامترهای مؤثر بر آن، در یک گستره مکانی وسیع است (Shokri Kochach, 2020). محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره، قادرند به‌طور مؤثر برآورد بارش را به مناطقی که با کمبود ایستگاه‌های اندازه‌گیری متداول یا توزیع ناهمگون و نامنظم آن‌ها مواجه هستند، گسترش دهند (Khanmohammadi et al., 2022)؛ اما دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای از یک منطقه به منطقه دیگر متفاوت است و امروزه با اطمینان در مورد صحیح بودن اطلاعات بارش ماهواره‌ای خاص، نمی‌توان اظهارنظر کرد. بنابراین در چنین شرایطی بررسی دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای موجود در مناطق مختلف، یکی از نیازهای تحقیقاتی است.

در نواحی کوهستانی استان لرستان به دلیل محدودیت‌های اقتصادی و یا جغرافیایی، ایستگاه‌های هواشناسی دارای تراکم پائینی هستند و استفاده از داده‌های این ایستگاه‌ها در سطح استان با محدودیت همراه است. همچنین بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی استان در ارتفاعات پایین‌تر از ۲۰۰۰ متر قرار دارند، درحالی‌که مساحت زیادی از استان در ارتفاع بالاتر از ۲۰۰۰ متری قرار دارد. این امر باعث شده است که اطلاعات دقیقی از توزیع و تغییرات زمانی-مکانی بارش در ارتفاعات بالاتر از ۲۰۰۰ در استان لرستان وجود نداشته باشد. در سال‌های اخیر، محققین زیادی به بررسی محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف پرداخته‌اند؛ وی و همکاران (Wei et al., 2020) قابلیت پایش خشک‌سالی به‌وسیله تخمین‌های بارش ماهواره‌ای را مورد تأیید قرار دادند. تای و همکاران (Taye et al., 2020) خشک‌سالی هواشناسی را در حوضه آبی نیل با استفاده از محصولات بارندگی ماهواره‌ای بررسی کردند. آدان (Adane et al., 2021) به ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای PERSIAN- CDR

و TRMM3B43v7 پرداخته و نتایج آن‌ها بیانگر عملکرد مطلوب هر دو محصول در نواحی ارتفاعات غربی حوضه و عملکرد ضعیف‌تر در نواحی شرقی است. نتایج مطالعه پائولو و همکاران (Paolo et al., 2022) نشان داد که تخمین‌های خوبی از بارندگی از ماهواره Sentinel-1 با در نظر گرفتن گام‌های زمان تجمع بیشتر از ۲۰ روز قابل دست‌یابی است. برتومیر و اسپرسو (Berthomier & Espresso, 2023) یک مدل یادگیری عمیق را ارائه کردند که برای تخمین بارش از مشاهدات ماهواره‌ای در مقیاس جهانی طراحی شده است. مطالعه دژنه و همکاران (Dejene et al., 2023) بیانگر عملکرد مناسب مدل ماهواره‌ی CHIRPS در مقیاس‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه و قابلیت تشخیص خشک‌سالی است. نتایج ترکیب روش‌های درون‌یابی و محصولات بارش ماهواره‌ی TRMM در مطالعه یوسفی و همکاران (Yousefi et al., 2021) حاکی از برتری روش گرادیان ۴ بعدی در تخمین مکانی بارش در استان مازندران بوده است. سیفی کبریایی و همکاران (Seifi Kobriya et al., 2021) با اصلاح شبکه ماهواره‌ای (TRMM) با استفاده از روش گرادیان چهاربعدی نشان دادند که اصلاح شبکه TRMM سبب افزایش ۳۰-۵۰ درصد دقت این ماهواره شده است. نتایج مطالعه‌ی خان محمدی و همکاران (Khanmohammadi et al., 2022) در حوزه آبخیز نیشابور نشان داد که سه محصول ماهواره‌ای IMERG از نوع Near Real Time، 3B42RT-7 از نوع Real Time و PERSIAN-CDR از نوع Final Run در مقیاس روزانه مناسب نیستند ولی در مقیاس ماهانه عملکرد بهتری را نشان دادند. از دیگر مطالعات می‌توان به مطالعات (Tafte et al., 2019; Abdulahipour et al., 2020; Lu et al., 2023; Huffman et al., 2023; Talchabhadhel et al., 2021; Kubota et al., 2020; Chen et al., 2020; Gao et al., 2020) اشاره کرد. بررسی منابع نشان داد که تا به حال عملکرد این محصولات در مناطق کوهستانی استان لرستان ارزیابی نشده و مطالعات پیشین به‌صورت ایستگاهی، محدود و در ارتفاعات پایین مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند؛ بنابراین هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی دو محصول ماهواره‌ای (GPM و PERSIAN) و داده‌های بازکاوی (ECMWF) در برآورد بارش از طریق مقایسه با داده‌های زمینی در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان است.

روش تحقیق

در پژوهش حاضر داده‌های بارش ۲۴ ایستگاه سینوپتیک و باران‌سنجی با پراکنش و طول دوره‌ی آماری مناسب در سطح استان لرستان با تأکید بر ایستگاه‌های مستقر و یا نزدیک به مناطق کوهستانی انتخاب شد (جدول ۱ و شکل ۱). از داده‌های بارش

معیارهای ارزیابی

برای ارزیابی دقت برآورد بارش هر یک از محصولات از آماره‌های ضریب تعیین^۴ (R)، جذر میانگین مربع خطا^۵ (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا^۶ (MAD)، ضریب همبستگی^۷ (CORR)، انحراف خطا^۸ (MBE) و ضریب نش-سانکلیف^۹ (NSE) استفاده شد. برای محاسبه این شاخص‌ها از روابط زیر استفاده شد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2 \sum_{i=1}^N (X_s - \bar{X}_s)^2}}$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}}$$

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{i=1}^T (P_i^{obs} - P_i^{est})}{\sum_{i=1}^T P_i^{obs}} \times 100$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{\sum_{i=1}^N (X_o - \bar{X}_o)^2}$$

در روابط فوق X_o داده‌های مشاهداتی، X_s داده‌های شبیه‌سازی شده، $\bar{X}_o$ میانگین داده‌های مشاهداتی، N تعداد داده‌ها، P_i^{est} و P_i^{obs} به‌ترتیب بارش مشاهداتی و ماهواره‌ی، t گام زمانی و T طول کل سری زمانی.

اعتبارسنجی مدل

برای صحت‌سنجی نتایج محاسباتی از شاخص‌های مطابقت، شامل احتمال آشکارسازی (POD^{10})، نسبت هشدار اشتباه (FAR^{11})، شاخص موفقیت بحرانی (CSI^{12}) استفاده شد. طبق تعریف، شاخص POD نسبت تعداد برآوردهای صحیح داده‌ها به کل بارندگی‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌ها است و مقدار POD برابر با ۱ بیانگر تخمین درست نقاط بارانی توسط ماهواره است. شاخص FAR نسبت پیش‌بینی نادرست به تعداد کل پیش‌بینی‌ها است و مقدار آن بین صفر

(روزانه، ماهانه و سالانه) ماهواره‌های GPM و PERSIAN و داده‌های بازکاوی (ECMWF) (دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱) و ایستگاه‌های همدیدی و باران‌سنجی (دوره زمانی ۲۰۱۵-۲۰۲۱) در سطح استان لرستان برای ارزیابی الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای و برآورد مقدار بارش در مناطق فاقد آمار استفاده گردید.

الگوریتم بارش PERSIAN: مدل PERSIAN^۱ یک الگوریتم تخمین بارندگی با استفاده از سنجش‌ازدور با به‌کارگیری شبکه عصبی مصنوعی است. رویکرد این الگوریتم، واسنجی داده‌های مادون‌قرمز با برآوردهای میکروویوهای غیرفعال است و در سه مرحله تصاویر مادون‌قرمز با طول موج بلند را به تخمین بارندگی تبدیل می‌کند. این محصول با تفکیک مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه و تفکیک زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه بین 60° درجه جنوبی و شمالی از تارنمای [eduhttps://chrsdata.eng.uci.edu](https://chrsdata.eng.uci.edu) قابل دریافت است.

الگوریتم بارش GPM: سنجش جهانی بارندگی که به‌اختصار GPM^۲ نامیده می‌شود، هدف آن دیده‌بانی پیوسته بارندگی زمین است (NASA, 2016; Hou et al., 2014). این ماهواره، با استفاده از ابزار تصویربرداری ماکروویو (GMI) و رادار بارش دو فرکانسه (DPR)، می‌تواند بارش برف و باران را مشاهده کرده و محصول نهایی آن (IMERG) نام دارد. این الگوریتم چندین بار برای هر زمان مشاهده‌ای اجرا می‌شود، ابتدا یک تخمین سریع می‌زند و با رسیدن اطلاعات بیشتر، پی‌درپی تخمین‌های بهتری ارائه می‌دهد (Huffman et al., 2015). این محصول دارای تفکیک مکانی $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ درجه و تفکیک زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه است و از تارنمای ([v/datahttps://gpm.nasa.gov](https://gpm.nasa.gov/data)) قابل دریافت است.

داده‌های بازکاوی ECMWF: داده‌های باز تحلیل‌شده مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت جوی (ECMWF^۳) از ترکیب نتایج شبیه‌سازی‌های کوتاه‌مدت مدل‌های شبیه‌سازی عددی وضع هوا با داده‌های مشاهداتی زمینی، به‌دست می‌آیند. این شبیه‌سازی اولیه با داده‌های مشاهده‌ای کنترل می‌شوند. داده‌های پایگاه اطلاعاتی ECMWF از سال ۱۹۷۹ با پوشش سراسری 60° درجه شمالی و جنوبی، تفکیک مکانی $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ تا 3° درجه و در مقیاس زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه در دسترس می‌باشند (Azizi, 2019). داده‌های بازکاوی ECMWF از تارنمای (<https://www.ecmwf.int>) قابل دریافت است.

- 4- R-squared correlation (R²)
- 5- Root Mean Square Error (RMSE)
- 6- Mean Absolute Deviation (MAD)
- 7- Correlation Coefficient (R)
- 8- Mean Bias Error (MBE)
- 9- Nash-Sutcliffe Coefficient (NSE)
- 10- Probability of Detection
- 11- False Alarm Ratio
- 12- Critical Success Index

- 1- Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks
- 2- Global Precipitation Measurement
- 3- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

بازه ضرایب ۳/۲ تا ۹/۱ قرار می‌گیرد. در بسیاری از ایستگاه‌ها نتایج شاخص‌های آماری، دقت کافی را نشان نمی‌دهند، همچنین میزان همبستگی پیرسون در ایستگاه‌های مورد مطالعه پایین است. نتایج شاخص همبستگی در داده‌های ECMWF تا حدودی همبستگی بالایی را نشان می‌دهد. مقادیر ضریب نش ساتکلیف نیز عملکردهای پایین این سه محصول در منطقه (در مقیاس روزانه) را نشان می‌دهد (شکل ۲).

بر اساس شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای RMSE و MAD به ترتیب مربوط به محصولات ECMWF، PERSIAN و GPM است. بررسی ضریب همبستگی نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی با مقدار ۰/۵۲ مربوط به محصولات ECMWF است در این محصولات بیشترین ضریب همبستگی در ایستگاه‌های سینوپتیک مشاهده شد و نشان داد که داده‌های ECMWF در ایستگاه‌های سینوپتیک نسبت به ایستگاه‌های باران‌سنجی همبستگی بالاتر دارند. در محصولات PERSIAN میانگین ضریب همبستگی ۰/۳۳ است و محصولات این ماهواره بیشتر با داده‌های باران‌سنجی همبستگی بهتری نشان می‌دهند. بین محصولات GPM و داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی ارتباطی مشاهده نشد اما با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک همبستگی پایینی (به‌طور میانگین ۰/۲۰) نشان داد. مقادیر MBE برای دو محصول ماهواره‌ای PERSIAN و GPM منفی است که نشان می‌دهد این دو محصول مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند؛ اما مقدار مثبت MBE در مدل ECMWF نشان می‌دهد که محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، به‌صورت کلی محصولات ECMWF در مقیاس روزانه دارای اعتبار بیشتری است (جدول ۲).

و ۱ متغیر است و مقادیر کمتر آن بیانگر دقت بیشتر ماهواره است. شاخص CSI دقت نسبی ماهواره را تعیین می‌کند. این شاخص، هم به پیش‌بینی‌های نادرست و هم به رویدادهای ازدست‌رفته حساس است. برای محاسبه این شاخص‌ها از روابط زیر استفاده شد. در روابط فوق H تعداد پیش‌بینی‌هایی می‌باشد که در هر دو روش مقدار بارندگی ثبت‌شده است، F تعداد پیش‌بینی‌هایی است که فقط ماهواره مقدار بارندگی را ثبت کرده است. مقدار M تعداد پیش‌بینی‌هایی است که علی‌رغم وقوع بارندگی در ایستگاه زمینی، مقدار آن در ماهواره مورد نظر ثبت‌نشده است (Wilks, 2011).

$$POD = \frac{H}{H+M}$$

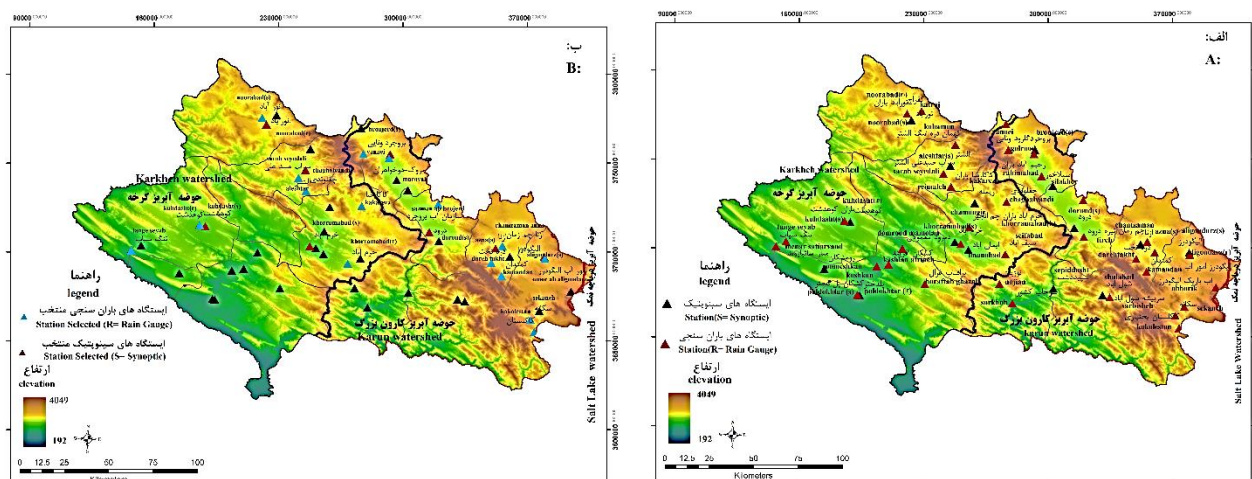
$$FAR = \frac{F}{F+H}$$

$$CSI = \frac{H}{H+F+M}$$

نتایج و بحث

ارزیابی و مقایسه بارش روزانه محصولات ماهواره‌ای

با توجه به هدف اصلی این مطالعه که بررسی میزان بارش برآورد شده با استفاده از دو محصول ماهواره GPM و PERSIAN و داده‌های بازکاوی ECMWF در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است، نتایج به‌صورت بررسی‌های روزانه، ماهانه و سالانه بطور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل ۲ شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای بر اساس بازه زمانی روزانه محاسبه‌شده است. بر اساس شاخص‌های آماری مندرج در شکل ۲ محصولات ماهواره‌ای، PERSIAN، ECMWF، GPM از دقت بالایی برای برآورد بارش روزانه برخوردار نیستند. در مقیاس روزانه شاخص RMSE



شکل ۱- الف: موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی استان لرستان. ب: ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی منتخب

Figure 1- A: Location of synoptic and rain gauge stations in Lorestan province. B: Selected synoptic and rain gauge stations

جدول ۱- موقعیت و مشخصات ایستگاه‌های منتخب
 Table 1- Location and characteristics of selected stations

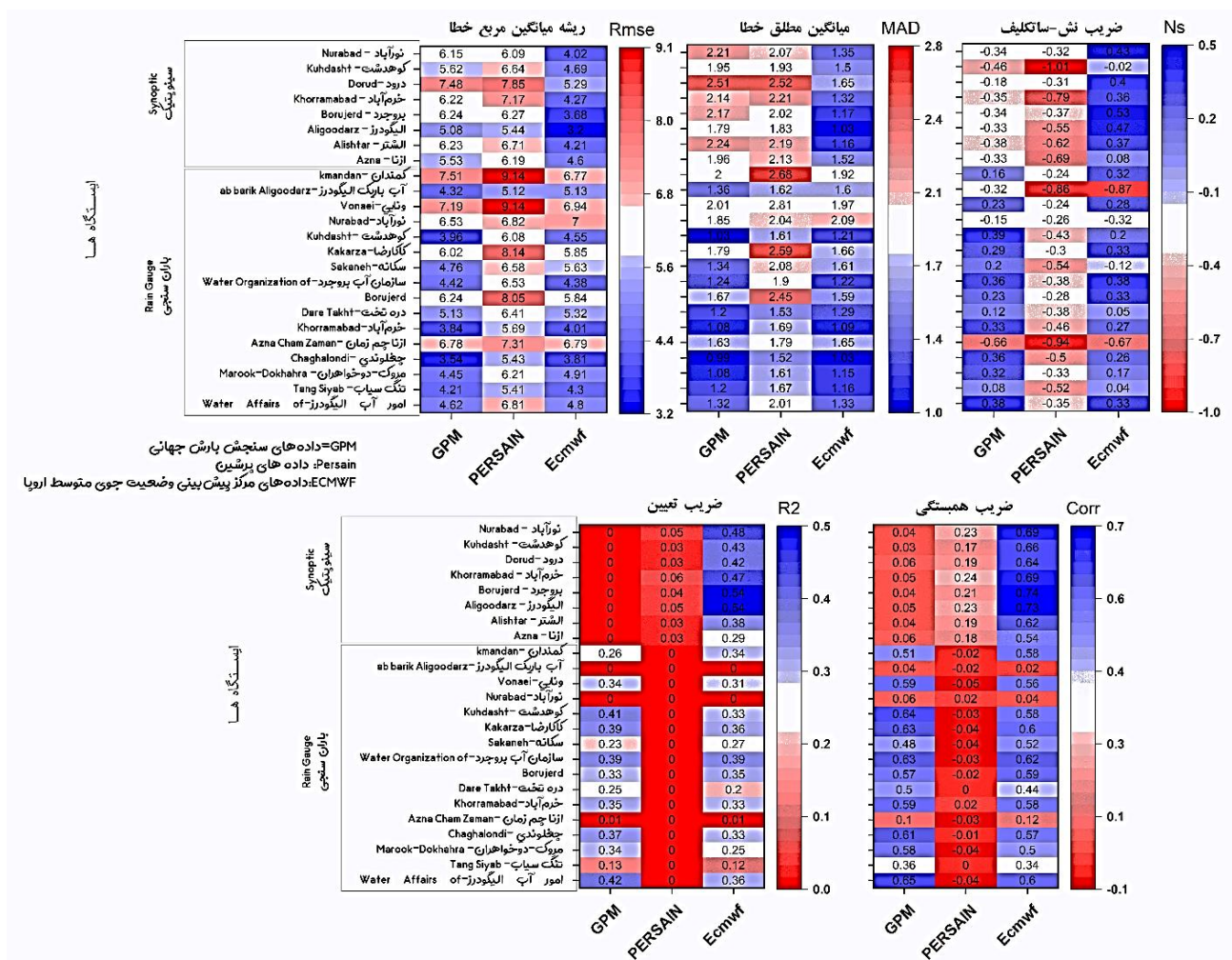
ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض	ایستگاه	ارتفاع	طول	عرض
س=سینوپتیک/ر=باران سنجی Station(S= Synoptic) (R= Rain Gauge)	Elevation	جغرافیایی Longitude	جغرافیایی Latitude	س=سینوپتیک/ر=باران سنجی Station(S= Synoptic) (R= Rain Gauge)	Elevation	جغرافیایی Longitude	جغرافیایی Latitude
الیگودرز (سینوپتیک) Aligoodarz (S)	2022.1	379349	3697282	خرم‌آباد (باران سنجی) Khorramabad (R)	1291	255532	3711512
کوه‌دشت (سینوپتیک) Kuhdasht (S)	1197.8	188645	3714463	سرآب صید علی (باران سنجی) Saraab Seyed Ali (R)	1570	241113	3741658
الشتر (سینوپتیک) Aleshtar (S)	1567.1	245048	3746135	چغلوندی (باران سنجی) Chaghalvandi (R)	1680	276623	3725791
دروود (سینوپتیک) Doroud (S)	1522.3	314677	3711119	کاکارضا (باران سنجی) Kakareza(R)	1531	245357	3734410
ازنا (سینوپتیک) Azna (S)	1871.8	352034	3702000	تنگ سیاب (باران سنجی) TangSiyab (R)	883	705051	3696607
نورآباد (سینوپتیک) Noorabad (S)	1859	223071	3771761	نورآباد (باران سنجی) Noorabad(R)	1790	774256	377586
بروجرد (سینوپتیک) Boroujerd(S)	1629	292683	3754995	کاکلستان (باران سنجی) Kakolestan(R)	1800	373753	3654893
خرم‌آباد (سینوپتیک) Khorramabad(S)	1147.8	247472	3703244	سکانه (باران سنجی) Sakaneh(R)	1900	371573	3661821
کوه‌دشت (باران سنجی) Kuhdasht(R)	1197	742716	3713130	سازمان آب بروجرد (باران سنجی) Water Organization of Borujerd (R)	1576	292099	3752746
کمندان (باران سنجی) Kamandan(R)	2025	355326	3686572	مروک-دوخواهران (باران سنجی) Marovak-Dokhahran(R)	1570	319806	3726830
دره تخت (باران سنجی) Dare Takht(R)	1870	349561	3693832	ونایی (باران سنجی) Vonaiei(R)	1970	277631	3755113
امور آب الیگودرز (باران سنجی) Water Affairs of Aligoodarz (R)	2010	379740	3696149	ازنا چم زمان (باران سنجی) Azna Cham Zaman(R)	1874	355790	3703396

برآوردها را نشان می‌دهند. با توجه به نتایج شاخص‌های آماری محصولات از دقت کافی برای برآورد بارش در مقیاس ماهانه برخوردار هستند. ضریب همبستگی در اکثر ایستگاه‌ها بالای ۹۰ درصد است. در محصولات PERSIAN بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های خرم‌آباد و دورود و کاکا رضا (میانگین ۹۵ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد و کمندان (میانگین ۵۷ درصد) مشاهده شد. در محصولات GPM بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، خرم‌آباد، دورود و کاکا رضا (میانگین ۹۸ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد (میانگین ۷۳ درصد) مشاهده شد. در محصولات ECMWF بالاترین مقدار همبستگی در ایستگاه‌های ازنا، بروجرد، خرم‌آباد، دورود و کاکا رضا (میانگین ۹۶ درصد) و کمترین مقدار ضریب همبستگی در ایستگاه‌های آب باریک الیگودرز و نورآباد (میانگین ۷۲ درصد) مشاهده شد. میزان ضریب تعیین نیز در اکثر ایستگاه‌ها بالای ۹۰ درصد است که نشان می‌دهد محصولات ماهواره‌ی دارای دقت لازم می‌باشند (شکل ۳). در مقیاس ماهانه داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک نسبت به داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی همبستگی بهتری با داده‌های ماهواره‌ی نشان می‌دهند.

برای تعیین محدودیت تشخیص بارش از طریق الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای، سه شاخص POD، FAR، CSI در مقیاس روزانه در ایستگاه‌ها بررسی گردید. با توجه به نتایج آماره POD محصولات ماهواره‌ی ECMWF با (POD=0.34) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ی: GPM با (POD=0.15) و PERSIAN با (POD=0.23) بارش را دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR که کسری از رخدادهایی را نشان می‌دهد که ماهواره به اشتباه بارندگی را تشخیص داده و در واقعیت بارندگی رخ نداده است، نشان داد که محصولات ماهواره‌ی ECMWF با (FAR =0.63) نسبت به سایر محصولات GPM (FAR =0.78) و PERSIAN با (FAR=0.69) دارای پیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است (جدول ۲).

ارزیابی و مقایسه بارش محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه

در مقیاس ماهانه برای ارزیابی داده‌ها در گام نخست مجموع بارش هر ماه از داده‌های روزانه محاسبه شد. بررسی شاخص‌های آماری در مقیاس ماهانه نشان داد که در هر سه محصول میزان خطا به میزان قابل‌توجهی کاهش پیدا کرده است و مدل‌ها دقت کافی در



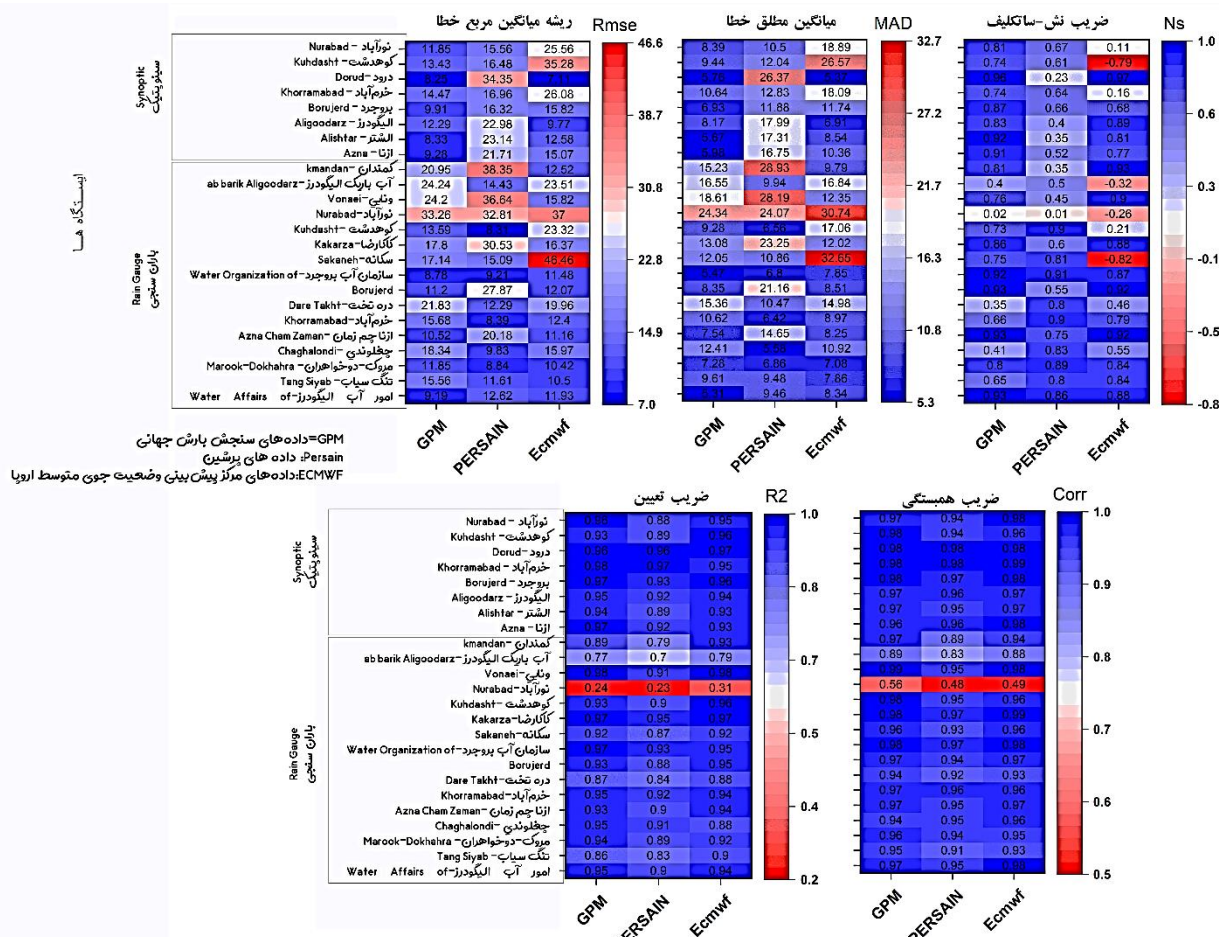
شکل ۲- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای در مقیاس روزانه
Figure 2- Calculation of statistical indicators of satellite products on a daily scale

جدول ۲- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ای در مقیاس روزانه
Table 2- Comparison of average statistical indicators of satellite products on a daily scale

روزانه Daily	میانگین مطلق خطا MAD	ریشه میانگین مربع خطا RMSE	ضریب همبستگی r(XY)	ضریب نش-ساتکلیف NSE	ضریب تعیین R ²	انحراف خطا MBE	نسبت هشدار اشتباه POD	نسبت هشدار اشتباه FAR	شاخص موفقیت بحرانی CSI
داده‌های سنجش بارش جهانی GPM	2.02	6.76	0.05	0.49-	0.01	0.69-	0.15	0.78	0.17
داده‌های پرشین PERSIAN	1.66	5.5	0.33	0.02-	0.18	0.54-	0.23	0.69	0.21
داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF	1.43	5	0.52	0.15	0.31	0.49	0.34	0.63	0.24

اعتبار بیشتری هستند (جدول ۳). در مقیاس ماهانه مقادیر MBE برای دو مدل GPM و PERSIAN منفی است (به ترتیب ۱۰- و ۱۴/۱-) که نشان می‌دهد این دو مدل مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده اند؛ اما مقدار MBE در مدل ECMWF مثبت (۱۳/۲) است که نشان می‌دهد محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، (جدول ۳ و شکل ۴).

بر اساس میانگین شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای MAD و RMSE مربوط به محصولات پایگاه داده‌های GPM و در مرحله بعد مربوط به محصولات ECMWF و PERSIAN است. بیشترین میزان میانگین همبستگی (R) به ترتیب با مقدار (۰/۹۵: ۰/۹۴) مربوط به محصولات PERSIAN, ECMWF, GPM است؛ بنابراین محصولات GPM نسبت به سایر محصولات دارای

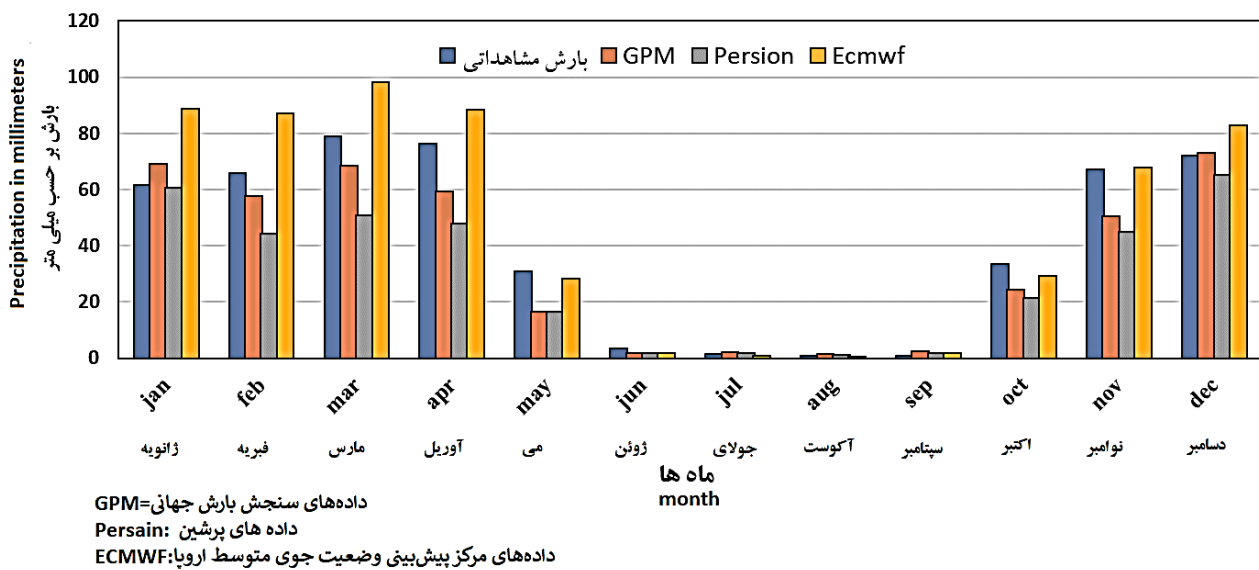


شکل ۳- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه
Figure 3- Calculation of statistical indicators of satellite products on a monthly scale

جدول ۳- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس ماهانه

Table 3- Comparison of average statistical indicators of satellite products on a monthly scale

ماهانه Monthly	میانگین مطلق خطا MAD	ریشه میانگین مربع خطا RMSE	ضریب همبستگی r(XY)	ضریب نش- ساتکلیف NSE	ضریب تعیین R ²	انحراف خطا MBE	نسبت هشدار اشتباه POD	نسبت هشدار اشتباه FAR	شاخص موفقیت بحرانی CSI
داده‌های سنجش بارش جهانی GPM	10.5	15.08	0.95	0.74	0.91	10-	0.93	0.18	0.88
داده‌های پرشین PERSIAN	14.51	19.35	0.92	0.62	0.86	14.1-	0.78	0.24	0.79
داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF	13.12	17.94	0.94	0.52	0.9	13.2	0.88	0.23	0.73



شکل ۴- میانگین بارش ماهانه محصولات ماهواره‌ای و بارش مشاهداتی (میلی‌متر)
 Figure 4- Average monthly precipitation of satellite products and observed precipitation (mm)

محصولات GPM نسبت به سایر محصولات دارای اعتبار بیشتری هستند (جدول ۴). در مقیاس سالانه مقادیر MBE برای دو مدل GPM و ECMWF مثبت است (به ترتیب ۳۶ و ۵۲) که نشان می‌دهد این دو مدل مقدار بارندگی را بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده اند؛ اما مقدار MBE در مدل PERSIAN منفی (۴۱-) است که نشان می‌دهد محصولات این ماهواره مقدار بارندگی را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است، (جدول ۴ و شکل ۶). منطقه مورد مطالعه، سرزمینی عمدتاً مرتفع و کوهستانی است که در فصول و ماه‌های مختلف تحت تأثیر سامانه‌های همیدی با منشأ متفاوت (پرفشار سیبری، پرفشار آزور، کم‌فشار سودان، سیکلون‌های مدیترانه) است و با توجه به اینکه هنوز محصولات ماهواره‌ای در مدل‌سازی اثرات پیچیده توپوگرافی بر بارش و سامانه‌های بارشی، مشکل دارند (Sharifi et al., 2019; Barros & Arulraj, 2020)، ممکن است مقادیر بارش برآورد شده و عدم قطعیت محصولات ماهواره‌ای در فصول و ماه‌های سال متفاوت باشد.

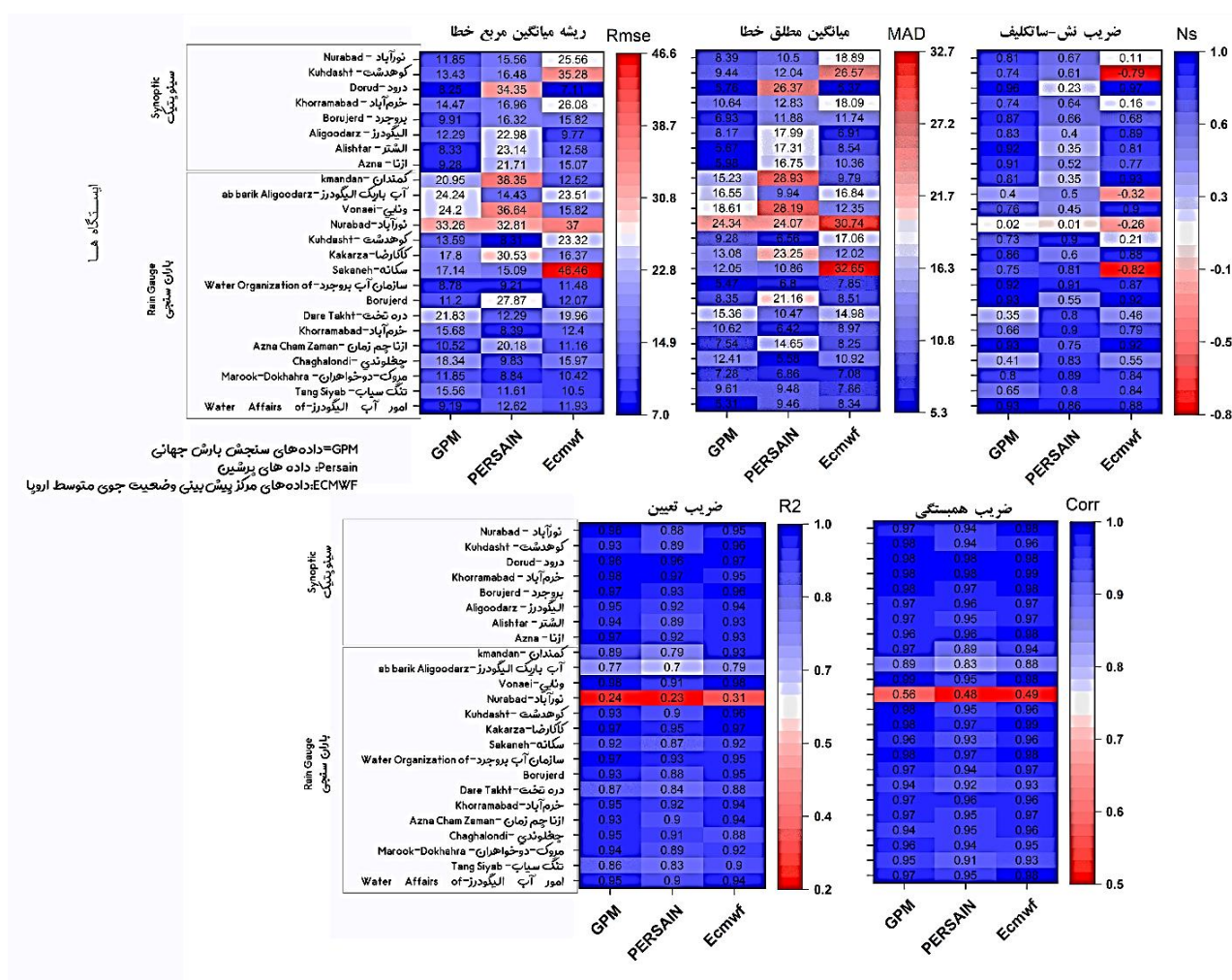
شاخص‌های POD، FAR، CSI در مقیاس سالانه نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (POD=0.82) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (POD=0.74) و PERSIAN با (POD=0.79) بارش را در دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (FAR=0.22) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (FAR=0.31) و PERSIAN با (FAR=0.26) دارای پیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است (جدول ۴).

شاخص‌های احتمالاتی مورد استفاده (CSI، FAR، POD) در مقیاس ماهانه نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (POD=0.93) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (POD=0.88) و PERSIAN با (POD=0.78) بارش را در دقیق‌تر تخمین می‌زند. همچنین آماره FAR نشان داد که محصولات ماهواره‌ای GPM با (FAR=0.18) نسبت به سایر محصولات ماهواره‌ای: ECMWF با (FAR=0.23) و PERSIAN با (FAR=0.24) دارای پیش‌بینی بارندگی‌های غیرواقعی کمتری است.

ارزیابی بارش سالانه محصولات ماهواره‌ای

بررسی شاخص‌های آماری در مقیاس سالانه نشان داد که در هر سه محصول میزان دقت محصولات مناسب است و محصولات دقت کافی در برآورد برش را نشان می‌دهند. ضریب همبستگی و ضریب نش ساتکلیف (NSE) نیز کفایت محصولات را نشان داد (شکل ۵)؛ اما میزان دقت برآورد سالانه بارش با توجه به شاخص‌های آماری، کمتر از محصولات ماهانه است.

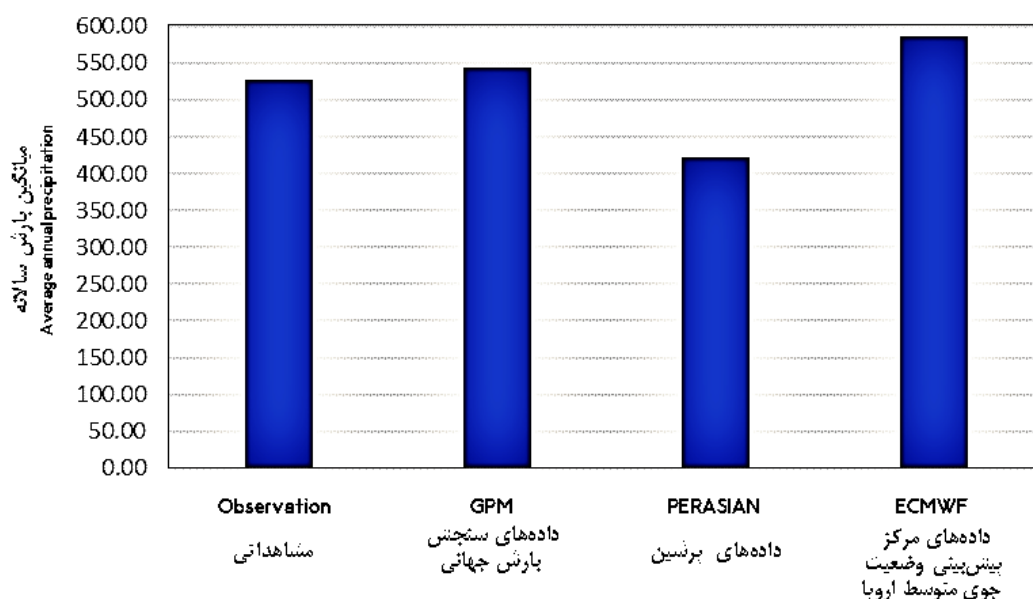
بر اساس میانگین شاخص‌های آماری کمترین مقدار خطای (RMSE، MAD) مربوط به محصولات پایگاه داده‌های GPM و در مرحله بعد مربوط به محصولات ECMWF و PERSIAN است. بیشترین میزان ضریب همبستگی (CORR) به ترتیب با مقدار (۰/۷۵- ۰/۷۳-۰/۷۴) مربوط به محصولات ECMWF، PERSIAN، GPM است. به طور کلی این محصولات برای تخمین بارش‌های سالانه، دارای اعتبار کمتری نسبت به بارش ماهانه می‌باشند و به صورت کلی



شکل ۵- محاسبه شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس سالانه
Figure 5- Calculation of statistical indicators of satellite products on an annual scale

جدول ۴- مقایسه میانگین شاخص‌های آماری محصولات ماهواره‌ی در مقیاس سالانه
Table 4- Comparison of average statistical indicators of satellite products on an annual scale

شاخص	نسبت هشدار	نسبت هشدار اشتباه	انحراف خطا	ضریب تعیین	ضریب نش- ساتکلیف	ضریب همبستگی	ریشه میانگین مربع خطا	میانگین مطلق خطا	سالانه
CSI	FAR	POD	MBE	R ²	NSE	R(XY)	RMSE	MAD	Yearly
0.75	0.22	0.82	36	0.61	0.5	0.75	149.9	124.7	داده‌های سنجش بارش جهانی GPM
0.69	0.26	0.79	41-	0.57	0.61	0.74	174.3	146.6	داده‌های پرشین PERSIAN
0.63	0.31	0.74	52	0.55	0.76-	0.73	173	147.6	داده‌های مرکز پیش‌بینی وضعیت جوی متوسط اروپا ECMWF



شکل ۶- میانگین بارش سالانه محصولات ماهواره‌ای و بارش مشاهداتی (میلی‌متر)

Figure 6- Average annual precipitation of satellite products and observed precipitation (mm)

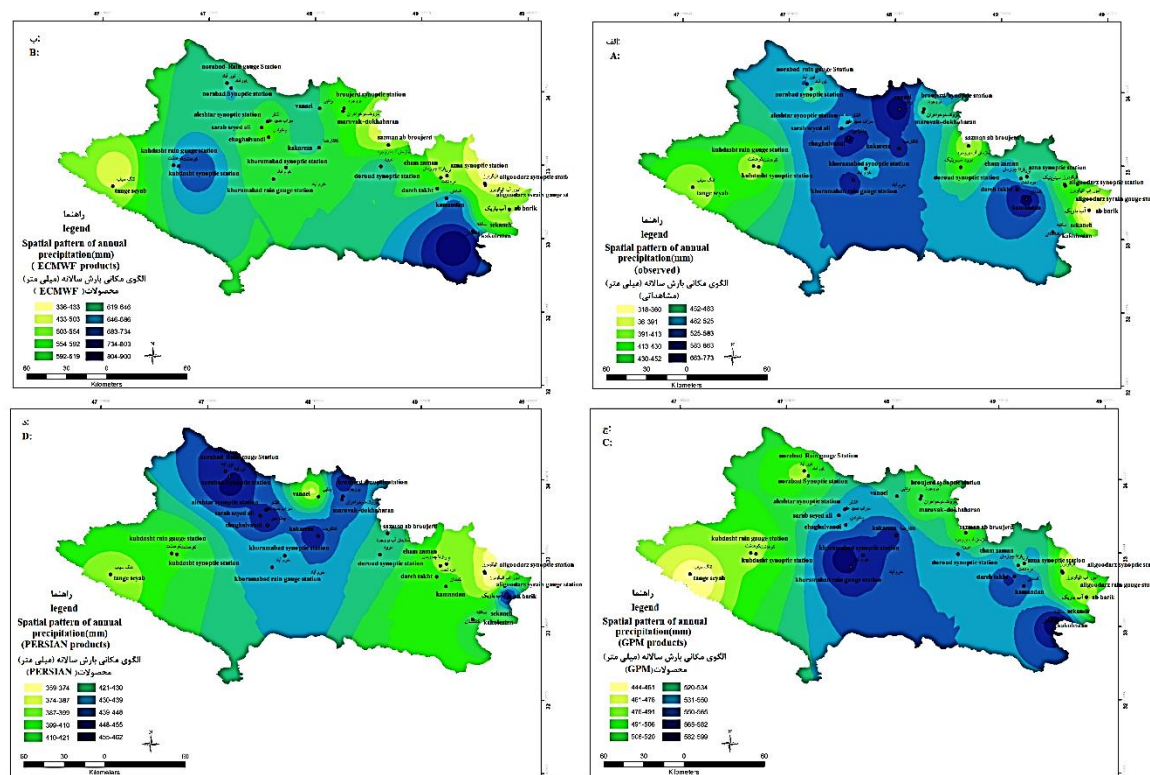
هستند. اگرچه محصولات ماهواره‌ای، میزان بارش را با وضوح مکانی و زمانی بالا و تأخیر کم ارائه می‌دهند اما اختلاف بین محصولات موجود دقت آن‌ها را برای مناطق کوهستانی زیر سؤال می‌برد، بنابراین نیاز به ارزیابی کامل دقت آن‌ها قبل از پیشنهاد برای کاربرد آن‌ها است. در این مطالعه از محصولات ماهواره‌ای (GPM و PERSIAN) و داده‌های بازکاوی (ECMWF) برای برآورد بارش در مناطق کوهستانی فاقد ایستگاه در استان لرستان استفاده شد. نتایج بررسی محصولات ماهواره‌ای (GPM, PERSIAN, ECMWF) نشان داد که هر سه محصول در برآورد بارش روزانه دارای دقت کافی نیستند. برآورد بارش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در مقیاس ماهانه نشان داد این محصولات نتایج مطلوبی برای تخمین بارش ارائه می‌دهند. همچنین در مقیاس سالانه با توجه به مقدار خطاهای آماری، نتایج مناسبی از برآورد بارش به‌دست آمد. این پژوهش در مقیاس روزانه با پژوهش (Miri et al., Dezfooli et al., 2016; Khanmohammadi et al., 2022; Emami et al., 2020; Paolo et al., 2022) و در مقیاس ماهانه و سالانه با مطالعات (Emami et al., 2020; Paolo et al., 2022) که به بررسی محصولات بارش ماهواره‌ای در مقیاس روزانه، ماهانه و سالانه پرداختند، مشابه است. از بین سه محصول، ماهواره GPM با توجه به میزان خطاها و همچنین الگوی مکانی بارش تخمین زده‌شده، از دقت بهتری برخوردار است. همچنین با توجه به نتایج شاخص MBE در مقیاس روزانه و ماهانه محصولات ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN و GPM کم برآورد در تخمین بارش هستند. در مقیاس سالانه محصولات GPM و ECMWF بیش برآورد و محصولات PERSIAN کم برآورد هستند.

الگوی مکانی بارش سالانه محصولات ماهواره‌ای

بر اساس بارش مشاهداتی ایستگاه‌های مورد مطالعه، بیشترین بارش محدوده در غرب و مرکز منطقه مورد مطالعه رخ می‌دهد و قسمت‌های شرقی منطقه کمترین مقدار بارش را دارند. در محصول ماهواره‌ای ECMWF با جابجایی هسته‌های بارش به سمت غرب و شرق منطقه، الگوی مکانی مقدار بارش تغییر کرده است که متفاوت از واقعیت اقلیمی منطقه است. در محصول ماهواره‌ای PERSIAN هسته‌های بارش با جابجایی به سمت مرکز و شمال، الگوی مکانی به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود ولی همچنان متفاوت از واقعیت اقلیمی منطقه است. در محصول ماهواره‌ای GPM الگوی مکانی مقدار بارش سالانه تقریباً شبیه به الگوی مکانی بارش مشاهداتی است و هسته‌های بارش در مرکز و غرب منطقه مشخص شده است؛ بنابراین با توجه به الگوی مکانی بارش سالانه، محصولات ماهواره‌ای GPM دارای دقت بهتری نسبت به سایر محصولات است (شکل ۷).

نتیجه‌گیری

بارش یک متغیر کلیدی اقلیمی است که پیش‌بینی آن در مدل‌های عددی آب‌وهوا بسیار دشوار است. بارش در مناطق کوهستانی به‌شدت در بعد زمانی-مکانی متفاوت است، بنابراین داشتن داده‌های دقیق برای ارزیابی منابع آب در این مناطق بسیار مهم است. با این حال، در بسیاری از مناطق کوهستانی، تعداد کمی از ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس هستند. امروزه ماهواره‌ها به‌عنوان جایگزین مناسب و جذابی برای اندازه‌گیری بارش در مناطق فاقد ایستگاه مطرح



9. Dezfooli, D., Hosseini-Moghari, S.M., & Ebrahimi, K. (2016). Comparison of TRMM-3B42 V7 and PERSIANN satellites precipitation data with ground-based data (Case study: Gorganrood Basin, Iran). *JWSS*, 20(76), 85-98. <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.20.76.85>
10. Dinku, T., Ceccato, P., & Connor, S.J. (2011). Challenges of satellite rainfall estimation over mountainous and arid parts of east Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 5965-5979. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.499381>
11. Emami, H., Salajegheh, A., Moghaddamnia, A., & Khalighi Sigaroudi, S. (2020). Evaluation of TRMM satellite accuracy and efficiency in estimating monthly rainfall in Gorganroud watershed. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 7(3), 719-729. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.261641.917>
12. Fatemi, Q.S., Yazdan Panah, H. (2013). evaluation of different interpolation methods in order to estimate the precipitation data of Isfahan province. *Geographical Space*, 12(40). (In Persian)
13. Gao, Y., Guan, J., Zhang, F., Wang, X., & Long, Z. (2022). Attention-unet-based near-real-time precipitation estimation from fengyun-4A satellite imageries. *Remote Sensing*, 14, 2925. <https://doi.org/10.3390/rs14122925>
14. Ghairi Sara, F., & Yazdan Panah, H. (2013). Evaluation of different interpolation methods in order to estimate the precipitation data of Isfahan province. *Geographical Space*, 12(40).
15. Han, P.D., Long, Z., Han, M., Du, L., Dai & Hao, X. (2019). Improved understanding of snowmelt runoff from the headwaters of China's Yangtze River using remotely sensed snow products and hydrological modeling. *Remote Sensing of Environment*, 224, 44-59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.041>
16. Hosseini, M., Seyed Mohammad, I., & Shahab, E. (2017). Introduction of global networked precipitation databases. *Water and Sustainable Development*, 5(2), 153-162. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.70826>
17. Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., & Gupta, H.V. (1997). Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. *Journal of Applied Meteorology*, 36, 1176-1190. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036%3C1176:PEFRSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036%3C1176:PEFRSI%3E2.0.CO;2)
18. <https://chrsdata.eng.uci.edu>
19. <https://gpm.nasa.gov/data>
20. <https://www.ecmwf.int>
21. Huffman, G., Stocker, E., Bolvin, D., Nelkin, E., & Tan, J.(2019). GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree × 0.1 degree V06. Available online: <https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B-HH/06>
22. Jiang, S.L., Ren, B., Yong, Y., Hong, X., Yang & Yuan, F. (2016). Evaluation of latest TMPA and CMORPH precipitation products with independent rain gauge observation networks over high-latitude and low-latitude basins in China. *Chinese Geographical Science*, 26(4), 439-455. <https://doi.org/10.1007/s11769-016-0818-x>
23. Khanmohammadi, Z., Mahjoobi, E., Gharachelou, S., & Banikhedmat, A. (2022). Statistical assessment of satellite rainfall products in daily and monthly gauge spatial scales. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 14(4), 512-527. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2022.355269.1908>
24. Kubota, T., Aonashi, K., Ushio, T., Shige, S., Takayabu, Y.N., Kachi, M., Arai, Y., Tashima, T., Masaki, T., & Kawamoto, N. (2020). Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) products in the GPM era. In *Satellite Precipitation Measurement*; Springer: Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24568-9_20
25. Lu, X., Li, J., Liu, Y., Li, Y., & Huo, H.(2023). Quantitative precipitation estimation in the Tianshan mountains based on machine learning. *Remote Sensing*, 15, 3962. <https://doi.org/10.3390/rs15163962>
26. Ma, Z., He, K., Tan, X., Xu, J., Miri, M., Rahimi, M., & Noroozi, A. (2019). Evaluation and comparison of GPM and TRMM daily precipitation with observed precipitation across Iran. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 972-983. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.121397.1469>
27. Ma, Z., Xu, J., He, K., Han, X., Ji, Q., Wang, T., Xiong, W., & Hong, Y. (2020). An updated moving window algorithm for hourly-scale satellite precipitation downscaling: A case study in the southeast coast of China. *Journal Of Hydrology*, 581, P.124378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124378>
28. NASA Global Precipitation Measurement (GPM).(2020). Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 06.
29. Ordoni, M., Memarian, H., Akbari, M., & Pourreza, M. (2019). Validation of GPM-IMERG satellite rainfall data in half-hourly and daily time scales (case study: Gorganrood watershed). *Journal of Water and Soil Protection Research*, 27(4), 149-166. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2020.17531.3301>
30. Panthi, J.P., Dahal, M.L., Shrestha, S., Aryal, N.Y., Krakauer, S.M., Pradhanang & Karki, R. (2015). Spatial and temporal variability of rainfall in the Gandaki River Basin of Nepal Himalaya. *Climate*, 3(1), 210-226. <https://doi.org/10.3390/cli3010210>
31. Paolo, F., Luca, B., Raphael, Q., Luca, C., Carla, S., Wolfgang, W., & Angelica, T. (2022). High resolution (1 km) satellite rainfall estimation from SM2RAIN applied to Sentinel-1: Po River Basin as case study. *Hydrology Earth System Science*, 26, 2481-2497. <https://doi.org/10.5194/hess-26-2481-2022>

32. Ruan, H., Zou, S., Yang, D., Wang, Y., Yin, Z., Lu, Z., & Xu, B. (2017). Runoff simulation by SWAT model using high-resolution gridded precipitation in the upper Heihe River Basin, northeastern Tibetan Plateau. *Water*, 9(11), 866. <https://doi.org/10.3390/w9110866>
33. Sharifi, E., Eitzinger, J., Dorigo, W. (2019). Performance of the state-of-the-art gridded precipitation products over mountainous Terrain: A regional study over Austria. *Remote Sens.*, 11, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs11172018>
34. Shokri, K., Akhund Ali, S., & Sharifi, M. (2019). Evaluating the performance of PERSIANN and PERSIANN-CDR satellite precipitation algorithms and investigating the impact of roughness on it (case study: Helleh watershed). *Eco-Hydrology*, 7(2), 511-530. (In Persian). <https://doi.org/10.22034/jdmal.2020.38472>
35. Tafta, A., Mallah, S., & Ebrahimi, N. (2019). Examining the results of daily, ten-day and monthly data of satellite images in estimating the amount of precipitation using the Google Earth Engine system in Khuzestan province. *Protection of water and soil resources (scientific-research)*, 9(3), 93-104. (In Persian)
36. Talchabhadel, R., Aryal, A., Kawaike, K., Yamanoi, K., Nakagawa, H., Bhatta, B., Karki, S., & Thapa, B.R. (2021). Evaluation of precipitation elasticity using precipitation data from ground and satellite-based estimates and watershed modeling in Western Nepal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 33, 100768. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100768>
37. Tan, X., Yong, B., & Ren, L. (2018). Error features of the hourly GSMap multi-satellite precipitation estimates over nine major basins of China. *Hydrology Research*, 49(3), 761-779. <https://doi.org/10.2166/nh.2017.263>
38. Taye, M., Sahlul, D., Zaitchik, B.F., & Neka, M. (2020). Evaluation of satellite rainfall estimates for meteorological drought analysis over the Upper Blue Nile Basin. *Ethiopia Geosci* 10(9), 352. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090352>
39. Vasavi, P., Krishna, V.S., Sri P.D., Navena, M., & HariKiran, C. (2022). Rainfall estimation from satellite images using cloud classifications, 2022 IEEE North Karnataka Subsection Flagship International Conference (NKCon), Vijaypur, India, , pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/NKCon56289.2022.10126540>
40. Wang, C., Xu, J., Tang, G., Yang, Y., & Hong, Y.(2020). Infrared precipitation estimation using convolutional neural network. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 8, 8612–8625. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2989183>
41. Wei, L., Jiang S., Ren, L., Zhang, L., Wang, M., & Duan, Z. (2020). Preliminary utility of the retrospective IMERG precipitation product for large-scale drought monitoring over Mainland China. *Remote Sens*, 12, 2993. <https://doi.org/10.3390/rs12182993>
42. Wilks, D.S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press.
43. Yousefi, K., Alireza, N., & Jamei, M. (2021). Combination of interpolation methods and TRMM satellite precipitation products in order to increase the accuracy of rainfall maps in Mazandaran province. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 28(3), 49-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2022.19286.3477>
44. Zeng, Q.H., Chen., C.Y., Xu. M.X., Jie, J., Chen, S.L., & Liu, J. (2018). The effect of rain gauge density and distribution on runoff simulation using a lumped hydrological modelling approach. *Journal of Hydrology*, 563, 106-122. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.058>

Investigating the Effect of Tillage and Fertilization on the Yield and Yield Components of Safflower (*Carthamus tinctorius*) under Rainfed Conditions

D. Parmah¹, H.R. Chaghazardi^{2*}, F. Mondany³, A. Beheshti Ale Agha⁴, D. Kahrizi⁵

1, 2, 3 and 5- M.Sc. of Ecology (Agroecology), Assistant Professor, Associate Professor and Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agricultural Sciences and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: h.chaghazardi@razi.ac.ir)

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

Received: 18-02-2024
Revised: 29-06-2024
Accepted: 29-06-2024
Available Online: 29-06-2024

How to cite this article:

Parmah, D., Chaghazardi, H.R., Mondany, F., Beheshti Ale Agha, A., & Kahrizi, D. (2024). Investigating the effect of tillage and fertilization on the yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius*) in rainfed conditions. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 445-461. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86923.1387>

Introduction

Optimum yield production under rainfed cultivation directly depends on the amount of rainfall and moisture storage in the soil. The tillage system directly influences soil moisture retention as well as the soil's physical and chemical properties. Selecting the appropriate tillage system can significantly impact crop yields. Oilseeds are particularly important among crops, representing the second-largest food reserve in the world after grains. These products are rich in fatty acids. Today, the oil extraction and production industry is one of the most strategic industries in most countries. Iran has vast arable land and favorable conditions for cultivating oilseeds. However, according to available statistics, over 80% of the country's oil needs are met through imports. Given the increasing demand for higher-quality oil products and the challenges posed by climate issues, such as recurring droughts, cultivating and developing crops with lower water requirements and greater resilience appears to be a promising solution. Implementing effective management practices and appropriate fertilizers aligned with conservation agriculture could help increase crop yields while maintaining and improving long-term soil quality. To explore the potential of oilseed cultivation, an experiment was conducted to examine the effects of tillage and fertilization on the yield and yield components of safflower under rainfed conditions.

Materials and Methods

This experiment was carried out as split plots based on random complete blocks design, with three replications under rainfed conditions. The treatments included tillage systems (conventional tillage, reduced tillage, and no-tillage) as the main factor and NPK fertilizer (a mixture of urea, triple superphosphate, and potassium sulfate) at four levels of zero, 33, 66, and 100% as a secondary factor. Potassium and phosphorus fertilization and 50% of nitrogen fertilizer were used at the same time as planting, and the remaining 50% of nitrogen fertilizer was used four months after planting. Each block had three main plots; the distance between each block was 3 meters, and between the main plots was 2 meters. In each main plot, four sub-plots were created, and the distance between the sub-plots was 1 meter. The area of the main plots was 21 × 15 meters, and the area of each sub-plot was 4.5 × 15 meters. The amount of seed used for safflower was 25 kg per hectare. The safflower seeds were sown in 5 rows and planted at a distance of 50 cm and a distance between plants of 10 cm. At all stages of planting, maintenance, and harvesting, agricultural management followed the traditional practices of the study area, as performed by the local farmers. The final sampling, or harvesting, was carried out manually at the physiological maturity stage. Before conducting



©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.2024.86923.1387>

variance analysis, a normality test was performed on the data. In this research, the LSD test was used to compare the mean at the 5% probability level, Excel software was used to draw graphs, and SAS 9.4 software was used to analyze the data.

Results and Discussion

The research showed that the traits examined, including leaf area index, dry matter content, thousand seed weight, seed yield, and biological yield, were affected by the tillage system, fertilizer, and their interaction effect. The highest safflower seed yield of 195.6 g/m² was obtained from the fertilizer ratio of 33% and conventional tillage, and the lowest seed yield of 116.2 g/m² was obtained from no-tillage and no fertilizer use. The results indicated that the conventional tillage system outperformed both reduced tillage and no-tillage systems. In reduced and no-tillage systems, the changes in the leaf area index of the safflower plant were similar, with the 100% fertilizer application under reduced tillage having a more pronounced effect compared to no-tillage. Additionally, in the absence of fertilizer in the no-tillage system, the leaf area index was lower. Fertilizer application increased the plant's biological yield, but its impact was greater under conventional tillage compared to reduced and no-tillage systems. Applying 33% of the required fertilizer in the conventional tillage system resulted in the highest biological yield for safflower, leading to a 94% increase in biological performance compared to the control.

Conclusion

In most of the examined traits, the application of 33 and 66% of the fertilizer requirement caused the best results, and the 100% fertilizer ratio left adverse effects, which indicates the lower fertilizer requirement of this cultivar in the studied conditions compared to cultivars in other regions. Since the research was conducted in rainy years, conventional tillage was better than low tillage. It is suggested that this plant's production amount be evaluated under different irrigation conditions and moisture limitations so that tillage systems and management methods can be examined and selected more carefully.

Keywords: Conservation agriculture, Conventional tillage, Crop management, No-tillage, Oilseeds

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۴۵-۴۶۱

بررسی تأثیر خاک‌ورزی و کوددهی بر اساس نیاز گیاه بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ (*Carthamus tinctorius*) در شرایط دیم

دنیا پرمه^۱ ID، حمیدرضا چقازردی^{۲*} ID، فرزاد مندنی^۳ ID، علی بهشتی آل آقا^۴ ID، دانیال کهریزی^۵ ID

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۹

چکیده

تولید عملکرد مطلوب در کشت دیم به‌طور مستقیم به میزان بارندگی و ذخیره رطوبت در خاک بستگی دارد. سیستم خاک‌ورزی به‌طور مستقیم بر محتوی ذخیره رطوبتی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد و انتخاب سیستم مناسب خاک‌ورزی در نهایت عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین منظور و با توجه به ارزش کشت گیاهان دانه روغنی، آزمایشی برای بررسی تأثیر خاک‌ورزی و کوددهی بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ در شرایط دیم انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به‌صورت دیم انجام گردید. تیمارها شامل سامانه‌های خاک‌ورزی (خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی کاهشی‌یافته و بی‌خاک‌ورزی) به‌عنوان عامل اصلی و کود NPK (مخلوطی از کودهای اوره، سوپر فسفات تریپل و سولفات پتاسیم)، در چهار سطح صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ درصد به‌عنوان عامل فرعی بودند. در تمام مراحل کاشت، داشت و برداشت تمام مدیریت‌های زراعی بر اساس مدیریت مرسوم منطقه مورد بررسی و به شیوه کشاورز صورت گرفت. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک نمونه‌برداری نهایی یا برداشت به‌صورت دستی انجام شد. نتایج پژوهش نشان داد صفات مورد بررسی شامل شاخص سطح برگ، میزان ماده خشک، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد زیستی تحت تأثیر سیستم خاک‌ورزی، کود و اثر متقابل آن‌ها قرار گرفتند. بالاترین عملکرد دانه گلرنگ به میزان ۱۹۵/۶ گرم در متر مربع از نسبت کودی ۳۳ درصد و خاک‌ورزی مرسوم و کمترین عملکرد دانه به میزان ۱۱۶/۲ گرم در متر مربع نیز از بی‌خاک‌ورزی و عدم مصرف کود حاصل شد. نتایج نشان داد که سیستم خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بی‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی نتیجه بهتری داشت. در بیشتر صفات مورد بررسی کاربرد نسبت ۳۳ و ۶۶ درصد نیاز کودی سبب بهترین نتیجه شده و نسبت کودی ۱۰۰ درصد تأثیرات منفی بر جای گذاشته است که این امر نشان دهنده نیاز کودی کمتر این رقم در شرایط مورد مطالعه نسبت به ارقام در مناطق دیگر می‌باشد. با توجه به این‌که پژوهش در سال‌های پرباران انجام شد، خاک‌ورزی مرسوم بهتر از کم خاک‌ورزی بوده است. پیشنهاد می‌شود میزان تولید این گیاه در شرایط آبیاری‌های مختلف و محدودیت رطوبتی ارزیابی شود تا سیستم‌های خاک‌ورزی و روش‌های مدیریتی با دقت بیشتری بررسی و انتخاب شوند.

واژه‌های کلیدی: بی‌خاک‌ورزی، خاک‌ورزی مرسوم، دانه روغنی، کشاورزی حفاظتی، مدیریت زراعی

مقدمه

در تولید محصولات زراعی تقریباً ۳۰ درصد از انرژی مصرف شده مربوط به خاک‌ورزی است (Tabatabaeefar Singh et al., 2008). خاک‌ورزی حفاظتی به‌دلیل حفظ رطوبت خاک، صرفه‌جویی در مصرف سوخت و نیروی کارگری و ایجاد پایداری در تولید محصول و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مورد توجه محققان و کشاورزان است، بر همین اساس کشاورزان با توجه به مسائل

۱، ۲، ۳ و ۵- به‌ترتیب کارشناسی ارشد اکولوژیک (اگرواکولوژی)، استادیار، دانشیار و استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده علوم و مهندسی کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.chaghazardi@razi.ac.ir)
۴- دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

اقتصادی و زیست‌محیطی، تمایل زیادی به استفاده از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی دارند (Busari et al., 2015).

سامانه‌های کشاورزی حفاظتی می‌تواند موجب ایجاد کارایی در نهاده‌های اولیه، افزایش درآمد از مزرعه، بهبود شرایط پایدار تولید محصول و موجب حفظ و بازسازی مجدد خاک و منابع زیرزمینی شود. خاک‌ورزی حفاظتی روشی برای نگه‌داری آب در زمین و همچنین کاهش هزینه‌های تولید و افزایش مواد آلی خاک است. شیوه‌های رایج آماده‌سازی خاک و روش‌های مدیریت علف‌های هرز، نه تنها موجب تخریب ساختمان طبیعی خاک شده، بلکه باعث کاهش مواد غذایی و رطوبت، تغییر فرآیند زیستی و فشردگی خاک می‌شود (Khan et al., 2017). هدف از خاک‌ورزی در سیستم‌های کشاورزی فراهم کردن شرایط فیزیکی مناسب برای جوانه‌زنی بذر و رشد گیاه است (Bayat et al., 2019; Ordoñez-Morales et al., 2019). عملیات خاک‌ورزی فشرده ممکن است به از بین رفتن ساختار خاک به دلیل از بین رفتن تدریجی خاکدانه‌های پایدار منجر شود و منجر به فرسایش و متراکم شدن خاک شود که باعث دسترسی کم رطوبت برای محصولات می‌شود (Nunes et Castellini & Ventrella, 2012; al., 2020).

نتایج پژوهشی نشان داد که بیشترین عملکرد دانه سویا در تیمارهای وجود بقایا با خاک‌ورزی، وجود بقایا بدون خاک‌ورزی و حذف بقایا با خاک‌ورزی است. بیشترین درصد روغن دانه سویا نیز در تیمارهای بدون خاک‌ورزی با مصرف ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، انجام خاک‌ورزی با مصرف ۱۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار، انجام خاک‌ورزی با مصرف ۵۰ کیلوگرم اوره در هکتار به دست آمد. نتایج آزمایش نشان داد که در کشت سویا واکنش عملکرد دانه به افزایش مصرف کود نیتروژن مثبت نبود و وجود بقایا تأثیر معنی‌داری مثبتی بر عملکرد دانه و شاخص برداشت داشت (Safahani et al., 2017). در بررسی اثر مقادیر کود نیتروژن (صفر، ۷۵، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در گیاه گلرنگ، تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در طول فصل رشد بالاترین شاخص سطح برگ را به خود اختصاص داد و با دو تیمار دیگر اختلاف معنی‌داری داشت. بیشترین مقدار این شاخص در زمان دریافت ۸۰۰ درجه روز رشد با میانگین ۳/۱ بود که تقریباً مصادف با اوایل گلدهی گیاه بود (Hasanvandi et al., 2013).

وزن هزار دانه آفتابگردان در سیستم بدون خاک‌ورزی نسبت به سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته و مرسوم کمتر بود، در حالی بین سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته و مرسوم از لحاظ آماری تفاوت معنی دار وجود نداشت (López-Garrido et al., 2014). کاهش اجزای عملکرد دانه در تیمار بدون خاک‌ورزی را احتمالاً می‌توان به کاهش عملکرد زیستی و در نتیجه کم بودن سطوح فتوسنتز کننده در زمان پر شدن دانه‌ها نسبت داد. همچنین به نظر می‌رسد که کاهش مراحل مختلف نمو گیاه در اثر کاهش دمای خاک می‌تواند

دلیلی برای کاهش وزن هزار دانه در سیستم بدون خاک‌ورزی باشد (Lv et al., 2024).

افزایش کاربرد نیتروژن، موجب افزایش شاخص سطح برگ و تعداد شاخه جانبی می‌شود که این امر با افزایش میزان تولید مواد فتوسنتزی و دوره گلدهی و در نتیجه افزایش تعداد خورجین در بوته، وزن هزار دانه و عملکرد دانه کلزا همراه می‌باشد (Ma & Herath, 2016). با افزایش مصرف کود نیتروژن شاخص برداشت کاهش پیدا می‌کند. استفاده بیش از حد از کود نیتروژن موجب افزایش عملکرد دانه شده ولی بیش از آن، رشد رویشی و شاخ و برگ گیاه را بیشتر نموده و در نتیجه باعث کاهش شاخص برداشت می‌شود (Yu & Li, 2019).

عوامل زیادی بر بهره‌وری تولید گیاه گلرنگ تأثیر می‌گذارند، اما مهم‌ترین آن‌ها کوددهی، رطوبت خاک (Omid & Sharifmogadas, 2010)، میزان بذر (Mojiri & Arzani, 2003) و سیستم خاک‌ورزی (Iboyi et al., 2021) است. در بررسی اثر مقادیر مختلف کود نیتروژن (صفر، ۷۵، ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) در گیاه گلرنگ، تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن در طول فصل رشد بالاترین شاخص سطح برگ را به خود اختصاص داد (Shahrokhnia & Sepaskhah, 2017). میراسکندری (Mirshekari, 2010) در تحقیقی تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ را بررسی نمودند. نتایج تحقیق نشان داد که از نظر درصد سبز شدن بین تیمارها اختلاف معنی‌دار وجود داشته، ولی از نظر اجزای عملکرد اختلاف معنی‌داری وجود نداشت.

در حال حاضر، در بین محصولات زراعی دانه‌های روغنی اهمیت خاصی دارند و پس از غلات دومین ذخایر غذایی جهان را تشکیل می‌دهند. این محصولات دارای ذخایر غنی از اسیدهای چرب هستند (Singh & Nimbkar, 2016). امروزه صنعت روغن‌کشی و تولید روغن در اغلب کشورهای جهان جز صنایع راهبردی محسوب می‌شود. در ایران نیز اراضی قابل کشت وسیع و زمینه‌های مساعدی برای کشت دانه‌های روغنی وجود دارد اما بر اساس آمارهای موجود بیش از ۸۰ درصد روغن مورد نیاز کشور از خارج تأمین می‌شود.

با توجه به اینکه کشور ما از یک سو نیازمند محصولات روغنی بیشتر و با کیفیت‌تر بوده و از سوی دیگر درگیر مسائل و مشکلات اقلیمی از جمله خشک‌سالی‌های متوالی (Madani et al., 2016) است به نظر می‌رسد کشت و توسعه گیاهان با نیاز آبی کمتر و مقاومت بالا و ارائه روش‌های مدیریتی و کودی مناسب در راستای کشاورزی حفاظتی راهکاری مناسب برای افزایش عملکرد محصولات و نیز حفظ و افزایش کیفیت خاک در طولانی‌مدت باشد. برای همین منظور این پژوهش با هدف بررسی تأثیر خاک‌ورزی و کوددهی بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ در شرایط دیم انجام شد.

مواد و روش‌ها

این آزمایش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی ۹۸-۱۳۹۷ اجرا شد، زمین در فصل زراعی قبلی آیش بود. پارامترهای هواشناسی در سال اجرای آزمایش در ایستگاه کرمانشاه در **جدول ۱** نشان داده شده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و به‌صورت دیم انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل سامانه‌های خاک‌ورزی (خاک‌ورزی مرسوم، خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بی‌خاک‌ورزی) به‌عنوان عامل اصلی، کود NPK در چهار سطح صفر، ۳۳، ۶۶ و ۱۰۰ درصد به‌عنوان عامل فرعی بودند. تیمار کودی مخلوطی از کودهای اوره، کود سولفات پتاسیم و کود سوپر فسفات تریپل به ترتیب با نسبت‌های ۴۶، ۴۶ و ۸ درصد بود. مقدار کودهای موجود در مخلوط کودی بر اساس نیاز گیاه گلرنگ تعیین شدند. تیمارهای کود مصرفی شامل صفر درصد (صفر کیلوگرم در هکتار)، ۳۳ درصد (۱۵۱/۸ کیلوگرم در هکتار)، ۶۶ درصد (۳۰۳/۶ کیلوگرم در هکتار) و ۱۰۰ درصد (۴۶۰ کیلوگرم در هکتار) بودند. کوددهی سولفات پتاسیم و سوپر فسفات تریپل و ۵۰ درصد کود اوره به‌صورت

پایه هم‌زمان با کاشت و ۵۰ درصد باقی‌مانده کود اوره به‌صورت سرک ۴ ماه بعد از کاشت استفاده شد.

هر بلوک دارای سه کرت اصلی بود و فاصله بین هر بلوک ۳ متر و فاصله بین کرت‌های اصلی ۲ متر در نظر گرفته شد. در هر کرت اصلی، چهار کرت فرعی ایجاد شد که فاصله بین کرت‌های فرعی ۱ متر بود. مساحت کرت‌های اصلی ۱۵ × ۲۱ متر و مساحت هر کرت فرعی ۴/۵ × ۱۵ متر بود. مقدار بذر مصرفی برای گلرنگ ۲۵ کیلوگرم در هکتار که از مرکز تحقیقات دیم سرآرود تهیه شده بود (مقدار کاشت بذر در نشریه فنی کشت گلرنگ دیم در مناطق سرد و معتدل سرد کشور بین ۲۰ تا ۲۵ کیلوگرم در هکتار ذکر شده است) (Jabari *et al.*, 2023). بذرهای گلرنگ در ۵ ردیف خط کاشت و با فاصله ۵۰ سانتی‌متر و فاصله بین بوته ۱۰ سانتی‌متر در ۱۳ آبان ماه کشت شدند. قبل از انجام کشت نمونه‌های مرکب به‌صورت تصادفی از خاک مزرعه تهیه شده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت با روش‌های علمی و تأیید شده (Estefan, 2013)، تعیین شدند (جدول ۲).

جدول ۱- پارامترهای هواشناسی در سال اجرای آزمایش در ایستگاه کرمانشاه

Table 1- The meteorological parameters in meteorological stations in Kermanshah Province

Table 1- The meteorological parameters in meteorological stations in Kermanshah Province					
ماه		میزان بارندگی	دمای حداقل	دمای متوسط	دمای حداکثر
Month		Rainfall amount (mm)	Minimum temperature (°C)	Average temperature (°C)	Maximum temperature (°C)
آبان	October	125.3	6.8	12.3	17.7
آذر	November	104	3.4	7.4	11.6
دی	December	41.5	-1.3	4.5	10.2
بهمن	January	96.3	-0.5	5.4	11
اسفند	February	79.1	0.1	6.5	12.2
فروردین	March	194.8	4.7	10.4	16.2
اردیبهشت	April	17.5	6.6	16.7	24.4
خرداد	May	0	13	26	34
تیر	June	0	16.6	29.9	38.7

جدول ۲- نتایج خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر

Table 2- The results of physical and chemical properties of soil at a depth of 0 to 30 cm

EC (dS/m)	pH	بافت خاک Soil texture	نیتروژن کل	کربن آلی	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب
			Total Nitrogen	Organic carbon	Available Phosphorus	Available Potassium
			(%)			
			(mg/kg)			
0.86	7.4	clay loam	0.097	0.97	12	480

قبل از تجزیه واریانس داده‌ها، آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس تیمارها با استفاده از آزمون لون به کمک نرم‌افزار SPSS 25، در سطح ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق برای مقایسه میانگین از آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار اکسل استفاده شد و همچنین برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار SAS 9.4 استفاده گردید.

نتایج و بحث

شاخص سطح برگ

نتایج تجزیه واریانس شاخص سطح برگ در مقدار بیشینه نیز مشخص نمود که در این زمان شاخص سطح برگ تحت تأثیر خاک‌ورزی (سطح احتمال ۱ درصد)، کود (سطح احتمال ۱ درصد) و اثرات متقابل آن‌ها (سطح احتمال ۵ درصد) قرار گرفت (جدول ۳). نتایج روند تغییرات سطح برگ گلرنگ در انواع مختلف خاک‌ورزی و نسبت‌های مختلف کودی در شکل ۱ قابل مشاهده است. تغییرات این روندها مشخص نمود که در خاک‌ورزی مرسوم، بالاترین شاخص سطح برگ گلرنگ مشاهده شد. در ماه‌های ابتدایی رشد، بین نسبت‌های مختلف کود و شخم‌ها تفاوت قابل توجه وجود نداشت، ولی با رسیدن شاخص سطح برگ به مقدار بیشینه در ۱۲۰۰ درجه - روز در گلرنگ بعد از کاشت، اختلاف‌ها قابل توجه شد. به‌طوری‌که در خاک‌ورزی مرسوم در نسبت‌های کودی ۳۳ و ۶۶ درصد شاخص سطح برگ گلرنگ به محدوده ۴ رسیده که بیشترین شاخص سطح برگ در این گیاه بوده و بعد از این زمان، شاخص سطح برگ در گیاه گلرنگ کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد در خاک‌ورزی کاهش یافته و بدون خاک‌ورزی روند تغییرات شاخص سطح برگ گیاه گلرنگ تفاوت زیادی نداشته و تنها در گلرنگ نسبت کودی ۱۰۰ درصد در خاک‌ورزی کاهش‌یافته تأثیر بیشتری نسبت به بی‌خاک‌ورزی داشت، همچنین در شرایط عدم مصرف کود در بی‌خاک‌ورزی شاخص سطح برگ کمتر بود. به‌طور کلی در خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بی‌خاک‌ورزی نسبت کودی ۶۶ درصد بالاترین شاخص سطح برگ را به خود اختصاص داد. به‌طوری‌که بالاترین شاخص سطح برگ گلرنگ در خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بی‌خاک‌ورزی به ترتیب در محدوده ۳/۵ و ۲/۷ بود (شکل ۱).

طبق نتایج مقایسه میانگین اثرات متقابل، همواره مصرف کود سبب بهبود شاخص سطح برگ شده و نوع خاک‌ورزی بر این تأثیرات نقش مثبتی داشت. مصرف ۶۶ درصد کود و خاک‌ورزی مرسوم بالاترین شاخص سطح برگ بیشینه را به خود اختصاص داد و در نسبت‌های ۳۳ درصد و ۱۰۰ درصد تأثیرات کاهش پیدا کرد (شکل ۲). همچنین کمترین شاخص سطح برگ بیشینه نیز از بی‌خاک‌ورزی

عمق کاشت دانه گلرنگ ۳ تا ۴ سانتی‌متر بوده برای اجرای طرح آزمایشی، ابتدا عملیات آماده‌سازی زمین و خاک‌ورزی انجام شد. برای این منظور از یک تراکتور MF399 جفت دیفرانسیل جهت انجام شخم مرسوم، بی‌خاک‌ورزی و سپس دیسک زنی مرسوم استفاده گردید. لازم به ذکر است. برای انجام عملیات خاک‌ورزی مرسوم از گاوآهن برگردان‌دار، برای کم خاک‌ورزی از چیزل پنجه‌غازی و برای بی‌خاک‌ورزی از روش کشت مستقیم با کارنده خطی کار استفاده شد. در مراحل کاشت، داشت و برداشت تمام مدیریت‌های زراعی بر اساس مدیریت مرسوم منطقه مورد بررسی و به شیوه کشاورز صورت گرفت. در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک نمونه‌برداری نهایی یا برداشت به‌صورت دستی انجام شد. جهت برداشت نمونه‌ها از کوادرات ۱ متر مربعی استفاده شد به این طریق که ۱۰ نمونه از خطوط میانی کرت‌ها توسط کوادرات ۱ متر مربعی به‌صورت تصادفی و با حذف اثر حاشیه-ای برداشت گردید. مرحله نمونه‌برداری تخریبی در اواسط اردیبهشت ماه انجام شد که هدف از این عملیات اندازه‌گیری شاخص سطح برگ (شاخص سطح برگ در ابتدای شروع گلدهی در یک مرحله توسط دستگاه Leaf area meter CI 202-CID USA اندازه‌گیری شد) و وزن خشک کل بود. برای این منظور فاصله نمونه‌برداری‌ها ۱۰ روز یک‌بار در نظر گرفته شد که در مجموع ۵ مرحله نمونه‌برداری صورت گرفت. به‌منظور نمونه‌برداری تخریبی از خطوط میانی کرت‌ها توسط کوادرات ۱ متر مربعی، برای گلرنگ ۳ نمونه انتخاب شد. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، اجزای نمونه‌ها مانند برگ، ساقه، برگ‌های زرد و ... از هم جدا شدند و وزن خشک و شاخص سطح برگ اندازه‌گیری شد. از نمونه‌های برداشت شده به روش تخریبی برای محاسبه وزن خشک استفاده شد. برای خشک‌کردن، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در آون و در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند. سپس وزن خشک هر نمونه به‌طور مجزا اندازه‌گیری شد. سپس صفات شاخص سطح برگ (Khadempir et al., 2014)، وزن هزار دانه، عملکرد دانه (معادله ۱) و عملکرد زیستی گیاه گلرنگ اندازه‌گیری شدند.

$$YG = m \times 10^4 \quad 1$$

YG عملکرد دانه برحسب
m وزن دانه برحسب کیلوگرم
کیلوگرم در هکتار

در طول فصل رشد شاخص‌های رشد بر اساس درجه روز رشد (GDD)^۱ مطابق معادله (۲) محاسبه شدند (Jones et al., 2003).

$$GDD = [(T_{min} + T_{max}) / 2] - T_b \quad 2$$

Tmax حداکثر دمای روزانه
Tmin حداقل دمای روزانه

Tb دمای پایه بوده که برای گیاه گلرنگ ۵ درجه سانتی‌گراد است (Streck et al., 2005).

و عدم مصرف کود حاصل شد که شاخص سطح برگ بیشینه ۲/۲ برآورد شد (شکل ۲).

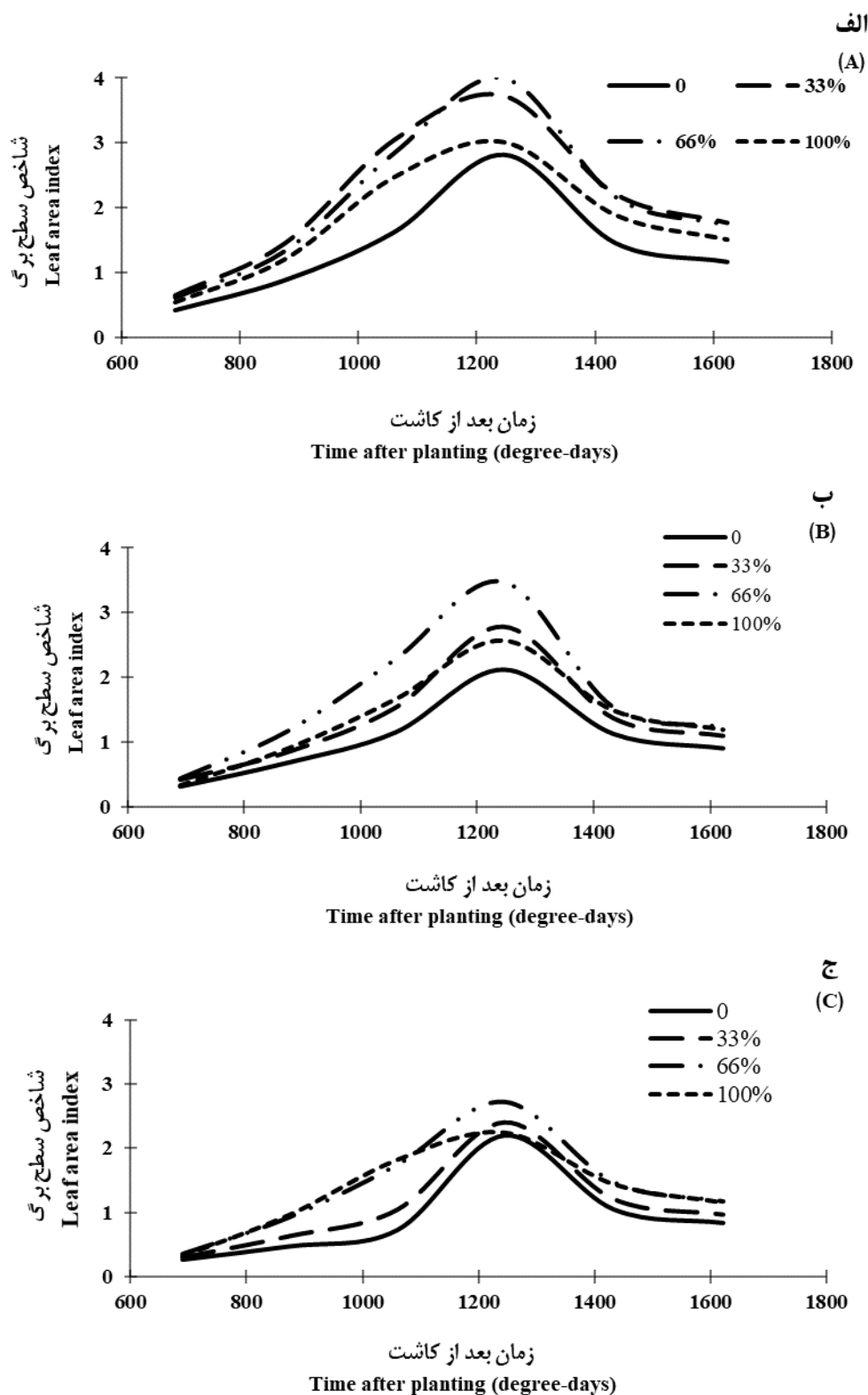
در پژوهشی گزارش شد که بالاترین شاخص سطح برگ در گیاه گلرنگ در تیمار ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن مشاهده شده و بیشترین مقدار این شاخص نیز در زمان دریافت ۸۰۰ درجه روز رشد بود که تقریباً مصادف با اوایل گلدهی گیاه می‌باشد (Hasanvandi et al., 2013) که با نتایج ما همخوانی نداشت و دلیل این تفاوت می‌تواند نوع رقم به کار رفته باشد. همچنین گزارش شد، افزایش شاخص سطح برگ لوبیا سبز در اثر مصرف سطوح مختلف نیتروژن در ابتدا تدریجی بوده و در ادامه با گسترش سطح برگ توسط گیاه، با سرعت زیادی افزایش یافت و در مرحله گلدهی به حداکثر خود رسید (Lack et al., 2015) که با نتایج ما در این مطالعه نیز مطابقت دارد. افشون و همکاران (Afshoon et al., 2021) نیز گزارش کردند کود نیتروژن (سطح ۱۰۰ درصد) تأثیر معنی‌داری بر شاخص سطح برگ گیاه ذرت علوفه‌ای داشته به‌طوری‌که بیشترین مقدار شاخص سطح برگ با کاربرد ۱۰۰ درصد نیاز کودی نیتروژن در خاک‌ورزی مرسوم حاصل شد. محققان بیان نمودند، با افزایش مصرف نیتروژن (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار) سطح برگ بیشتری به وجود آمده که خود با جذب تشعشع بیشتر نور خورشید، موجب افزایش میزان فرآیند فتوسنتز در گیاه لوبیا

شده و درنهایت ماده خشک بیشتری تولید شد (Gan et al., 2008; Mousavi et al., 2005). تأثیرات مثبت خاک‌ورزی می‌تواند به دلیل وضعیت رشدی بهتر جامعه گیاهی گندم در سیستم خاک‌ورزی مرسوم از طریق بهبود سیستم گسترش ریشه در اثر افزایش نفوذ در خاک و افزایش جذب آب و عناصر غذایی از خاک باشد. در اکثر گیاهان شاخص سطح برگ در مرحله گلدهی به بیشترین مقدار خود رسید که این افزایش با افزایش سایه‌انداز گیاهی و کاهش نفوذ نور به درون سایه‌انداز گیاهی همراه بود که سبب کاهش وزن خشک برگ‌های پایینی و از بین رفتن آن‌ها خواهد شد. با نزدیک شدن به پایان فصل رشد و بعد از مرحله گلدهی شاخص سطح برگ کاهش یافته که این امر در سطوح پایین‌تر نیتروژن شدیدتر می‌شود. بدیهی است که فرآیندهای فتوسنتزی گیاه که باعث ایجاد عملکرد می‌شوند عمدتاً در برگ صورت گرفته و هر عاملی که بر شاخص سطح برگ تأثیر می‌گذارد به میزان زیادی بر عملکرد نیز مؤثر خواهد بود. علت افزایش شاخص سطح برگ در نتیجه افزایش کود نیتروژن تأثیر این عنصر بر تقسیم و بزرگ شدن سلول‌ها عنوان شده است که موجب گسترش سطح برگ در گیاه و افزایش شاخص سطح برگ می‌شود (Malakouti & Homaei, 2004).

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر تیمارهای آزمایشی بر شاخص سطح برگ، ماده خشک، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و زیستی گلرنگ
Table 3- The results of variance analysis of the effect of treatments on leaf area index, dry matter, thousand seed weight, seed yield and biological yield of safflower

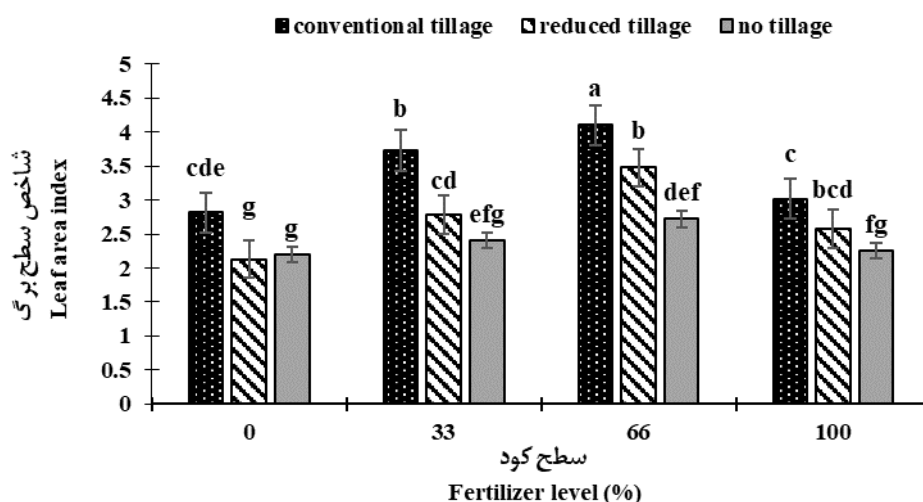
Sources of variance منابع تغییرات	df	میانگین مربعات Mean square				
		شاخص سطح برگ Leaf area index	ماده خشک Dry matter	وزن هزار دانه Thousand seed weight	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد زیستی Biological yield
بلوک Block	2	0.018 ns	3990.2 ns	16.32 ns	17446.53 ns	19791.18 ns
خاک‌ورزی Tillage	2	3.236 **	285413.4 **	254.33 *	833773.6 **	4349977.8 **
خطای اصلی Whole-plot error	4	0.034	2081.1	15.82	22784.9	318122.6
کود Fertilizer	3	1.886 **	92698.3 **	110.42 **	365973.9 **	16217824 **
خاک‌ورزی × کود Tillage × Fertilizer	6	0.153 *	22897.2 **	36.22 **	64150.2 **	3068633.9 **
خطای فرعی Split-plot error	18	0.04	5046.2	6.68	7864.5	247383.9
درصد ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)	-	7	20.7	6.4	5.8	10.2

** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.
**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively.



شکل ۱- روند تغییرات شاخص سطح برگ گلرنگ در خاک‌ورزی و نسبت‌های مختلف کود. الف) خاک‌ورزی مرسوم، ب) خاک‌ورزی کاهش‌یافته و ج) بی‌خاک‌ورزی

Figure 1- The trend of safflower leaf are index changes in tillage and different fertilizer ratios a) conventional tillage, b) reduced tillage and c) no tillage



شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل خاک‌ورزی و کود بر بیشینه شاخص سطح برگ گلرنگ

(حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد (LSD=۰/۱۹). همچنین نوارهای خطا، میزان تغییرپذیری داده‌ها و نزدیکی به میانگین را نشان می‌دهد).

Figure 2- The results of the interaction effects of tillage and fertilizer on the maximum leaf area of safflower
(Different letters in each column show a significant difference by the LSD test at the 5% probability level (LSD=0.19). Also, the error bars show the variability of the data and the closeness to the average).

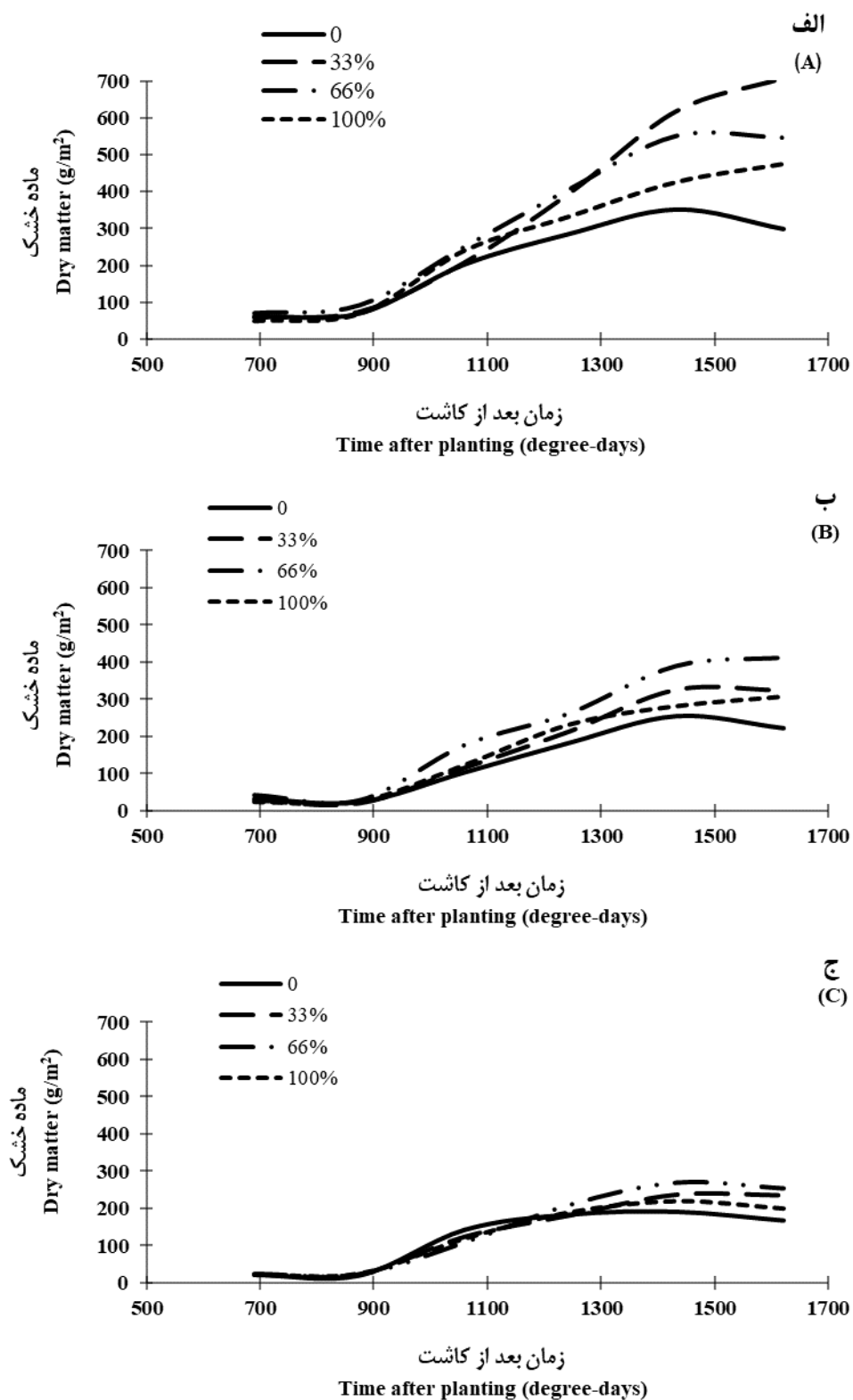
ماده خشک کل

نتایج مربوط به روند تغییرات وزن خشک تجمع یافته گلرنگ در شکل ۳ نشان داده شده است. روند تجمع ماده خشک در گلرنگ در شرایط خاک‌ورزی مرسوم، به صورت افزایشی بوده و در آخرین نمونه برداری که در محدود ۱۶۰۰ درجه - روز رشد در گلرنگ صورت گرفت، تغییرات ماده خشک کل در محدوده ۳۰۰ تا ۷۰۰ گرم در متر مربع بود. همچنین در سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته و بی خاک‌ورزی شیب تغییرات ماده خشک کاهش یافته به طوری که در سیستم بی خاک‌ورزی کاهش جزئی در ماده خشک نیز قابل مشاهده است. همچنین مشاهده شد که در زمان‌های اولیه رشد بین انواع سیستم های شخم و نسبت های مختلف کود تفاوت وجود نداشته و با رسیدن گیاه به انتهای فصل رشد تفاوت ها بیشتر و معنی دار گردید. تأثیرات کودهای مورد استفاده در خاک‌ورزی مرسوم قابل توجه بوده ولی در شرایط بی خاک‌ورزی و خاک‌ورزی کاهش یافته این تأثیرات کمتر و غیره معنی دار به نظر می‌رسد (شکل ۳).

نتایج تجزیه واریانس ماده خشک در آخرین نمونه برداری که با مرحله رسیدگی گیاهان همراه بود و ماده خشک به بالاترین مقدار خود می‌رسد نیز مشخص نمود که اثر خاک‌ورزی و کود و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود (جدول ۳). اثر متقابل خاک‌ورزی در کود در مورد ماده خشک مشخص کرد که در خاک‌ورزی مرسوم تأثیرات کود قابل توجه بوده به طوری که مصرف ۳۳ و ۶۶ درصد کود سبب افزایش ۱۶۰ و ۹۵ درصدی ماده خشک

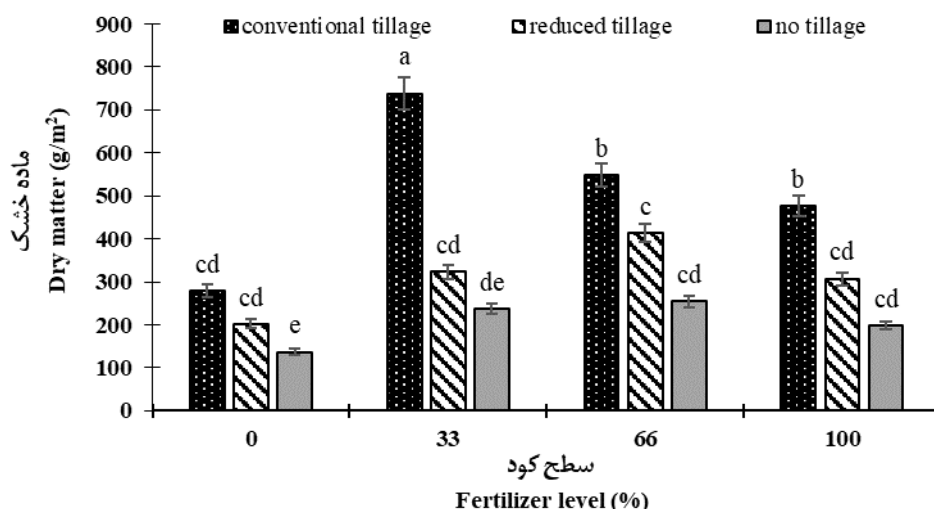
گلرنگ نسبت به شاهد شد، اما در خاک‌ورزی کاهش یافته و بی خاک‌ورزی نسبت به شاهد تفاوت‌ها کمتر بود (شکل ۴). طبق گزارش‌های صورت گرفته، روند افزایش ماده خشک در همه تیمارها به صورت منحنی سیگموئیدی است. در ابتدای رشد سرعت تجمع ماده خشک به ویژه در تیمارهای شاهد و کشاورزی مرسوم پایین بود با گذشت زمان شاخص برگ، فتوسنتز کانوبی و شیب تجمع ماده خشک افزایش پیدا کرد. پس از آن به دلیل سایه اندازی برگ‌های بالایی، افزایش میزان تنفس، زرد شدن، پیری و ریزش برگ‌های پایین کانوبی از سرعت تجمع ماده خشک کاسته شد (Yadavi, 2013). در مطالعه ما نیز این روند تغییرات مشاهده شد به طوری که در ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه روز رشد، ماده خشک گلرنگ تغییرات اندکی داشته تا به مقدار نهایی خود رسیدند (شکل ۳).

سپیده دم و رمرودی (Sepide dam & Ramroudi, 2016) نیز گزارش کردند، ماده خشک کل تحت تأثیر سیستم خاک‌ورزی و کود نیتروژن قرار گرفته و بیشترین ماده خشک از سیستم خاک‌ورزی متداول و افزایش سطوح نیتروژن تا ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در سامانه بی خاک‌ورزی به دست آمد، همچنین بین مصرف ۱۶۰ و ۲۲۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار علی‌رغم افزایش ماده خشک تفاوت معنی داری وجود نداشت. در مطالعه ما نیز بالاترین ماده خشک از خاک‌ورزی مرسوم و مصرف ۳۳ درصد نیاز کودی حاصل شده که نشان‌دهنده مصرف بیشتر از حد نیاز واقعی در این ارقام مورد بررسی و شرایط کشت بوده که سبب کاهش ماده خشک در نیازهای کودی ۶۶ و ۱۰۰ درصد بود (شکل ۴).



شکل ۳- روند تغییرات ماده خشک گلرنگ در خاک‌ورزی و نسبت‌های مختلف کود. الف) خاک‌ورزی مرسوم، ب) خاک‌ورزی کاهش‌یافته و ج) بی‌خاک‌ورزی

Figure 3- The trend of changes in safflower dry matter in tillage and different fertilizer ratios a) conventional tillage, b) reduced tillage and c) no tillage



شکل ۴- نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی و کود بر ماده خشک گلرنگ

(حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد (LSD=۶۱/۰۵). همچنین نوارهای خطا، میزان تغییرپذیری داده‌ها و نزدیکی به میانگین را نشان می‌دهد).

Figure 4- The results of the interaction effects of tillage and fertilizer on dry matter of safflower
(Different letters in each column show a significant difference by the LSD test at the 5% probability level (LSD= 61.05). Also, the error bars show the variability of the data and the closeness to the average).

وزن هزار دانه

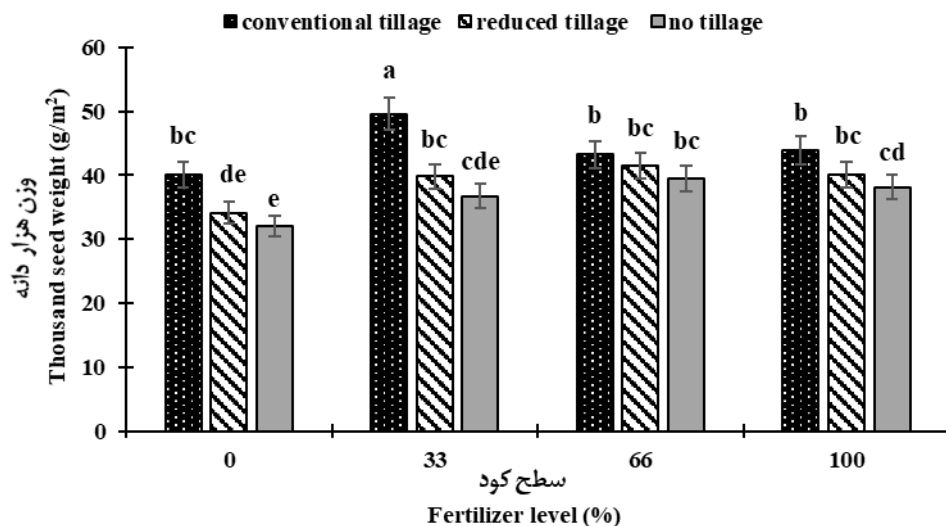
نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثرات اصلی خاک‌ورزی (سطح احتمال ۵ درصد) و کود (سطح احتمال ۱ درصد) و اثرات متقابل آن‌ها (سطح احتمال ۱ درصد) بر وزن هزار دانه معنی‌دار بود (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات متقابل خاک‌ورزی در کود مشخص نمود، مصرف کود سبب افزایش وزن هزار دانه گلرنگ شد. بالاترین وزن هزار دانه گلرنگ از خاک‌ورزی مرسوم و مصرف ۳۳ درصد کود مورد نیاز گیاه حاصل شد. این در حالی بود که در دو نوع دیگر خاک‌ورزی بین مقادیر مختلف کود تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و ۳۳ تا ۱۰۰ درصد کود در یک کلاس آماری قرار گرفتند. بیشترین وزن هزار دانه (۴۹/۶ گرم) از خاک‌ورزی مرسوم و مصرف ۶۶ و ۳۳ درصد کود حاصل شد که در مقایسه با عدم مصرف کود در این شرایط ۲۴ درصد افزایش نشان دادند (شکل ۵).

سیستم خاک‌ورزی و کود نیتروژن بر تعداد دانه در سنبله گیاه جو اثرگذار بوده و بیشترین تعداد دانه در سنبله مربوط به سیستم خاک‌ورزی مرسوم و کم‌ترین آن مربوط به سیستم بدون خاک‌ورزی بود. همچنین با افزایش مصرف ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن، تعداد دانه در سنبله افزایش پیدا کرد (Matecka & Blecharczyk, 2008) که با نتایج این مطالعه نیز مطابقت دارد. صبر و همکاران (Sabbar et al., 2010) در مطالعه تأثیر سیستم‌های خاک‌ورزی و کود نیتروژن بر عملکرد سورگوم علوفه‌ای بیان کردند که تأثیر سامانه‌های

عبدالله (Abdullah, 2014) نیز در بررسی خاک‌ورزی مرسوم و کم خاک‌ورزی و مدیریت بقایای گندم برای کشت کلزا مشاهده کردند که وجود بقایا منجر به افزایش ماده آلی خاک شد. همچنین کم خاک‌ورزی با وجود بقایا موجب افزایش ۲۴ درصدی در عملکرد زیستی نسبت به روش مرسوم بدون وجود بقایا شد. افشون و همکاران (Afshoon et al., 2021) نیز گزارش کردند بیشترین میزان وزن خشک کل بوته، در مرحله گلدهی از تیمار خاک‌ورزی مرسوم و کاربرد ۱۰۰ درصد نیاز کودی نیتروژن گیاه ذرت حاصل شد. از آنجایی که وزن خشک کل بوته برای پایداری از فتوسنتز برگ‌ها و همچنین رشد بافت‌های ساقه و برگ می‌شود. لذا کاهش شاخص سطح برگ منجر به کاهش وزن خشک کل بوته گیاه تحت شرایط عدم کاربرد کود نیتروژن در سامانه خاک‌ورزی حفاظتی شده است. علت افزایش ماده خشک در شرایط کم‌خاک‌ورزی را می‌توان به دلیل بیشتر بودن رطوبت موجود در خاک در روش کم خاک‌ورزی دانست؛ زیرا عملیات خاک‌ورزی، با تغییر در روش آماده‌سازی و شرایط خاک، بر رطوبت خاک و عملکرد محصول اثر مستقیم می‌گذارد (Bekele, 2020) از طرفی با توجه به این که مطالعه ما در سال‌های پرباران صورت گرفته است خاک‌ورزی مرسوم بهتر از کم خاک‌ورزی بوده است. در خاک‌ورزی مرسوم سیستم نفوذ ریشه تقویت‌شده و از این طریق گیاه قادر است آب و مواد غذایی را بهتر جذب نماید و متعاقب آن رشد بهتری داشته باشد.

کاهش اجزای عملکرد دانه در تیمار بدون خاک‌ورزی را احتمالاً می‌توان به کاهش عملکرد زیستی و در نتیجه کم بودن سطوح فتوسنتز کننده در زمان پر شدن دانه‌ها نسبت داد. همچنین به نظر می‌رسد که کاهش مراحل مختلف نمو گیاه در اثر کاهش دمای خاک می‌تواند دلیلی برای کاهش وزن هزار دانه در سیستم بدون خاک‌ورزی باشد (Sepide dam & Ramroudi, 2016).

خاک‌ورزی بر خصوصیات زراعی و کیفی سورگوم علوفه‌ای در هر دو سال آزمایش معنی‌دار نشد، اما میانگین عملکرد علوفه سبز سورگوم در خاک‌ورزی مرسوم کمی بیش‌تر از خاک‌ورزی کاهش‌یافته بود. همچنین وزن هزار دانه آفتابگردان و ذرت در سیستم بدون خاک‌ورزی نسبت به سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته و مرسوم کمتر بود، در حالی بین سیستم خاک‌ورزی کاهش یافته و مرسوم از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار وجود نداشت (Omidmehr & Faezniya, 2019)؛



شکل ۵- نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی و کود بر وزن هزار دانه گلرنگ

(حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد (LSD=۳/۳۷). همچنین نوارهای خطا، میزان تغییرپذیری داده‌ها و نزدیکی به میانگین را نشان می‌دهد).

Figure 5- The results of the interaction effects of tillage and fertilizer on thousand seed weight of safflower
(Different letters in each column show a significant difference by the LSD test at the 5% probability level (LSD= 3.37). Also, the error bars show the variability of the data and the closeness to the average).

درصدی نسبت به تیمار شاهد (بی‌خاک‌ورزی و عدم مصرف کود) داشت (شکل ۶).

افزایش عملکرد دانه گندم بهاره در سیستم خاک‌ورزی مرسوم نسبت به سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی گزارش شده است (Wozniak et al., 2015). برخلاف نتایج مشاهده شده در این مطالعه، بی‌تأثیر بودن خاک‌ورزی (Jabro et al., 2010) بر عملکرد گلرنگ و کاهش عملکرد (Baumhardt et al., 2005) نیز گزارش شده است. تأثیر شخم بر رشد ریشه، میزان آب در دسترس و اندازه خاک‌دانه‌های لایه متراکم خاک و مصرف کودهای شیمیایی قطعاً تأثیرگذار است. ناکافی بودن ویژگی‌های فیزیکی مؤثر بر انتقال آب در خاک، هوادهی نامناسب برای سیستم ریشه و افزایش علف‌های هرز می‌تواند از علل کاهش عملکرد دانه در سیستم‌های خاک‌ورزی حفاظتی عنوان شود (Sepide dam & Ramroudi, 2016). گیاهان در سیستم خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی برای جبران

عملکرد دانه

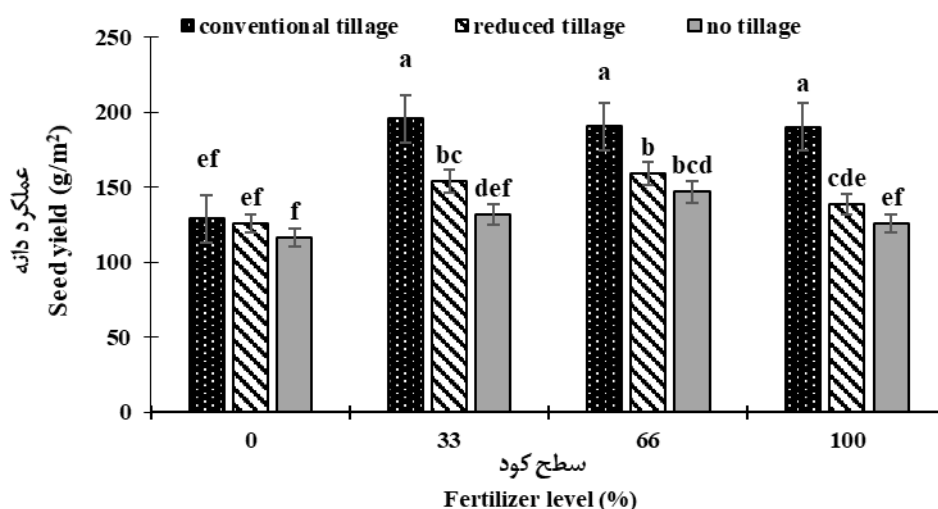
در این مطالعه عملکرد دانه گیاه گلرنگ تحت تأثیر اثرات اصلی خاک‌ورزی و کود و اثرات متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد قرار گرفت (جدول ۳). نتایج اثرات متقابل نشان داد، در شرایط خاک‌ورزی مرسوم، در گلرنگ مصرف ۳۳ درصد از نیاز کودی گیاه بیشترین عملکرد دانه را تولید کرد که با سطوح ۶۶ و ۱۰۰ درصد تفاوت معنی‌دار نداشت، اما در شرایط بی‌خاک‌ورزی و یا خاک‌ورزی کاهش‌یافته، بالاترین عملکرد دانه از نسبت ۶۶ و ۳۳ درصد نیاز کودی حاصل شد و در نسبت ۱۰۰ درصد نیز نسبت به شاهد (بدون خاک‌ورزی و کوددهی) تغییرات غیر معنی‌دار بود (شکل ۶). به‌طور کلی بالاترین عملکرد دانه گلرنگ ۱۹۵/۶ گرم در متر مربع) از نسبت کودی ۳۳ درصد و خاک‌ورزی مرسوم و کمترین عملکرد دانه ۱۱۶/۲ گرم در متر مربع نیز از بی‌خاک‌ورزی و عدم مصرف کود حاصل شد و عملکرد دانه در نسبت کودی ۳۳ درصد و خاک‌ورزی مرسوم افزایش ۶۸/۳۳

عملکرد زیستی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که خاک‌ورزی، کود و اثر متقابل خاک‌ورزی در کود بر میزان عملکرد زیستی گلرنگ در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار است (جدول ۳). مقایسه میانگین اثرات متقابل نشان داد، مصرف کود سبب افزایش میزان عملکرد زیستی گیاه شد، اما تأثیر این مصرف در خاک‌ورزی مرسوم بالاتر از خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی بود. مصرف ۳۳ درصد از میزان کود مورد نیاز گیاه در شرایط خاک‌ورزی مرسوم بالاترین میزان عملکرد زیستی در گیاه گلرنگ را سبب شد. به‌طوری‌که میزان عملکرد زیستی گلرنگ ۹۴ درصد نسبت به شاهد افزایش داشت. همچنین مشاهده شد که با مصرف مقادیر بیشتر کود در خاک‌ورزی مرسوم تأثیر کود منفی شده ولی این تأثیر در خاک‌ورزی کاهش‌یافته و بدون خاک‌ورزی غیر معنی‌دار بود (شکل ۷). همچنین نتایج نشان داد که کمترین میزان عملکرد زیستی در گلرنگ (۲۵۲/۹ گرم در متر مربع) از عدم مصرف کود و بی‌خاک‌ورزی و مصرف ۱۰۰ درصد کود و بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد که این نشان‌دهنده عدم تأثیر مصرف کود در شرایط بی‌خاک‌ورزی می‌باشد (شکل ۷).

عملکرد به مقدار بیشتری از کودهای شیمیایی نیتروژن نیاز دارند، علت این امر کاهش راندمان استخراج نیتروژن، کاهش رشد اولیه گیاهچه، تأخیر در استقرار و برخورد با گرمای آخر فصل، افزایش تراکم علف‌های هرز و تغییر خصوصیات فیزیکی خاک است (Mohammadi et al., 2009). از دلایل تأثیرات منفی خاک‌ورزی به اکسید شدن سریع مواد آلی خاک و خرد شدن خاکدانه‌ها و همچنین افزایش فشردگی خاک و وزن مخصوص ظاهری خاک که سبب کاهش تعداد منافذ درشت می‌گردد اشاره نمود (Bekele, Sharma et al., 2016; 2020).

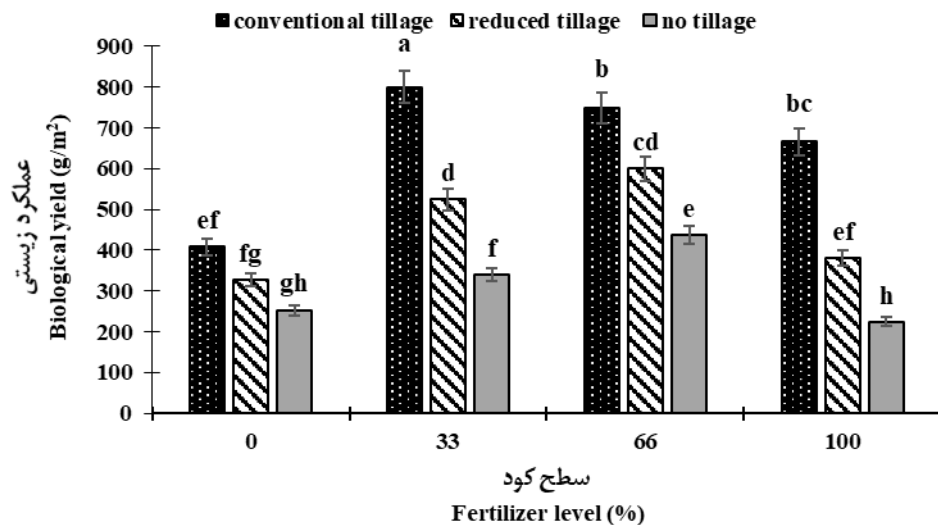
مشخص شده است که کود فسفر می‌تواند عملکرد دانه را افزایش دهد (Xie et al., 2014)، در حقیقت تجمع و توزیع ماده خشک با افزایش فسفر افزایش می‌یابد (Fageria et al., 2013). مصرف کود فسفر باعث افزایش فتوسنتز در برگ کتان شده و با افزایش انتقال ماده خشک به دانه، عملکرد دانه را افزایش می‌دهد. همچنین مصرف فسفر با افزایش تعداد کپسول در بوته و دانه در کپسول عملکرد دانه کتان را بهبود می‌بخشد (Xie et al., 2016). برخی از مطالعات همچنین اثر عرضه فسفر را بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ و آفتابگردان گزارش کرده‌اند (Abbadi & Gerendás, 2011).



شکل ۶- نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی و کود بر عملکرد دانه گلرنگ

(حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد (LSD=۲/۷۳). همچنین نوارهای خطا، میزان تغییرپذیری داده‌ها و نزدیکی به میانگین را نشان می‌دهد).

Figure 6- The results of the interaction effects of tillage and fertilizer on seed yield of safflower
(Different letters in each column show a significant difference by the LSD test at the 5% probability level (LSD= 2.73). Also, the error bars show the variability of the data and the closeness to the average).



شکل ۷- نتایج اثرات متقابل خاک‌ورزی و کود بر عملکرد زیستی گلرنگ

(حروف متفاوت در هر ستون نشان‌دهنده اختلاف معنی‌دار توسط آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد می‌باشد (LSD=۵/۶۶). همچنین نوارهای خطا، میزان تغییرپذیری داده‌ها و نزدیکی به میانگین را نشان می‌دهد).

Figure 7- The results of the interaction effects of tillage and fertilizer on biological yield of safflower
(Different letters in each column show a significant difference by the LSD test at the 5% probability level (LSD= 5.66). Also, the error bars show the variability of the data and the closeness to the average).

(2011) نیز افزایش عملکرد دانه خردل را با اعمال سطوح گوگرد گزارش کرده‌اند. کلزا (*Brassica rapa* L.) یک محصول روغنی مهم است که تقاضای بالایی برای گوگرد دارد (Fismes et al., 2000). به دلیل نیاز به گوگرد بالا، ۳۰ و ۶۰ کیلوگرم در هکتار کود گوگرد برای حداکثر عملکرد کلزا توصیه شده است. همچنین نتایج تحقیق دیگری نشان داد که گوگرد نقش مهمی در تشکیل دانه‌های کنجد دارد و همچنین مسئول عملکرد مناسب سیستم گیاهی و افزایش کلی پارامترهای رشد و عملکرد کنجد است (Shen et al., 2021). گوگرد به سنتز سیستئین، متیونین، کلروفیل، ویتامین‌ها (B، بیوتین و تیامین)، متابولیسم کربوهیدرات، روغن و پروتئین کمک می‌کند و موجب افزایش عملکرد و وزن دانه در گیاهان روغنی می‌شود (Najar et al., 2011).

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که سیستم خاک‌ورزی مرسوم نسبت به کم خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی نتیجه بهتری داشت یکی از علت‌های احتمالی، انجام آزمایش در بازه زمانی یکساله بوده و احتمالاً در صورتی که آزمایش حداقل به مدت ۵ سال انجام شود نتایج تغییر خواهد کرد. در بیشتر صفات مورد بررسی کاربرد نسبت ۳۳ و ۶۶ درصد نیاز کودی سبب بهترین نتیجه شده و نسبت کودی ۱۰۰ درصد تأثیرات منفی بر جای گذاشته است که این امر نشان‌دهنده نیاز کودی کمتر این رقم در شرایط مورد مطالعه نسبت به ارقام در مناطق دیگر

نتایج مطالعات صورت گرفته نیز نشان داد، عملکرد زیستی تحت تأثیر سیستم خاک‌ورزی و کود نیتروژن قرار گرفته به‌طوری‌که بیش‌ترین عملکرد زیستی از سیستم خاک‌ورزی مرسوم و کم‌ترین آن در سیستم بدون خاک‌ورزی به دست آمد. در گندم نیز عملکرد زیستی در سیستم خاک‌ورزی مرسوم (گاوا آهن + پنجه غازی) نسبت به سه سیستم خاک‌ورزی کاهش‌یافته (گاوا آهن قلمی + خطی کار، گاوا آهن بدون صفحه برگردان + خطی کار و پنجه غازی + خطی کار) و سیستم بدون خاک‌ورزی طی سه سال متوالی بالاتر بود (Loveimi et al., 2011). همچنین گزارش شد افزایش سطوح نیتروژن از صفر به ۲۲۰ کیلوگرم در هکتار باعث افزایش عملکرد زیستی شد. عملکرد زیستی نشان‌دهنده توانایی سایه‌انداز گیاهی در استفاده از عوامل محیطی مانند نور و مواد غذایی برای تولید ماده خشک می‌باشد، بنابراین به نظر می‌رسد، افزایش مصرف نیتروژن می‌تواند باعث افزایش عملکرد زیستی شود (Sepide dam & Ramroudi, 2016). در بررسی اثر منابع کودی بر عملکرد و اجزای عملکرد گلرنگ گزارش شد که مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره با میانگین ۸۱۰۹/۵۹ کیلوگرم در هکتار و تیمار عدم مصرف کود با میانگین ۵۴۵۲/۸۳ کیلوگرم در هکتار به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار عملکرد زیستی را به خود اختصاص دادند (Mohsen Nia & Jalilian, 2012). وارنیووا و همکاران (Varényiová et al., 2017) گزارش داد که بیشترین عملکرد کلزا به میزان ۳/۹۶ تن در هکتار با اعمال ۴۰ کیلوگرم گوگرد در هکتار حاصل شد. همچنین کومار و تریودی (Kumar et al.,

محدودیت رطوبتی ارزیابی شود تا سیستم‌های خاک‌ورزی و روش‌های مدیریتی با دقت بیشتری بررسی و انتخاب شوند. همچنین توجه به هزینه شخم، سوخت، آلودگی زیست محیطی و غیره نیز باعث انتخاب دقیق‌تر روش مدیریتی در کشاورزی پایدار خواهد شد.

می‌باشد. بالاترین عملکرد دانه گلرنگ (۱۹۵۶ کیلوگرم در هکتار) از خاک‌ورزی مرسوم و نسبت کودی ۳۳ و ۶۶ درصد مشاهده شد. با توجه به این‌که این مطالعه در شرایط بارندگی زیاد صورت گرفته است پیشنهاد می‌شود میزان تولید این گیاه در شرایط آبیاری‌های مختلف و

References

1. Abdullah, A.S. (2014). Minimum tillage and residue management increase soil water content, soil organic matter and canola seed yield and seed oil content in the semiarid areas of Northern Iraq. *Soil and Tillage Research*, 144, 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.017>
2. Afshoon, E., Jahansooz, M.R., Moghadam, H., & Oveisi, M. (2021). Effect of tillage, nitrogen fertilizer, and water stress on crop growth indices and yield of forage corn (*Zea mays* L.). *Journal of Crops Improvement*, 23(2), 235-246. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2020.295787.2337>
3. Baumhardt, R., Jones, O., Busscher, W., & Frederick, J. (2005). Long-term benefits of deep tillage on soil physical properties and crop yield. Proceedings of the 27th Southern Conservation Tillage Systems Conference,
4. Bayat, M., Pakina, E., Astarkhanova, T., Sediqi, A.N., Zargar, M., & Vvedenskiy, V. (2019). Review on agrotechnology for ameliorating strawberry cultivation. *Research on Crops*, 20(4), 731-736. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2019.108>
5. Bekele, D. (2020). The effect of tillage on soil moisture conservation: A review. *International Journal of Research Studies in Computing*, 6(10), 30-41. <https://doi.org/10.20431/2454-6224.0610004>
6. Busari, M.A., Kukal, S.S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A.A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(2), 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002>
7. Castellini, M., & Ventrella, D. (2012). Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 124, 47-56. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.04.008>
8. Estefan, G. (2013). *Methods of soil, plant, and water analysis: a manual for the West Asia and North Africa region*. International Center for Agricultural Research in the Dry Areas.
9. Fageria, N.K., Moraes, O.P., & Vasconcelos, M.J. (2013). Upland rice genotypes evaluation for phosphorus use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 36(12), 1868-1880. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.818153>
10. Fismes, J., Vong, P.C., Guckert, A., & Frossard, E.T.H.I.O.P.I.A.N. (2000). Influence of sulfur on apparent N-use efficiency, yield and quality of oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown on a calcareous soil. *European Journal of Agronomy*, 12(2), 127-141. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(99\)00052-0](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(99)00052-0)
11. Gan, Y., Malhi, S., Brandt, S., Katepa-Mupondwa, F., & Stevenson, C. (2008). Nitrogen use efficiency and nitrogen uptake of juncea canola under diverse environments. *Agronomy Journal*, 100(2), 285-295. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0229>
12. Hasanvandi, M.S., Rafiee, M., & Bagheri, A. (2013). Safflower growth analysis using regression modeling. *Journal of Crops Improvement*, 15(3), 27-37. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jci.2013.36384>
13. Iboyi, J.E., Mulvaney, M.J., Balkcom, K.S., Seepaul, R., Bashyal, M., Perondi, D., Leon, R.G., Devkota, P., Small, I.M., & George, S. (2021). Tillage system and seeding rate effects on the performance of *Brassica carinata*. *GCB Bioenergy*, 13(4), 600-617. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12809>
14. Jabari, H., familiarity, S.P., Asadi, M.I., Noorgholipour, F., Tafete, A., Islamic, B.P., Shahsawari, M., Walipour, M.B., Moghadam, M.J., Safari, M., Nesab, H.S., Nazari, M.R., Pourdad, S.S., Kihanian, A.A., Garmarodi, H.S., Akbari, M., & Karminejad, M.R. (2023). *Irrigation and Rainfed Safflower Cultivation*. 63637 Issue. (In Persian)
15. Jabro, J., Stevens, W., Iversen, W., & Evans, R. (2010). Tillage depth effects on soil physical properties, sugarbeet yield, and sugarbeet quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41(7), 908-916. <https://doi.org/10.1080/00103621003594677>
16. Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., & Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3-4), 235-265. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00107-7)
17. Khadempir, M., Zeinali, E., Soltani, A., & Toorani, M. (2014). Investigation leaf area index, dry matter accumulation and allocation in two cultivars of faba bean (*Vicia faba* L.) affected by the distance between rows and planting date. *Applied Research of Plant Ecophysiology Journal*, 1(3), 15-36. (In Persian). <http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-115-en.html>

18. Khan, S., Shah, A., Nawaz, M., & Khan, M. (2017). Impact of different tillage practices on soil physical properties, nitrate leaching and yield attributes of maize (*Zea mays* L.). *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(1), 240-252. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000019>
19. Kumar, R., & Trivedi, S.K. (2011). Effect of levels and sources of sulphur on yield, quality and nutrient uptake by mustard (*Brassica juncea*). *Progressive Agriculture*, 11(1), 58-61.
20. Lack, S., Kermanshahi, M., & Noryani, H. (2015). Variation trend of leaf area index, yield and yield components of green beans (*Phaseolous vulgaris* L.) by using zinc sulfate and nitrogen. *Journal of Crop Ecophysiology*, 9(36), 599-610. (In Persian)
21. López-Garrido, R., Madejón, E., León-Camacho, M., Girón, I., Moreno, F., & Murillo, J. (2014). Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study. *Soil and Tillage Research*, 140, 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.008>
22. Loveimi, N., Safari, M., & Heidarpour, N. (2011). Comparison of the effects of no tillage, minimum tillage and conventional tillage on dry land wheat yield in pebbly field in tropical region. *Journal of Agricultural Machinery*, 1(2), 110-121. (In Persian). <https://dori.net/dor/20.1001.1.22286829.1390.1.2.7.2>
23. Lv, Y.J., Zhang, X.L., Gong, L., Huang, S.B., Sun, B.L., Zheng, J.Y., Wang, Y.J., & Wang, L.C. (2024). Long-term reduced and no tillage increase maize (*Zea mays* L.) grain yield and yield stability in Northeast China. *European Journal of Agronomy*, 158, 127-217. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127217>
24. Ma, B., & Herath, A. (2016). Timing and rates of nitrogen fertiliser application on seed yield, quality and nitrogen-use efficiency of canola. *Crop and Pasture Science*, 67(2), 167-180. <https://doi.org/10.1071/CP15069>
25. Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian Studies*, 49(6), 997-1016. (In Persian)
26. Malakouti, M., & Homaei, M. (2004). *Fertile soils of arid and semi-arid problems and solutions*. Tarbiat Modares of University Press. (In Persian)
27. Małacka, I., & Blecharczyk, A. (2008). Effect of tillage systems, mulches and nitrogen fertilization on spring barley (*Hordeum vulgare*). *Agronomy Research*, 6(2), 517-529.
28. Mirshekari, B. (2010). Effect of different tillage methods on energy indexes and yield components of safflower. *Agroecology Journal*, 6(3), 77-84. (In Persian)
29. Mohammadi, K., Nabi, E.K., Agha, A.M., & Khormali, F. (2009). Study on the effect of different tillage methods on the soil physical properties, yield and yield components of rainfed wheat. *Journal of Plant Production Research*, 16(4), 77-92. (In Persian). <https://dori.net/dor/20.1001.1.23222050.1388.16.4.5.6>
30. Mohsen Nia, O., & Jalilian, J. (2012). Effects of drought stress and fertilizer sources on yield and yield components of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Agroecology Journal* 4(3), 235-245. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jag.v4i3.15312>
31. Mojiri, A., & Arzani, A. (2003). Effect of nitrogen rate and plant density on yield and yield components of sunflower. *Isfahan University of Technology-Journal of Crop Production and Processing*, 7(2), 115-125. (In Persian). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-468-en.html>
32. Mousavi, S., Fathi, G., & Dadgar, M. (2005). Planting date and density on growth, yield components and yield of red beans. Proceedings of First Pulse National Conference.
33. Najar, G.R., Singh, S.R., Akhtar, F., & Hakeem, S.A. (2011). Influence of sulphur level on yield, uptake and quality of soybean (*Glycine max*) under temperate conditions of Kashmir valley. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81(4), 340.
34. Nunes, M.R., Karlen, D.L., & Moorman, T.B. (2020). Tillage intensity effects on soil structure indicators-A US meta-analysis. *Sustainability*, 12(5), 2071. <https://doi.org/10.3390/su12052071>
35. Omid, A., & Sharifmogadas, M. (2010). Evaluation of Iranian safflower cultivars reaction to different sowing dates and plant densities. *World Applied Science Journal*, 8(8), 953-958.
36. Omidmehr, Z., & Faezniya, F. (2019). Effects of different tillage techniques on some soil properties and sunflower yield in dryland conditions of Shahrood (Miami). *Iranian Dryland Agronomy Journal*, 7(2), 143-158. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/idaj.2018.121791.218>
37. Ordoñez-Morales, K.D., Cadena-Zapata, M., Zermeno-González, A., & Campos-Magaña, S. (2019). Effect of tillage systems on physical properties of a clay loam soil under oats. *Agriculture*, 9(3), 62. <https://doi.org/10.3390/agriculture9030062>
38. Roozbeh, M., & Pooskani, M. (2003). The effect of different tillage methods on wheat yield when in rotation with corn. *Iranian Journal of Agricultural Sciences*, 34(1), 29-38. (In Persian)
39. Sabbr, Z., Peirdashti, H., Esmaili, M., & Abassian, A. (2010). *Evaluation of growth promoting bacteria, nitrogen, and phosphorus on fertilizer efficiency and yield of wheat* The 11th Iranian Crop Sciences Congress, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. (In Persian)

40. Safahani, A., Petroodi, M.A., Cherati, A., & Irani, A. (2017). Effect of management of plant debris of wheat, tillage and consumption of nitrogen fertilizer on growth, Function and grain yield components of soybean in summer planting. *Journal of Plant Production Sciences*, 7(1), 51-65. (In Persian)
41. Sepide dam, S., & Ramroudi, M. (2016). Effects of tillage systems and nitrogen fertilizer on yield, yield components and seed protein of wheat. *Applied Research of Plant Ecophysiology Journal*, 2(2), 33-46. (In Persian). <https://doi.org/http://arpe.gonbad.ac.ir/article-1-162-fa.html>
42. Shahrokhnia, M.H., & Sepaskhah, A.R. (2017). Physiologic and agronomic traits in safflower under various irrigation strategies, planting methods and nitrogen fertilization. *Industrial Crops and Products*, 95, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.021>
43. Sharma, P., Abrol, V., Sharma, K., Sharma, N., Phogat, V., & Vikas, V. (2016). Impact of conservation tillage on soil organic carbon and physical properties—a review. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 7(1), 151-161. <https://doi.org/10.23910/IJBBSM/2016.7.1.1387>
44. Shen, Y., Hu, L.T., Xia, B., Ni, Z.J., Elam, E., Thakur, K., & Wei, Z.J. (2021). Effects of different sulfur-containing substances on the structural and flavor properties of defatted sesame seed meal derived Maillard reaction products. *Food Chemistry*, 365, 130463. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130463>
45. Singh, K., Prakash, V., Srinivas, K., & Srivastva, A. (2008). Effect of tillage management on energy-use efficiency and economics of soybean (*Glycine max*) based cropping systems under the rainfed conditions in North-West Himalayan Region. *Soil and Tillage Research*, 100(1-2), 78-82. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.04.011>
46. Singh, V., & Nimbkar, N. (2016). Safflower. In *Breeding Oilseed Crops for Sustainable Production* (pp. 149-167). Elsevier.
47. Streck, N.A., Bellé, R.A., Rocha, E.K.D., & Schuh, M. (2005). Estimating leaf appearance rate and phyllochron in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Ciência Rural*, 35, 1448-1450.
48. Tabatabaefar, A., Emamzadeh, H., Varnamkhasti, M.G., Rahimizadeh, R., & Karimi, M. (2009). Comparison of energy of tillage systems in wheat production. *Energy*, 34(1), 41-45. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.023>
49. Varényiová, M., Ducsay, L., & Ryant, P. (2017). Sulphur nutrition and its effect on yield and oil content of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 65(2). <https://doi.org/10.11118/actaun201765020555>
50. Wozniak, A., Wesolowski, M., & Soroka, M. (2015). Effect of long-term reduced tillage on grain yield, grain quality and weed infestation of spring wheat. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17(4), 899-908. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2015.17.4.3.0>
51. Xie, Y., Niu, J., Gan, Y., Gao, Y., & Li, A. (2014). Optimizing phosphorus fertilization promotes dry matter accumulation and P remobilization in oilseed flax. *Crop Science*, 54(4), 1729-1736. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.10.0672>
52. Xie, Y., Niu, X., & Niu, J. (2016). Effect of phosphorus fertilizer on growth, phosphorus uptake, seed yield, yield components, and phosphorus use efficiency of oilseed flax. *Agronomy Journal*, 108(3), 1257-1266. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0537>
53. Yadavi, A. (2013). Effect of nitrogen fertilizer, vermicompost and nitroxin on growth indices, phenological stages and grain yield of sesame. *Journal of Crop Production*, 6(2), 73-100. (In Persian). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008739.1392.6.2.5.3>
54. Yu, X., & Li, B. (2019). Release mechanism of a novel slow-release nitrogen fertilizer. *Particuology*, 45, 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2018.09.005>

The Effect of Clay Minerals and Exchangeable Cations on Organic Nitrogen Mineralization

F. Rakhsh^{1*}, A. Golchin², A. Beheshti Ale Agha³

1 and 2- Ph.D. and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: rakhsh.fatemeh@alumni.znu.ac.ir)

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

Received: 07-03-2024
Revised: 19-06-2024
Accepted: 06-07-2024
Available Online: 06-07-2024

How to cite this article:

Rakhsh, F., Golchin, A., & Beheshti Ale Agha, A. (2024). The effect of clay minerals and exchangeable cations on organic nitrogen mineralization. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 463-477. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87185.1396>

Introduction

Soil texture is one of the most influential characteristics that affects the decomposition and retention of soil organic matter, as it directly or indirectly impacts the soil's physical, chemical, and biological properties. Soil clays play an important role in soil organic matter stability. Organic matter adsorbed on phyllosilicate clays is more resistant to microbial decomposition than organic matter that has not interacted with any mineral. Exchangeable cations through the influence of physical and chemical characteristics of the soil probably cause changes in the absorption and retention of organic matter. In previous studies, the effect of soil texture on organic matter retention has been investigated, but the impact of clay type and exchange cation has not been investigated. This study aimed to examine the effect of different contents of vermiculite and zeolite clays and exchange cations on the mineralization of organic nitrogen.

Materials and Methods

A factorial experiment was conducted in a completely randomized design with three replications to study the effect of the type and content of clay and the type of exchange cations on organic nitrogen dynamics. Experimental treatments include two types of clay (vermiculite and zeolite), four different levels of clay (0, 15, 30, and 45%), and three types of exchangeable cations (Na^+ , Ca^{2+} , and Al^{3+}). The experiment included 24 treatments and three replications. There were total of 72 experimental units. Artificial soil of 50 grams was prepared separately according to the amount and type of clay and the type of exchange cation. "Next, alfalfa plant residues were added to all samples at a rate of 5% w/w. After inoculating and air-drying the samples, the moisture content was adjusted to 60% of the field capacity (FC) using distilled water. To prevent excess water from affecting the final moisture readings, the samples were first air-dried, and then sufficient distilled water was added to each sample to achieve 60% of FC. The samples were then kept in the dark for 60 days at a temperature of 23 °C. Distilled water was added and sealed to the bottom of the incubation jars to keep the moisture content of the soil samples constant during incubation. The percentage of mineralized nitrogen, microbial biomass nitrogen, and the activity of acid and alkaline phosphatase and cellulase enzymes were determined in the prepared samples. The data were analyzed using ANOVA, and the means were compared using Duncan's Multiple Range Test (DMRT). Before applying ANOVA, the data's normality and variance homogeneity were checked using Kolmogorov- Smirnov and Levene tests, respectively. The SPSS



©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.2024.87185.1396>

software (Windows version 25.0, SPSS Inc., Chicago, USA) and SAS software (version 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC) were employed for data analysis.

Results and Discussion

The results of variance analysis of the data showed that the effect of the type and content of clay and the type of exchangeable cation on the percentage of mineralized nitrogen, microbial biomass nitrogen, and the activity of acid and alkaline phosphatase and cellulase enzymes were significant ($p < 0.01$). The results revealed that, regardless of the duration of the samples, with the increase in the amount of clay, the percentage of inorganic nitrogen and the activity of enzymes decreased, but the nitrogen of microbial biomass increased. The highest percentage of inorganic nitrogen was obtained 60 days after incubation of the samples and in clays saturated with calcium, and the lowest amount of these attributes was obtained 15 days after incubation of the samples and in clays saturated with aluminum. The results showed that nitrogen mineralization increased with the samples' incubation time. Also, the highest percentage of mineralized nitrogen, microbial biomass nitrogen, and enzyme activity were observed in soils with vermiculite.

Conclusion

The increase in the incubation duration enhanced the percentage of inorganic nitrogen. The percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen was higher in soils with vermiculite than in soils with zeolite. Moreover, regardless of the incubation duration of samples, with increasing clay content, the percentage of mineralized nitrogen and enzyme activity decreased, but with increasing clay nitrogen content, microbial biomass increased. The highest and lowest amounts of mineralized nitrogen and nitrogen of microbial biomass were measured in soils with calcium and aluminum, respectively. The results showed the effect of the clay type and content and the exchangeable cation type on organic nitrogen dynamics.

Keywords: Aluminum, Organic matter, Sodium, Vermiculite, Zeolite

تأثیر کانی‌های رسی و کاتیون‌های تبادلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی

فاطمه رخس^{۱*} - احمد گلچین^۲ - علی بهشتی آل آقا^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

چکیده

بافت خاک یکی از تأثیرگذارترین ویژگی‌های خاک‌ها بر تجزیه و نگهداشت ماده آلی در خاک است. رس‌ها با افزایش نگهداشت ماده آلی خاک موجب کاهش سرعت تجزیه آن می‌شوند. هدف از این مطالعه بررسی تأثیر نوع مختلف رس و کاتیون‌های تبادلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی بود. آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. فاکتورها شامل: نوع رس (ورمی‌کولیت و زئولیت)، سطوح مختلف رس (صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد وزنی) و نوع کاتیون تبادلی (Na^+ ، Ca^{2+} و Al^{3+}) بودند. نمونه‌های خاک با توجه به مقدار و نوع رس و نوع کاتیون تبادلی، به‌صورت جداگانه تهیه و به نمونه‌ها بقایای یونجه اضافه گردید. پس از افزودن مایه تلقیح و هوا خشک کردن نمونه‌ها، مجدداً رطوبت نمونه‌ها با استفاده از آب مقطر به ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه رسید و به مدت ۶۰ روز و در دمای ۲۳ درجه سلسیوس در تاریکی نگهداری شدند. نتایج نشان‌دهنده تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی بود. نتایج نشان داد که با افزایش مقدار هر دو نوع رس، درصد نیتروژن معدنی و فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی و سلولاز کاهش یافته ولی نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. بیشترین درصد نیتروژن معدنی در رس‌های اشباع شده با کاتیون کلسیم، پس از ۶۰ روز و کمترین مقدار درصد نیتروژن معدنی، در رس‌های اشباع شده با کاتیون آلومینیوم پس از ۱۵ روز خوابیدن به‌دست آمدند. بیشترین درصد نیتروژن معدنی شده، نیتروژن زیست‌توده میکروبی و فعالیت آنزیم‌ها در نمونه‌های دارای ورمی‌کولیت اندازه‌گیری گردید.

واژه‌های کلیدی: آلومینیوم، زئولیت، سدیم، ماده آلی، ورمی‌کولیت

مقدمه

برهمکنش این عوامل، می‌باشند (Lal, 2020). طبق یافته‌های داویدسون و جانسنز (Davidson & Janssens, 2006) حفاظت فیزیکی خاک از ماده آلی که از طریق محبوس شدن ذرات ریز ماده آلی در خاکدانه‌ها و یا برهمکنش هوموس با مواد معدنی و رس‌ها انجام می‌شود، تنش خشکی، غرقاب شدن و یخ زدن از جمله عوامل دیگری هستند که بر میزان تجزیه ماده آلی خاک مؤثر می‌باشند. تحقیقات نشان می‌دهد که برهمکنش بین ترکیبات نیتروژنی با سطح کانی‌ها نقش مهمی در نگهداشت نیتروژن آلی ایفا می‌کند. ترشحات پروتئینی و پپتیدی گیاهان و ریزجانداران از طریق پیوندهای آب‌گریز به سطح کانی‌ها متصل می‌گردند (Nikolaidis & Bidoglio, 2013). محققان اثبات کردند که مقدار رس خاک بر سرعت معدنی شدن نیتروژن مؤثر است و سرعت معدنی شدن نیتروژن در خاک‌هایی با بافت درشت بیشتر از خاک‌هایی با بافت ریز است (Soinnie et al., 2021). خاک‌های ریز بافت مقدار رس بیشتری دارند و به دلیل وجود تخلخل ریز فراوان در این خاک‌ها، ماده

میزان ماده آلی خاک‌ها از کمتر از ۱ درصد در خاک مناطق خشک تا بیشتر از ۴۰ درصد در خاک‌های پیت متغیر است. میزان ماده آلی ذخیره شده در خاک حاصل تعادل بین دو فرآیند مهم زیستی است که باعث تولید ماده آلی از یک طرف و تجزیه آن از طرف دیگر می‌شود. این دو فرآیند دارای کنترل‌کننده‌های فیزیکی و زیستی قوی بوده که مهم‌ترین آن‌ها شرایط اقلیمی، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک، ترکیب شیمیایی و نوع بقایای گیاهی، غیرقابل دسترس بودن ماده آلی برای موجودات خاک، مدیریت زراعی و

۱ و ۲- به ترتیب دکتری و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: rakhsh.fateme@alumni.znu.ac.ir)

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

تفسیر شده است و مطالعه درباره تأثیر کاتیون‌های تبدلی مختلف بر معدنی شدن نیتروژن آلی و فعالیت آنزیمی وجود ندارد. در نتیجه این مطالعه با هدف بررسی تأثیر سطوح مختلف کانی‌های ورمی‌کولیت و زئولیت و نوع کاتیون‌های تبدلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی و فعالیت آنزیمی انجام شد.

مواد و روش‌ها

برای بررسی تأثیر سطوح مختلف کانی‌های ورمی‌کولیت و زئولیت و نوع کاتیون‌های تبدلی بر معدنی شدن نیتروژن آلی و فعالیت آنزیمی، یک آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار با تیمارهای، نوع رس (ورمی‌کولیت و زئولیت)، سطوح مختلف رس (صفر، ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد وزنی) و نوع کاتیون تبدلی (Na^+ ، Ca^{2+} و Al^{3+}) انجام شد. آزمایش شامل ۲۴ تیمار در ۳ تکرار بود. ورمی‌کولیت (CAS 1318-00-9) و زئولیت (CAS 1318-02-1) (کلینوپتیلولیت) مورد استفاده در آزمایش از شرکت سیگمای آمریکا تهیه شدند. ظرفیت تبادل کاتیونی رس‌ها (Mikutta *et al.*, 2006)، سطح ویژه (Mikutta *et al.*, 2006)، چگالی بار سطح (Chorom & Rengasamy, 1995) و نیز pH و EC رس‌ها در نسبت ۱:۵ با آب مقطر (Rayment & Lyons, 2011) اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). برای جداسازی جز رس کوچک‌تر از ۲ میکرومتر از روش ته‌نشینی استفاده شده (Jackson, 2005) و رس‌ها با استفاده از دستگاه Freeze Dryer کاملاً خشک شدند. رس‌های خشک شده در ظرف‌های پلی‌اتیلنی و در دمای محیط تا اعمال تیمارها نگهداری شدند.

ذرات رس کوچک‌تر از ۲ میکرومتر برای تهیه رس‌هایی با کاتیون تبدلی یکسان به کار برده شدند و با سه کاتیون سدیم، کلسیم و آلومینیوم از طریق مصرف محلول‌های ۱ مولار کلرید سدیم، کلرید کلسیم و کلرید آلومینیوم سه بار اشباع شدند و با استفاده از لوله دیالیز کلر موجود بر سطح ذرات رس شسته و حذف شدند (Rakhsh *et al.*, 2017). عدم وجود کلر در آب مقطری که لوله دیالیز در آن قرار داشت، با استفاده از نیترات نقره ۱ مولار تست شد (Yoder, 1919). برای انجام آزمایش خوابانیدن از خاک مصنوعی استفاده گردید (Rakhsh & Golchin, 2018). برای حذف املاح محلول و ذرات رس از شن، ابتدا شن به‌طور کامل با آب شسته و سپس از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد و ذرات باقی‌مانده بر روی الک ۰/۰۵ میلی‌متر برای شستشو با اسید کلریدریک استفاده گردید (Ulery & Drees, 2008). شن مجدداً با آب مقطر شسته شده و سپس در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس در آون خشک شد (Rayment & Lyons, 2011).

نمونه خاک‌های ۵۰ گرمی با توجه به مقدار و نوع رس و نوع

آلی از تجزیه میکروبی حفظ می‌شود (Najmadeen, 2011). سرعت معدنی شدن نیتروژن آلی در خاک‌های ریز بافت کمتر از خاک‌های درشت بافت است که به‌دلیل توانایی خاک رس برای محافظت از ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی است (Castellano *et al.*, 2012). نتایج مطالعات همرشید و همکاران (Hamarashid *et al.*, 2010) نشان داد مقدار نیتروژن کل و آلی در خاک‌هایی با بافت ریز (لومی رسی، لومی و رسی لومی) بیشتر از خاک‌هایی با بافت درشت (شنی لومی و شنی) بود. ترکیبات نیتروژن‌دار می‌توانند بر سطح رس‌ها جذب شوند و رس‌ها انتقال این مولکول‌ها به آب خاک را به تأخیر انداخته (Guggenberger & Kaiser, 2003) و با جذب و غیرفعال کردن آنزیم‌های برون سلولی که توسط موجودات تجزیه‌کننده و برای شکستن مولکول‌های آلی ترشح می‌شود، سبب کاهش سرعت تجزیه میکروبی این ترکیبات شوند (Knicker, 2011).

نتایج تحقیقات وی و همکاران (Ve *et al.*, 2004) نشان می‌دهد، درجه هوموسی شدن همبستگی مثبتی با کاتیون‌های چند ظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم دارد درحالی‌که با پتاسیم تبدلی همبستگی منفی داشت، در حقیقت کاتیون‌های تبدلی بر دینامیک ماده آلی خاک تأثیرگذار هستند (Ve *et al.*, 2004). اضافه کردن کاتیون‌های فلزی به خاک حلالیت و معدنی شدن ماده آلی را کاهش داد (Aquino *et al.*, 2011; Galicia-Andrés *et al.*, 2021; Kunhi Mouvenchery *et al.*, 2013). تشکیل کمپلکس آلومینیوم - ماده آلی احتمالاً مکانیسمی برای پایداری ماده آلی در برابر تجزیه میکروبی ایجاد می‌کند (Basile-Doelsch *et al.*, 2005). چوپسیگ و همکاران (Schwesig *et al.*, 2003) گزارش کردند که افزایش اولیه نسبت آلومینیوم به کربن بیشتر از ۰/۱ منجر به کاهش بیش از ۵۰ درصدی در معدنی شدن ماده آلی در مقایسه با نمونه‌های شاهد شد. کاتیون‌های چند ظرفیتی هیدراته مانند Fe^{3+} و Al^{3+} ، فلوکوله شدن رس‌های دارای بار منفی را افزایش می‌دهند (Pronk *et al.*, 2012; Schwesig *et al.*, 2003).

طی سال‌های اخیر، خاک‌های مصنوعی به‌عنوان ابزاری بسیار مفید برای بررسی عملکرد خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Ding *et al.*, 2013; Guenet *et al.*, 2011; Pronk *et al.*, 2012). الیس (Ellis, 2004) با استفاده از خاک‌های مصنوعی ساخته شده از کانی‌های رسی، شن، اسیدهای هیومیک و کربنات کلسیم به مطالعه ریزجانداران در محیط مشابه با خاک‌های طبیعی پرداخت. در این پژوهش نیز برای بررسی تأثیر نوع و مقدار رس‌های سیلیکاته و همچنین نوع کاتیون تبدلی بر سرعت تجزیه بقایای گیاهی و نگهداشت نیتروژن آلی، از خاک‌های مصنوعی یا مخلوط‌های شن و رس استفاده شد.

مطالعات قبلی در زمینه فعالیت آنزیم‌ها و تثبیت ماده آلی در خاک‌های طبیعی می‌باشد که اساساً بر اساس تفاوت در بافت خاک

نمونه‌ها به مدت ۶۰ روز و در دمای ۲۳ درجه سلسیوس در تاریکی خوابانیده شدند و غلظت نیتروژن آمونیومی (Alef & Nannipieri, 1995) و غلظت نیتروژن نیتراتی (Alef & Nannipieri, 1995) هر ۱۵ روز یکبار از شروع خوابانیدن (۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز)، اندازه‌گیری شدند. پس از تعیین غلظت نیتروژن آمونیومی و نیتراتی در روزهای ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ روز پس از خوابانیدن، درصد نیتروژن معدنی شده از تقسیم کردن مجموع نیتروژن آمونیومی و نیتراتی هر مرحله بر مقدار نیتروژن آلی موجود در ابتدای آن مرحله تعیین گردید. نیتروژن زیست‌توده میکروبی پس از گذشت ۶۰ روز از شروع خوابانیدن نمونه‌ها، به روش تدخین و استخراج و با روش کلدال اندازه‌گیری گردید (Brookes et al., 1985). فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی (ACP) و قلیایی (AKP) (Tabatabai, 1994) و فعالیت آنزیم سلولاز در خاک (Schinner & Von Mersi, 1990) تعیین شدند.

کاتیون تبادلی، به صورت مجزا تهیه شدند و به تمام نمونه‌ها به میزان ۵ درصد وزنی بقایای گیاهی یونجه استریل شده با اتوکلاو مرطوب (جدول ۲)، اضافه گردید (Rakhsh et al., 2017). مقدار کربن و نیتروژن بقایای گیاهی با دستگاه CHNSO تعیین شد. مقدار فسفر و پتاسیم بقایای گیاهی و ویژگی‌های خاک با روش‌های علمی و متداول بررسی گردید (Alef & Nannipieri, 1995). از مایه تلقیح تهیه شده (Pronk et al., 2012; Rakhsh et al., 2017) از یک خاک تحت کشت گیاه یونجه برای افزودن جامعه میکروبی مورد نیاز به نمونه‌ها استفاده شد (جدول ۲). پس از افزودن ۵ میلی‌لیتر مایه تلقیح به همراه آب مقطر کافی و هوا خشک کردن نمونه‌ها، مجدداً رطوبت نمونه‌ها با استفاده از آب مقطر به ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه (Klute, 1986) رسید (برای اینکه مقدار آب اضافی در نمونه‌ها خطا در رطوبت نهایی ایجاد نکند ابتدا نمونه‌ها هوا خشک شده و سپس به مقدار کافی آب مقطر به هر نمونه افزوده شد تا به ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه برسد).

جدول ۱- خصوصیات بقایای یونجه و خاک مورد استفاده در تهیه مایه تلقیح
Table 1- Properties of alfalfa residues and soil used in the preparation of inoculum

بقایای یونجه Alfalfa residues	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن کل Total nitrogen	OC/N	فسفر Phosphorus	پتاسیم Potassium
	%	%	–	%	%
	48.21	3.7	13	0.3	2.34
خاک Soil	pH	EC	کربن آلی Organic carbon	نیتروژن کل Total nitrogen	
	–	µS/cm	%	%	
	7	864	0.5	0.03	

جدول ۲- ویژگی‌های رس‌های ورمی‌کولیت و زئولیت مورد استفاده در آزمایش
Table 2- Characteristics of vermiculite and zeolite clays used in the experiment

نوع رس Cay type	سطح ویژه Specific surface area (SSA)				ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	چگالی بار سطح Charge density	pH(1:5)			EC (1:5)			
	m ² /g												
	EGME		BET				µS/cm						
	نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation						نوع کاتیون اشباع شده Saturated cation						
	سدیم Na		کلسیم Ca				mmol/kg	mmol/m ²	سدیم Na			کلسیم Ca	
	سدیم Na		کلسیم Ca						آلومینیوم Al			آلومینیوم Al	
ورمی کولیت Vermiculite	850	742	49	46.74	1050	1.23 × 10 ⁻³	5.4	6.8	5	25	37	28	
زئولیت Zeolite	991	852	115.01	85.5	2540	2.54 × 10 ⁻³	5.5	6.4	4.8	26	39	31	

SSA: Specific Surface Area

CEC: Cation Exchange Capacity

EC: Soil Electrical Conductivity

EGME: Ethylene Glycol Monomethyl Ether

BET: Brunauer Emmett Teller

ماده آلی در خاک محسوب می‌شود (Arnarson & Keil, 2007; Keiluweit et al., 2016). معدنی شدن نیتروژن آلی تحت تأثیر ویژگی‌های خاک به‌خصوص، pH قرار دارد و با کاهش pH خاک، فعالیت ریزجانداران و در نتیجه معدنی نیتروژن آلی در خاک کاهش یافت (Grzyb et al., 2020; Kooijman et al., 2009; Sariyildiz & Anderson, 2003; Venterea et al., 2003). همین دلیل در تیمار حاوی رس اشباع شده با کاتیون آلومینیوم معدنی شدن نیتروژن به دلیل pH پایین و سمیت آلومینیوم برای ریزجانداران، کمتر بود.

تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیشترین و کمترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی به ترتیب در خاک‌هایی با ۴۵ درصد رس ورمی‌کولیت اشباع شده با کلسیم (۱۵/۵۶ میلی گرم بر ۵۰ گرم خاک) و شن خالص (۴/۳۰ میلی گرم بر ۵۰ گرم خاک) اندازه‌گیری شدند (شکل ۲). ساختار جمعیت باکتری‌ها تحت تأثیر ترکیب مواد معدنی است و کانی‌ها نقش بزرگی در رشد و فعالیت باکتری‌ها ایفا می‌کنند (Carson et al., 2009). فعالیت متابولیکی ریزجانداران تحت تأثیر جذب سطحی ریزجانداران توسط کانی‌های خاک قرار دارد. کانی‌های خاک با تأثیر بر خصوصیات محیط رشد میکروب‌ها بر فعالیت ریزجانداران در خاک تأثیرگذار هستند (Mohammadi et al., 2011). با افزایش مقدار رس نیتروژن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت. احتمالاً با افزایش رس حفاظت از زیست‌توده میکروبی و ماده آلی افزایش می‌یابد. هم خصوصیات فیزیکی (مقدار رس) و هم شیمیایی خاک (مانند pH) هر دو بر فرایندهای میکروبی و در نتیجه بر تجزیه ماده آلی در خاک تأثیرگذار هستند (Li et al., 2018). بیشترین مقدار نیتروژن زیست‌توده میکروبی در رس‌های اشباع شده با کلسیم و کمترین مقدار این صفت در رس‌های اشباع شده با آلومینیوم اندازه‌گیری گردیدند (شکل ۲). سدیم تأثیر بینابینی بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی داشت. کم بودن pH رس‌های اشباع شده با آلومینیوم و همچنین سمیت آلومینیوم برای ریزجانداران موجب کاهش زیست‌توده میکروبی خاک و در نتیجه کاهش معدنی شدن ماده آلی گردید. تأثیر سمیت آلومینیوم و اسیدیته بر ریزجانداران در مطالعات مشاهده شده است (Kunito et al., 2016).

پیش از تجزیه واریانس داده‌ها، نرمال بودن آن‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و همگنی واریانس تیمارها با استفاده از آزمون لون به کمک نرم‌افزار SPSS 25، در سطح ۵ درصد مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه واریانس داده‌ها به کمک نرم‌افزار SAS 9.4 صورت گرفت و مقایسه میانگین‌های داده‌ها به کمک آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد انجام شدند.

نتایج و بحث

تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر درصد

نیتروژن معدنی

تجزیه واریانس داده‌ها نشان دهنده تأثیر معنی‌دار اثرات ساده و متقابل تیمارهای آزمایشی بر درصد نیتروژن معدنی در سطح احتمال یک درصد بود (جدول ۳). بیشترین درصد نیتروژن معدنی در شن خالص (۷/۰۳ درصد) و ۶۰ روز پس از خوابانیدن نمونه‌ها و کمترین مقدار، در خاک‌هایی با ۴۵ درصد رس زئولیت اشباع شده با آلومینیوم، ۱۵ روز پس از خوابانیدن نمونه‌ها و به میزان ۰/۷۱ درصد به‌دست آمدند (شکل ۱).

زئولیت کلینوپتیولیت با واحدهای ساختاری یکسان و ظرفیت تبادل کاتیونی بالا توانایی نگهداشت ماده آلی را دارد (Kamarudin et al., 2003; McGilloway et al., 2003). افزایش زئولیت به خاک موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و افزایش ظرفیت نگهداشت ترکیبات آلی نیتروژن‌دار می‌گردد (Ming & Boettinger, 2001). در نتیجه معدنی شدن نیتروژن آلی کاهش می‌یابد. ذرات رس به دلیل افزایش سطح ویژه خاک و همچنین افزایش زمان بازگشت نیتروژن اهمیت بالایی در دینامیک نیتروژن دارند. همبستگی بالایی بین بافت خاک و معدنی شدن نیتروژن آلی در مطالعات گزارش شده است (Thabit et al., 2023). مقدار رس خاک با تأثیر بر رژیم حرارتی خاک و نیز ظرفیت نگهداری آب در خاک بر معدنی شدن نیتروژن آلی تأثیرگذار است (Soinne et al., 2021; Thabit et al., 2023). بچتلد و نیمن (Bechtold & Naiman, 2006) نشان دادند که خاک‌هایی با بافت ریز نیتروژن کل بیشتر و زمان بازگشت آهسته‌تری از خاک‌هایی با بافت درشت داشتند. در نتیجه با افزایش مقدار رس خاک و کاهش تجزیه ترکیبات نیتروژن‌دار، معدنی شدن نیتروژن آلی کاهش یافت (Bechtold & Naiman, 2006).

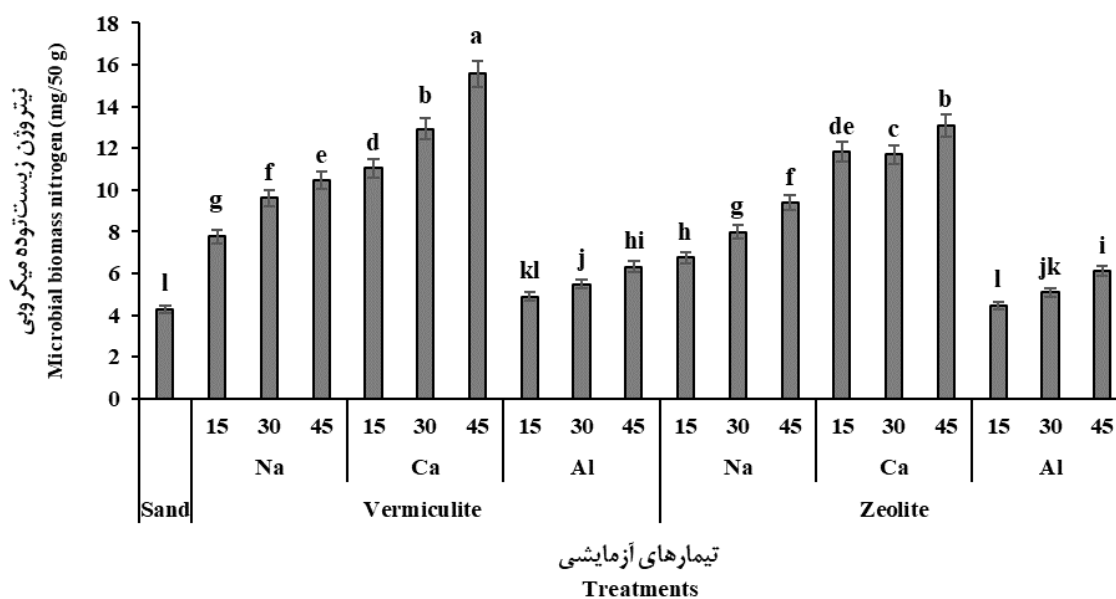
رس‌های اشباع شده با سدیم اثر بینابینی بر غلظت و درصد نیتروژن معدنی شده داشتند. سدیم در خاک موجب پراکنده شدن ذرات و کاهش انتشار اکسیژن می‌گردد. همبستگی بین مقدار اکسیژن در خاک با نگهداشت ماده آلی گزارش شده است (Amorim et al., 2022). انتشار اکسیژن یکی از عوامل اولیه مؤثر در تجزیه میکروبی

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر درصد نیتروژن معدنی و نیتروژن زیست‌توده میکروبی
Table 3- The results of variance analysis of the effect of type and content of clay and type of exchange cation on the percentage of mineralized nitrogen and microbial biomass nitrogen

		میانگین مربعات				نیتروژن زیست توده میکروبی Microbial biomass nitrogen
		Mean square				
منابع تغییرات Sources of variation	df	نیتروژن معدنی Mineralized nitrogen				
		مدت زمان خوابانیدن Incubation time				
		15	30	45	60	
نوع رس Clay type	1	0.11**	0.56**	1.15**	1.97**	9.24**
مقدار رس Clay content	3	8.71**	20.48*	40.65**	67.90**	112.85 **
نوع کاتیون تبادلی Type of cation	2	0.30**	1.41**	3.11*	4.11**	171.76**
نوع رس × مقدار رس Clay type × Clay content	3	0.01*	0.11**	0.31*	0.49**	1.43**
نوع رس × نوع کاتیون تبادلی Clay type × cation	2	0.03**	0.09*	0.06*	0.04**	0.95**
مقدار رس × نوع کاتیون تبادلی Clay content × cation	6	0.04*	0.17**	0.38**	0.49**	20.07**
نوع رس × مقدار رس × نوع کاتیون تبادلی Clay type × Clay content × cation	6	0.01**	0.05**	0.06**	0.08**	0.61**
خطا Error	48	0.0003	0.002	0.001	0.002	0.11
درصد ضریب تغییرات CV (%)	–	4.03	3.68	3.11	2.21	4.31

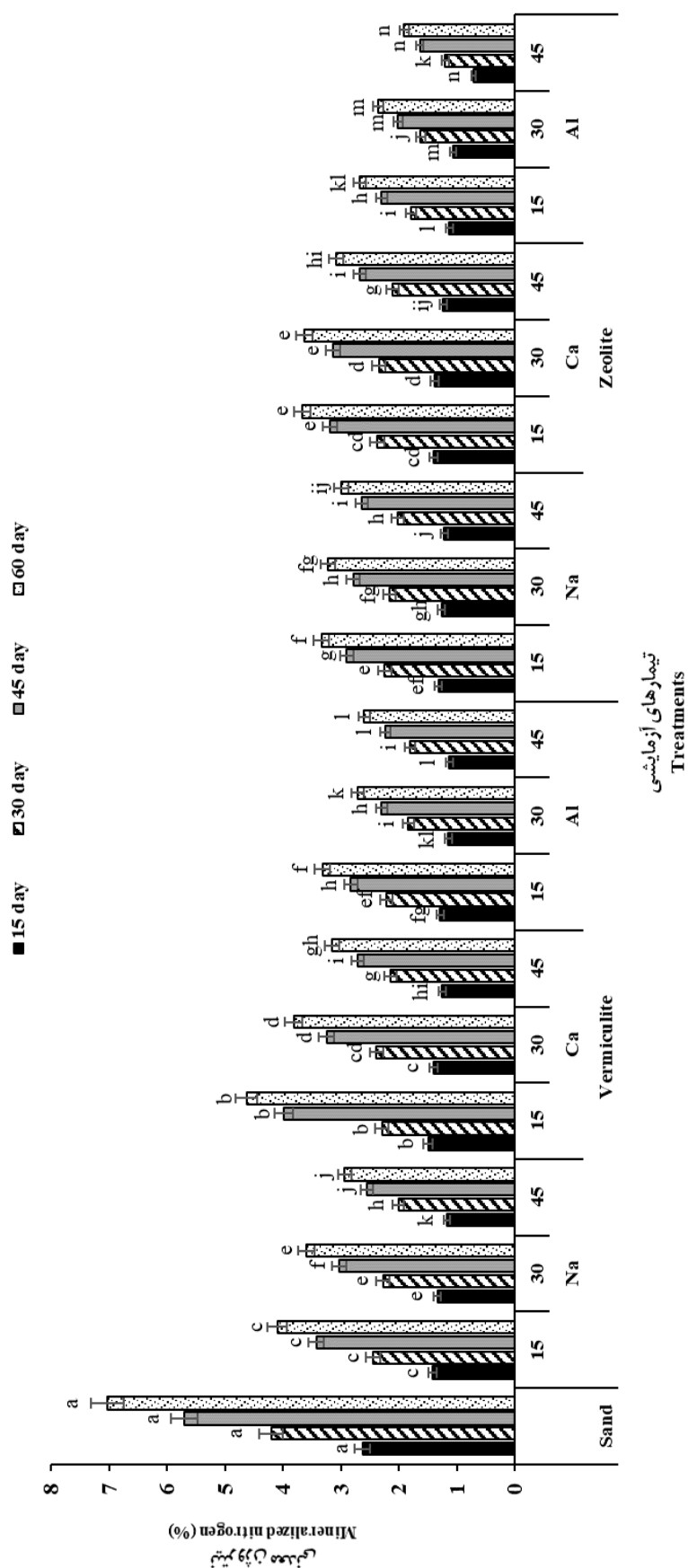
** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

** and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively.



شکل ۲- تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر نیتروژن زیست‌توده میکروبی

Figure 2- The effect of type and clay content and type of exchange cation on microbial biomass nitrogen



شکل ۱- تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر درصد نیتروژن معدنی شده در زمان‌های مختلف خوابانیدن
Figure 1- The effect of type and clay content and type of exchangeable cation on the percentage of mineralized nitrogen at different incubation times

تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی

با توجه به نتایج تجزیه واریانس داده‌ها اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی به ترتیب در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شدند (جدول ۴). بیشترین و کمترین فعالیت این آنزیم‌ها در شن خالص و خاک‌های با ۴۵ درصد زئولیت آلومینیومی (۳۹/۷۹ و ۴۵/۳۷ میکروگرم پی‌نیتروفل بر گرم خاک در ساعت) اندازه‌گیری شدند (شکل‌های ۳ و ۴).

دتا و همکاران (Datta et al., 2017) گزارش کردند که آنزیم‌های آزاد شده به خاک توسط ریزجانداران، به سرعت به وسیله رس‌ها جذب و غیرفعال می‌شوند. هر چه سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی رس بالاتر باشد جذب و غیر فعال‌سازی آنزیم‌ها افزایش

می‌یابد. با توجه به جدول ۱ سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی رس زئولیت نسبت به ورمی‌کولیت بیشتر بود در نتیجه زئولیت بیشتر موجب کاهش فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی گردید. مطالعات متعددی برهمکنش ماده آلی-آنزیم و رس-آنزیم را اثبات کرده‌اند (Boyd & Mortland, 2017; Paul & Sahoo, 2022; Zimmerman & Ahn, 2010). با جذب آنزیم بر روی سطح رس‌ها، اغلب فعالیت آنزیمی کاهش می‌یابد. احتمالاً اختلاف در pH و یا قدرت یونی متصل‌کننده یک آنزیم به سطح ذره رس (Theng, 2012)، تغییرات ساختاری ایجاد شده در آنزیم متصل شده به سطح رس (Boyd & Mortland, 2017) و یا موانع استقرار آنزیم بر روی سطح رس (Allison et al., 2007) همگی موجب کاهش فعالیت آنزیم‌ها می‌گردند.

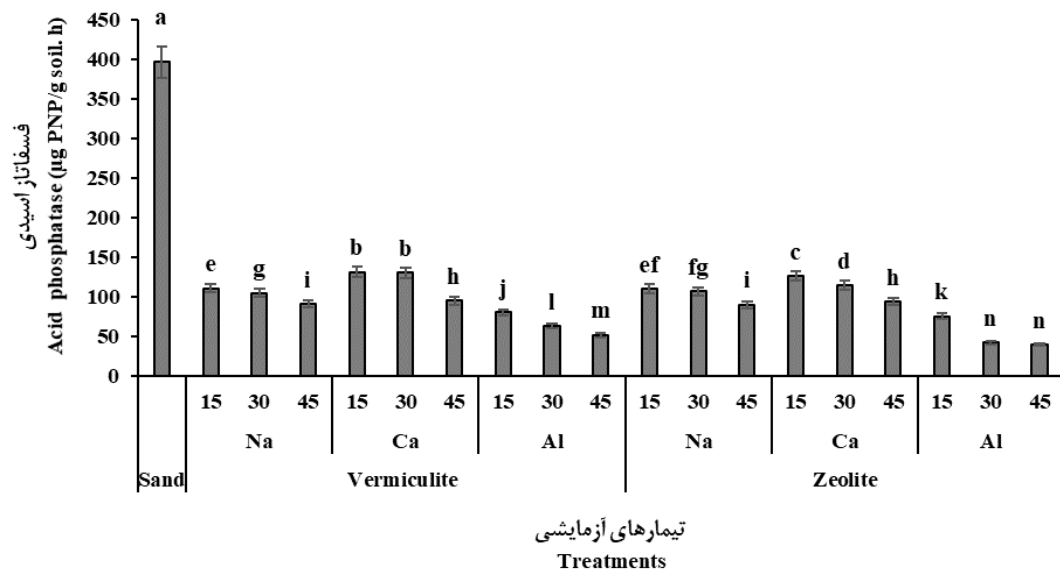
جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبادلی بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی و سلولاز
Table 4- The results of variance analysis of the effect of type and clay content and type of exchange cation on activities of acid and alkaline phosphatase and cellulase enzymes

منابع تغییرات Sources of variation	df	میانگین مربعات Mean square		
		فعالیت آنزیمی Enzyme activity		
		فسفاتاز اسیدی Acid phosphatase	فسفاتاز قلیایی Alkaline phosphatase	سلولاز Cellulase
نوع رس Clay type		429.57 **	1248.67 **	3919.98 **
مقدار رس Clay content	1	419865.99 **	1637964.05 **	1701685.53 **
نوع کاتیون تبادلی Type of cation	3	11837.69 *	45518.48 **	239133.19 **
نوع رس × مقدار رس Clay type × Clay content	2	102.07 *	274.95 **	547.15 **
نوع رس × نوع کاتیون تبادلی Clay type × cation	3	140.50 **	453.77 **	524.82 **
مقدار رس × نوع کاتیون تبادلی Clay content × cation	2	1519.32 **	5519.76 *	29900.39 **
نوع رس × مقدار رس × نوع کاتیون تبادلی Clay type × Clay content × cation	6	49.29 **	107.87 *	986.80 **
خطا Error	6	3.48	37.24	33.27
درصد ضریب تغییرات CV (%)	48	3.11	2.02	4.21

** و * به ترتیب در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.
**and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively.

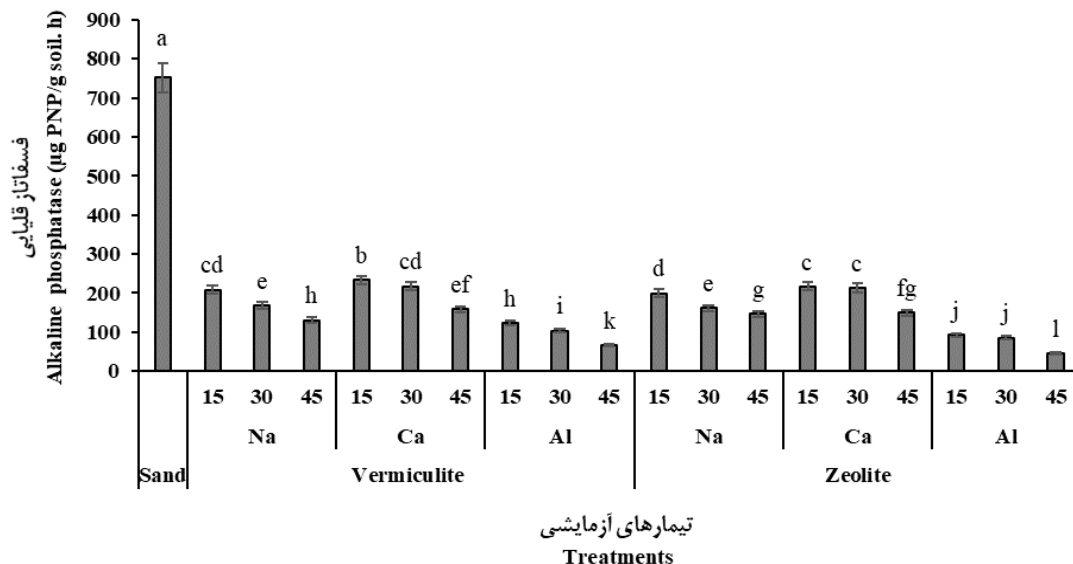
(2010). با توجه به جدول ۱ بیشترین pH، برای رس‌های کلسیمی و کمترین pH برای رس‌های آلومینیومی اندازه‌گیری شدند و pH رس‌های سدیمی حد واسط رس‌های کلسیمی و آلومینیومی بود. همچنین بیشترین و کمترین فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی نیز در رس‌هایی اشباع شده با کاتیون کلسیم و آلومینیوم به دست آمدند. احتمالاً کاهش pH و سمیت آلومینیوم بر رشد و فعالیت ریزجانداران تأثیرگذار بوده و در نتیجه فعالیت آنزیم‌ها نیز کاهش یافت.

فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی به‌طور معنی‌داری با افزایش مقدار رس، کاهش یافتند (شکل‌های ۳ و ۴). مطالعات هوانگ و همکاران (Huang et al., 2005) و زیمرمن و آهن (Zimmerman & Ahn, 2010) نشان داد که با افزایش مقدار رس، فعالیت آنزیم‌ها کاهش می‌یابد. تفاوت فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی بین شن خالص و ۱۵ درصد رس بیشتر از تفاوت بین مقادیر ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد رس بود. احتمالاً مقادیر کم رس با ایجاد سطح ویژه کافی در خاک، توانایی غیر فعال‌سازی و کاهش فعالیت آنزیم‌ها را دارند (Huang et al., 2005 Zimmerman & Ahn,)



شکل ۳- تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی

Figure 3- The effect of type and clay content and type of exchangeable cation on the activity of acid phosphatase enzyme



شکل ۴- تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی

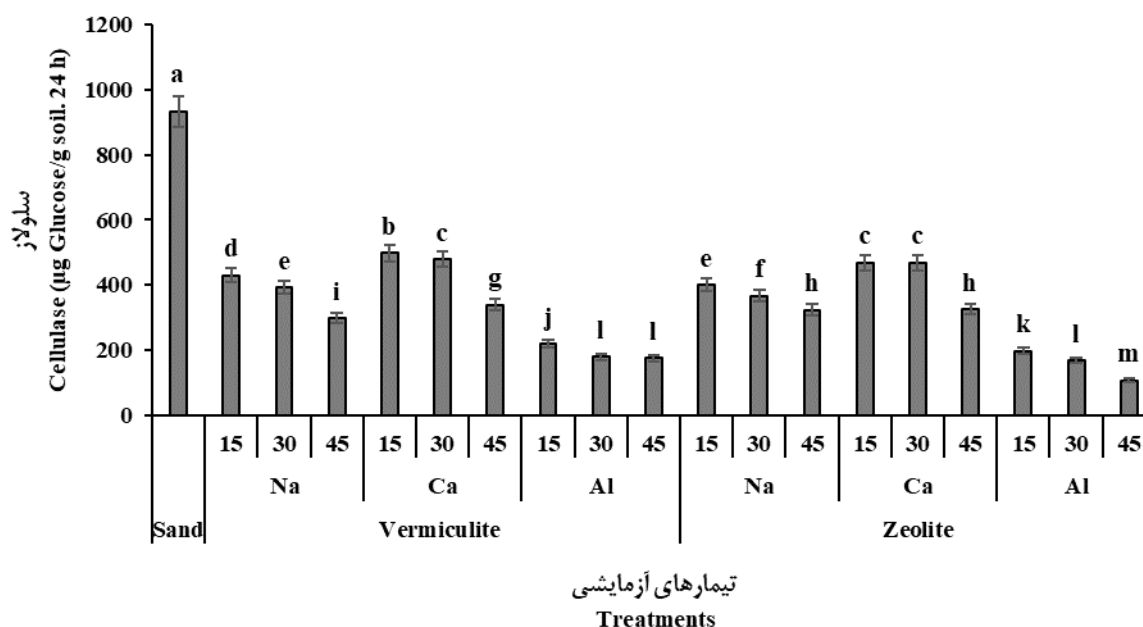
Figure 4- The effect of type and clay content and type of exchangeable cation on the activity of alkaline phosphatase enzyme

آنزیم سلولاز به ترتیب در شن خالص و خاک‌های با ۴۵ درصد رس زئولیت اشباع شده با آلومینیوم به میزان ۹۳۲/۵۳ و ۱۰۷/۳۸ میکروگرم گلوکز بر گرم خاک در ۲۴ ساعت اندازه‌گیری شدند (شکل ۵). مشابه نتایج فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و قلیایی احتمالاً سطح ویژه بالاتر و ظرفیت تبادل کاتیونی بیشتر زئولیت در مقایسه با ورمی‌کولیت (جدول ۱) منجر به کاهش فعالیت آنزیم سلولاز گردید. تفاوت در فعالیت آنزیم‌ها بین شن خالص و ۱۵ درصد بیشتر از خاک‌هایی با ۱۵، ۳۰ و ۴۵ درصد رس بود. رس‌ها و ذرات کلئیدی توانایی جذب و غیر فعال‌سازی آنزیم‌ها در خاک را دارند (Sinegani et al., 2005). آنزیم‌های غیرفعال شده نسبت به تغییر شکل پروتئین‌ها در خاک کمتر حساس بوده و این امر بر کیفیت خاک و فعالیت‌های بیوشیمیایی تأثیر می‌گذارد. در نتیجه جمعیت میکروبی و تجزیه ماده آلی در خاک کاهش می‌یابد (Sinegani & Mahohi, 2010). اسیدی بودن خاک‌هایی آلومینیومی در مقابل خاک‌های کلسیمی و سدیمی (جدول ۱) و سمیت آلومینیوم برای ریزجانداران موجب کاهش فعالیت، تولید کمتر آنزیم‌ها و معدنی شدن کمتر ماده آلی خاک شد. همچنین آلومینیوم قادر به برقراری پیوند با آنزیم‌ها و غیرفعال کردن آن‌ها می‌باشد (Bergaya & Lagaly, 2013). در نتیجه خاک‌های اشباع شده با آلومینیوم فعالیت آنزیم سلولاز کمتری داشتند.

مطالعات لیو و همکاران (Liu et al., 2008) نشان داد که مقدار زیست‌توده و فعالیت ریزجانداران تحت تأثیر خصوصیات خاک از جمله pH قرار دارد. با تغییر pH، آنزیم‌ها غیرفعال شده و این امر نقش مهمی در چرخه عناصر غذایی (نیتروژن، فسفر، کربن و گوگرد) در خاک و تشکیل هوموس ایجاد می‌کند (Buol et al., 2011). با تغییر pH و از هم گسستن گروه‌های آنزیمی آزاد، سوسترای آزاد، کمپلکس آنزیم-سوستر و یا ترکیبی از این تأثیرات منجر به غیرفعال شدن غیرقابل برگشت آنزیم‌ها در خاک می‌شود (Punekar, 2018). کاتیون‌ها در خاک بر جذب آنزیم‌ها تأثیر می‌گذارند و موجب خنثی شدن پتانسیل الکترواستاتیک بار منفی آنزیم‌ها و ذرات کلئیدی، با تشکیل کمپلکس‌های رس-کاتیون-آنزیم و یا هوموس-کاتیون-آنزیم در خاک می‌شوند. در حقیقت خصوصیات خاک مانند pH، نوع کاتیون، نوع و مقدار رس، ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه و مقدار ماده آلی همگی بر فعالیت آنزیم‌ها در خاک تأثیرگذار هستند (Li et al., 2024; Tian et al., 2024).

تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر فعالیت آنزیم سلولاز

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر متقابل نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی تأثیر معنی‌داری بر فعالیت آنزیم سلولاز در سطح احتمال یک درصد داشت (جدول ۴). بیشترین و کمترین فعالیت



شکل ۵- تأثیر نوع و مقدار رس و نوع کاتیون تبدلی بر فعالیت آنزیم سلولاز

Figure 5- The effect of type and clay content and type of exchangeable cation on the activity of cellulase enzyme

نتیجه گیری

زیست توده میکروبی افزایش می یابد. معدنی شدن نیتروژن آلی، مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی و فعالیت آنزیمی در خاک هایی با کاتیون های تبدلی مختلف، متفاوت بود. بیشترین و کمترین مقدار نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست توده میکروبی به ترتیب در خاک های با کاتیون تبدلی کلسیم و خاک هایی با کاتیون تبدلی آلومینیوم اندازه گیری گردید. این نتیجه نشان می دهد که کاتیون های تبدلی با تغییر ویژگی های فیزیکوشیمیایی خاک بر فعالیت های میکروبی خاک تأثیر گذاشته و موجب تغییر دینامیک ماده آلی در خاک می شوند.

نتایج این پژوهش نشان داد که معدنی شدن نیتروژن آلی و مقدار نیتروژن زیست توده میکروبی تحت تأثیر ویژگی های کانی های رسی قرار می گیرد. درصد نیتروژن معدنی شده و نیتروژن زیست توده میکروبی در خاک هایی با رس ورمی کولیت با ظرفیت تبدل کاتیونی کمتر، بیشتر از خاک هایی با رس زئولیت بود. صرف نظر از مدت زمان خواباندن نمونه ها با افزایش مقدار رس، درصد نیتروژن معدنی شده و فعالیت آنزیمی کاهش یافت ولی با افزایش مقدار رس نیتروژن زیست توده میکروبی افزایش یافت. احتمالاً با افزایش رس حفاظت از

References

1. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press.
2. Allison, S.D., Gartner, T.B., Holland, K., Weintraub, M., & Sinsabaugh, R.L. (2007). Soil enzymes: linking proteomics and ecological processes. *Manual of Environmental Microbiology*, 704-711. <https://doi.org/10.1128/9781555815882.ch58>
3. Amorim, H.C., Hurtarte, L.C., Souza, I.F., & Zinn, Y.L. (2022). C: N ratios of bulk soils and particle-size fractions: Global trends and major drivers. *Geoderma*, 425, 116026. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116026>
4. Aquino, A.J., Tunega, D., Schaumann, G.E., Haberhauer, G., Gerzabek, M.H., & Lischka, H. (2011). The functionality of cation bridges for binding polar groups in soil aggregates. *International Journal of Quantum Chemistry*, 111(7-8), 1531-1542. <https://doi.org/10.1002/qua.22693>
5. Arnarson, T.S., & Keil, R.G. (2007). Changes in organic matter-mineral interactions for marine sediments with varying oxygen exposure times. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(14), 3545-3556. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.04.027>
6. Basile-Doelsch, I., Amundson, R., Stone, W.E.E., Masiello, C.A., Bottero, J.Y., Colin, F., Masin, F., Borschneck, D., & Meunier, J.D. (2005). Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion. *European Journal of Soil Science*, 56(6), 689-703. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00703.x>
7. Bechtold, J.S., & Naiman, R.J. (2006). Soil texture and nitrogen mineralization potential across a riparian toposequence in a semi-arid savanna. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(6), 1325-1333. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.09.028>
8. Bergaya, F., & Lagaly, G. (2013). *Handbook of Clay Science* (2 ed., Vol. 5). Elsevier Press. <https://books.google.com/books?id=UmNJ5FGxUxwC>
9. Boyd, S., & Mortland, M. (2017). Enzyme interactions with clays and clay-organic matter complexes. In *Soil Biochemistry* (pp. 1-28). Routledge.
10. Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
11. Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., & McDaniel, P.A. (2011). *Soil Genesis and Classification*. John Wiley and Sons.
12. Carson, J.K., Campbell, L., Rooney, D., Clipson, N., & Gleeson, D.B. (2009). Minerals in soil select distinct bacterial communities in their microhabitats. *FEMS Microbiology Ecology*, 67(3), 381-388. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2008.00645.x>
13. Castellano, M.J., Kaye, J.P., Lin, H., & Schmidt, J.P. (2012). Linking carbon saturation concepts to nitrogen saturation and retention. *Ecosystems*, 15, 175-187. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9501-3>
14. Chorom, M., & Rengasamy, P. (1995). Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*, 46(4), 657-665. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01362.x>
15. Datta, R., Anand, S., Moulick, A., Baraniya, D., Imran Pathan, S., Rejsek, K., Vranova, V., Sharma, M., Sharma, D., & Formanek, P. (2017). How enzymes are adsorbed on soil solid phase and factors limiting its activity: A Review. *International Agrophysics*, 31(2). <https://www.degruyter.com/view/j/intag>

16. Davidson, E.A., & Janssens, I.A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165-173. <https://doi.org/10.1038/nature04514>
17. Ding, G.C., Pronk, G.J., Babin, D., Heuer, H., Heister, K., Kögel-Knabner, I., & Smalla, K. (2013). Mineral composition and charcoal determine the bacterial community structure in artificial soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 86(1), 15-25. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12070>
18. Ellis, R.J. (2004). Artificial soil microcosms: a tool for studying microbial autecology under controlled conditions. *Journal of Microbiological Methods*, 56(2), 287-290. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2003.10.005>
19. Galicia-Andrés, E., Escalona, Y., Oostenbrink, C., Tunega, D., & Gerzabek, M.H. (2021). Soil organic matter stabilization at molecular scale: The role of metal cations and hydrogen bonds. *Geoderma*, 401, 115237. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115237>
20. Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., & Niewiadomska, A. (2020). Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. *Agronomy*, 10(12), 1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
21. Guenet, B., Leloup, J., Hartmann, C., Barot, S., & Abbadie, L. (2011). A new protocol for an artificial soil to analyse soil microbiological processes. *Applied Soil Ecology*, 48(2), 243-246. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.04.002>
22. Guggenberger, G., & Kaiser, K. (2003). Dissolved organic matter in soil: challenging the paradigm of sorptive preservation. *Geoderma*, 113(3-4), 293-310. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00366-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00366-X)
23. Hamarashid, N.H., Othman, M.A., & Hussain, M.A.H. (2010). Effects of soil texture on chemical compositions, microbial populations and carbon mineralization in soil. *Egyptian Journal of Experimental Biology (Botany)* 6(1), 59-64.
24. Huang, Q., Liang, W., & Cai, P. (2005). Adsorption, desorption and activities of acid phosphatase on various colloidal particles from an Ultisol. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 45(3-4), 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2005.08.011>
25. Jackson, M.L. (2005). *Soil Chemical Analysis, Advanced Course*. UW-Madison Libraries Parallel Press.
26. Kamarudin, K.S., Hamdan, H., & Mat, H. (2003). Methane adsorption characteristic dependency on zeolite structures and properties. Proceedings of the Symposium of Malaysian Chemical Engineers, Malaysian.
27. Keiluweit, M., Nico, P.S., Kleber, M., & Fendorf, S. (2016). Are oxygen limitations under recognized regulators of organic carbon turnover in upland soils? *Biogeochemistry*, 127, 157-171. <https://doi.org/10.1007/s10533-015-0180-6>
28. Klute, A. (1986). Water Retention: Laboratory Methods. In *Methods of Soil Analysis: part 1-Physical and Mineralogical Methods* (2 ed., pp. 635-662). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
29. Knicker, H. (2011). Soil organic N-An under-rated player for C sequestration in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(6), 1118-1129. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.020>
30. Kooijman, A., Van Mourik, J., & Schilder, M. (2009). The relationship between N mineralization or microbial biomass N with micromorphological properties in beech forest soils with different texture and pH. *Biology and Fertility of Soils*, 45, 449-459. <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0354-2>
31. Kunhi Mouvenchery, Y., Jaeger, A., Aquino, A.J., Tunega, D., Diehl, D., Bertmer, M., & Schaumann, G.E. (2013). Restructuring of a peat in interaction with multivalent cations: effect of cation type and aging time. *PLOS ONE*, 8(6), e65359. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065359>
32. Kunito, T., Isomura, I., Sumi, H., Park, H.D., Toda, H., Otsuka, S., Nagaoka, K., Saeki, K., & Senoo, K. (2016). Aluminum and acidity suppress microbial activity and biomass in acidic forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.019>
33. Lal, R. (2020). Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A-32A. <https://doi.org/10.2489/jswc.75.2.27A>
34. Li, J., Wu, J., Yu, J., Wang, K., Li, J., Cui, Y., Shangguan, Z., & Deng, L. (2024). Soil enzyme activity and stoichiometry in response to precipitation changes in terrestrial ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 191, 109321. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109321>
35. Li, L., Xu, M., Eyakub Ali, M., Zhang, W., Duan, Y., & Li, D. (2018). Factors affecting soil microbial biomass and functional diversity with the application of organic amendments in three contrasting cropland soils during a field experiment. *PLOS ONE*, 13(9), e0203812. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203812>
36. Liu, Z., Liu, G., Fu, B., & Zheng, X. (2008). Relationship between plant species diversity and soil microbial functional diversity along a longitudinal gradient in temperate grasslands of Hulunbeir, Inner Mongolia, China. *Ecological Research*, 23(3), 511-518. <https://doi.org/10.1007/s11284-007-0405-9>
37. McGilloway, R.L., Weaver, R.W., Ming, D.W., & Gruener, J.E. (2003). Nitrification in a zeoponic substrate. *Plant and Soil*, 256(2), 371-378. <https://doi.org/10.1023/A:1026174026995>

38. Mikutta, R., Kleber, M., Torn, M.S., & Jahn, R. (2006). Stabilization of soil organic matter: association with minerals or chemical recalcitrance? *Biogeochemistry*, 77(1), 25-56. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0712-6>
39. Ming, D.W., & Boettinger, J.L. (2001). Zeolites in soil environments. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 45(1), 323-345. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.11>
40. Mohammadi, K., Heidari, G., Khalesro, S., & Sohrabi, Y. (2011). Soil management, microorganisms and organic matter interactions: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(86), 19840. <https://doi.org/10.5897/AJBX11.006>
41. Najmadeen, H.H. (2011). Effects of soil organic matter, total nitrogen and texture on nitrogen mineralization process. *Al-Nahrain Journal of Science*, 8, 9. <https://doi.org/10.22401/JNUS.14.2.19>
42. Nikolaidis, N.P., & Bidoglio, G. (2013). Soil organic matter dynamics and structure. In *Sustainable Agriculture Reviews* (pp. 175-199). Springer.
43. Paul, R., & Sahoo, S. (2022). Clay-Enzyme Interactions and Their Implications. In *Soil Management for Sustainable Agriculture: New Research and Strategies* (pp. 49). Apple Academic Press. <https://doi.org/10.1201/9781003184881-3>
44. Pronk, G.J., Heister, K., Ding, G.C., Smalla, K., & Kögel-Knabner, I. (2012). Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment; aggregation and formation of organo-mineral associations. *Geoderma*, 189, 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.05.020>
45. Punekar, N. (2018). *Enzymes: catalysis, kinetics and mechanisms*. Springer.
46. Rakhsh, F., & Golchin, A. (2018). Carbohydrate concentrations and enzyme activities as influenced by exchangeable cations, mineralogy and clay content. *Applied Clay Science*, 163, 214-226. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.07.031>
47. Rakhsh, F., Golchin, A., Al Agha, A.B., & Alamdari, P. (2017). Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon. *Geoderma*, 307, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.07.010>
48. Rayment, G.E., & Lyons, D.J. (2011). *Soil Chemical Methods* (Vol. 3). CSIRO Publishing.
49. Sariyildiz, T., & Anderson, J.M. (2003). Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 35(3), 391-399. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00290-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00290-0)
50. Schinner, F., & Von Mersi, W. (1990). Xylanase, CM-cellulase and invertase activity in soil: an improved method. *Soil Biology and Biochemistry*, 22(4), 511-515. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90187-5](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90187-5)
51. Schwesig, D., Kalbitz, K., & Matzner, E. (2003). Effects of aluminium on the mineralization of dissolved organic carbon derived from forest floors. *European Journal of Soil Science*, 54(2), 311-322. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00523.x>
52. Sinegani, A.A.S., Emtiazi, G., & Shariatmadari, H. (2005). Sorption and immobilization of cellulase on silicate clay minerals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 290(1), 39-44. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.04.030>
53. Sinegani, A.A.S., & Mahohi, A. (2010). Soil water potential effects on the cellulase activities of soil treated with sewage sludge. *Plant, Soil and Environment*, 56, 333-339.
54. Soinne, H., Keskinen, R., Rätty, M., Kanerva, S., Turtola, E., Kaseva, J., Nuutinen, V., Simojoki, A., & Salo, T. (2021). Soil organic carbon and clay content as deciding factors for net nitrogen mineralization and cereal yields in boreal mineral soils. *European Journal of Soil Science*, 72(4), 1497-1512. <https://doi.org/10.1111/ejss.13003>
55. Tabatabai, M. (1994). Soil Enzymes. In R. W. Weaver (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2* (Vol. 2). Soil Science Society of America.
56. Thabit, F. N., El-Shater, A.-H., & Soliman, W. (2023). Role of silt and clay fractions in organic carbon and nitrogen stabilization in soils of some old fruit orchards in the Nile floodplain, Sohag Governorate, Egypt. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 23(2), 2525-2544. <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01209-3>
57. Theng, B. (2012). Proteins and enzymes. In *Developments in Clay Science* (Vol. 4, pp. 245-318). Elsevier.
58. Tian, Q., Yang, F., Wang, Z., & Zhang, Q. (2024). Variation of soil organic carbon components and enzyme activities during the ecological restoration in a temperate forest. *Ecological Engineering*, 201, 107192. <https://doi.org/10.1128/9781555815882.ch58>
59. Ulery, A.L., & Drees, L.R. (2008). *Methods of Soil Analysis: Mineralogical Methods* (Vol. 5). Soil Science Society of America. <https://books.google.com/books?id=Lqh6mYoKjdQC>
60. Ve, N.B., Olk, D., & Cassman, K.G. (2004). Characterization of humic acid fractions improves estimates of nitrogen mineralization kinetics for lowland rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1266-1277. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1266>
61. Venterea, R.T., Lovett, G.M., Groffman, P.M., & Schwarz, P.A. (2003). Landscape patterns of net nitrification in a northern hardwood-conifer forest. *Soil Science Society of America Journal*, 67(2), 527-539. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.5270>

62. Yoder, L. (1919). Adaptation of the Mohr Volumetric Method to General Determinations of Chlorine. *Industrial and Engineering Chemistry*, 11(8), 755-755. <https://doi.org/10.1021/ie50116a013>
63. Zimmerman, A.R., & Ahn, M.Y. (2010). Organo-mineral-enzyme interaction and soil enzyme activity. In *Soil enzymology* (pp. 271-292). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_15

Digital Land Suitability Assessment for Irrigated Cultivation of Some Agricultural Crops Using Machine Learning Approaches (Case Study: Qazvin-Abyek)

F. Jannati¹, F. Sarmadian^{2*}

1 and 2- Graduate M.Sc and Professor of Science and Soil Engineering Department, Faculty of Agricultural, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: Fsarmad@ut.ac.ir)

Received: 05-05-2024	How to cite this article: Jannati, F., & Sarmadian, F. (2024). Digital land suitability assessment for irrigated cultivation of some agricultural crops using machine learning approaches (Case Study: Qazvin-Abyek). <i>Journal of Water and Soil</i> , 38(4), 479-493. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87916.1407
Revised: 05-06-2024	
Accepted: 20-06-2024	
Available Online: 20-06-2024	

Introduction

Research and development in high-potential agricultural areas are of great importance for ensuring the food needs of the population and livestock. Neglecting these regions can lead to increased food prices and food shortages, which can have a negative impact on the economy and public health. Land suitability maps provide essential information for agricultural planning and are vital for reducing land degradation and evaluating sustainable land use. The utilization of modern mapping techniques such as digital soil mapping and machine learning algorithms can significantly improve the accuracy of land suitability assessment and crop performance prediction. These methods have been widely employed as primary tools for mapping and evaluating land suitability in various regions worldwide.

Materials and Methods

In this study, a total of 288 soil profiles were utilized to compute the land suitability index for wheat, barley, and alfalfa crops. Various environmental variables were included, such as topographic factors derived from the digital elevation model and spectral indices obtained from Landsat 8 satellite imagery. Eight key factors, namely slope percentage, climate, texture, gypsum content, equivalent calcium carbonate, electrical conductivity (EC), and sodium absorption ratio (SAR), were identified as influential in the assessment of land suitability. To quantify the degrees of land suitability for the target crops, a parametric approach based on the square root method was employed. Moreover, the random forest machine learning model was utilized for spatial modeling, zoning mapping, and determining the significance of environmental variables in the land suitability evaluation process. By incorporating these comprehensive methodologies, a more detailed and accurate understanding of the land suitability for wheat, barley, and alfalfa cultivation can be achieved, facilitating informed decision-making in agricultural planning and land management strategies.

Results and Discussion

The spatial prediction results demonstrated the effectiveness of the random forest model in classifying land suitability for wheat, barley, and alfalfa. The model achieved high accuracy, with Kappa coefficients of 81%, 84%, and 85% for wheat, barley, and alfalfa, respectively. The overall accuracies were also impressive, reaching 86% for wheat, 88% for barley, and 89% for alfalfa. Analyzing the land suitability assessment results, it was



©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.2024.87916.1407>

found that barley had the highest land suitability class, covering a significant portion of 40% in class S1. Alfalfa followed closely with 35.5% of the total area, and wheat occupied 32% in the same class. Delving into the predictive environmental variables for barley, Diffuse, SHt, and MrVBF emerged as the most influential factors. These variables played a crucial role in assessing the suitability of land for barley cultivation. Similarly, for wheat, the variables Diffuse, MrVBF, and TWI were identified as significant indicators, contributing to the accurate prediction of wheat performance. Regarding alfalfa, the variables MrVBF, Diffuse, and Valley_depth stood out as the most important variables, providing valuable insights into land suitability for alfalfa cultivation. In general, the limiting factors for irrigated cultivation of these crops were primarily associated with soil properties. In the northern regions, soil texture was identified as a significant limiting factor, impacting the suitability of the land for crop cultivation. On the other hand, in the southern regions, soil characteristics such as the percentage of lime, gypsum, salinity, and alkalinity were recognized as the most influential limiting factors, affecting the suitability of the land for successful crop production. These findings provide valuable information for land planners, farmers, and decision-makers in determining suitable areas for wheat, barley, and alfalfa cultivation. By considering the identified influential factors and addressing the limiting soil properties, agricultural practices can be optimized to maximize crop productivity and ensure sustainable land use.

Conclusion

The research aimed to evaluate land suitability for wheat, barley, and alfalfa crops under irrigation. Data selection focused on the most limiting factors for these crops. The model achieved acceptable predictions for wheat, barley, and alfalfa, with Kappa coefficients of 0.81, 0.85, and 0.84, and overall accuracies of 0.86, 0.89, and 0.88, respectively. Barley had the highest percentage of suitable land (40%), followed by alfalfa (39.5%) and wheat (32%). Soil constraints varied across the study area, including texture, stoniness, lime, gypsum, salinity, and alkalinity. The analysis identified 31 soil types, and the random forest model yielded a digital soil map with a Kappa coefficient of 0.76 and overall accuracy of 0.81. The findings support effective land management and agricultural planning.

Keywords: Digital soil mapping, Parametric method, Random forest, Suitability and digital assessment

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۷۹-۴۹۳

ارزیابی رقومی تناسب سرزمین برای کشت آبی برخی از محصولات زراعی با استفاده از رویکردهای یادگیری ماشین (آبیک-قزوین)

فاطمه جنتی^۱ - فریدون سرمیدیان^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۳۱

چکیده

مدیریت صحیح و منطقی و طراحی برنامه‌های کاربری اراضی در تأمین تقاضای غذا در سراسر جهان مفید بوده است. ارزیابی و تعیین تناسب زمین در حصول اطمینان از استفاده بهینه از منابع اراضی و درعین حال حفظ پتانسیل آن برای نسل‌های آینده مفید است. هدف اصلی این مطالعه ارزیابی رقومی تناسب اراضی برای کشت آبی محصولات زراعی گندم، جو و یونجه در منطقه آبیک دشت قزوین است. بدین منظور از اطلاعات ۲۸۸ تعداد پروفیل خاک برای محاسبه شاخص اراضی استفاده گردید. همچنین متغیرهای توپوگرافی شامل مشتقات اولیه و ثانویه مدل رقومی ارتفاع و متغیرهای مستخرج از تصاویر سنجش از دور (ماهواره لندست ۸) شامل شاخص‌های طیفی به‌عنوان متغیرهای محیطی جهت مدل‌سازی نقشه تحت کلاس تناسب اراضی برای سه محصول یونجه، گندم و جو و همچنین تهیه نقشه رده‌بندی خاک در سطح فامیل استفاده شدند. هشت عامل توپوگرافی، خاک و اقلیمی شامل درصد شیب، اقلیم، بافت، گچ، کربنات کلسیم معادل، هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) به‌عنوان عوامل مؤثر در ارزیابی تناسب زمین برای گندم، جو و یونجه شناسایی شدند. در ادامه از روش پارامتریک (ریشه دوم) برای محاسبه درجات تناسب سرزمین برای محصولات مورد نظر استفاده شد. مدل یادگیری ماشین جنگل تصادفی نیز جهت مدل‌سازی مکانی، تهیه نقشه پهنه‌بندی و تعیین درجه اهمیت متغیرهای محیطی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج پیش‌بینی مکانی نشان داد که مدل جنگل تصادفی تناسب اراضی را برای گندم، جو و یونجه به‌ترتیب با ضرایب کاپا ۸۱، ۸۴، ۸۵ درصد و دقت کلی ۸۶، ۸۸ و ۸۹ درصد طبقه‌بندی کرد. به‌ترتیب نتایج ارزیابی تناسب اراضی نشان داد که بیشترین کلاس تناسب اراضی مربوط به جو با ۴۰ درصد، یونجه با ۳۵/۵ درصد و گندم با ۳۲ درصد از کل مساحت منطقه در کلاس S1 بود. در بین متغیرهای محیطی پیش‌بینی کننده برای محصول جو متغیرهای Diffuse، SHT و MrVBF، برای محصول گندم متغیرهای Diffuse، MrVBF و TWI و برای محصول یونجه سه متغیر Diffuse، MrVBF و Valley_depth مهم‌ترین مشاهده گردیدند. بطور کلی، مهم‌ترین عوامل محدود کننده برای زراعت آبی محصولات مورد نظر مربوط به ویژگی‌های خاک بود، به‌نحوی که در نواحی شمالی بافت و در نواحی جنوبی ویژگی‌های درصد آهک، گچ، شوری و قلیائیت خاک‌ها به‌عنوان مهم‌ترین عوامل محدودکننده شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: تناسب و ارزیابی رقومی، جنگل تصادفی، روش پارامتریک، نقشه‌برداری رقومی خاک

مقدمه

جمعیت و دآمداری در حال رشد دارند. بی‌توجهی به این مناطق می‌تواند منجر به افزایش قیمت مواد غذایی و کمبود مواد غذایی شود که می‌تواند بر اقتصاد و سلامت عمومی تأثیر منفی بگذارد. از این رو، سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه این مناطق برای اطمینان از شیوه‌های کشاورزی پایدار و تأمین نیازهای غذایی جمعیت جهان ضروری است (Alhajj Ali et al., 2024). نقشه‌های تناسب اراضی اطلاعات لازم را برای برنامه‌ریزان کشاورزی فراهم می‌کند و برای کاهش تخریب اراضی و ارزیابی کاربری پایدار اراضی حیاتی است.

تحقیق و توسعه در مناطق با پتانسیل کشاورزی بالا از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این مناطق نقش مهمی در تأمین نیازهای غذایی

۱ و ۲- به‌ترتیب فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد و استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(*) نویسنده مسئول:
(Email: fsarmad@ut.ac.ir)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.87916.1407>

نقشه‌های دیجیتالی خاک مشاهده می‌شود. همچنین، تلاش‌هایی برای استفاده از این مدل‌ها در نقشه‌برداری دیجیتالی کلاس‌های تناسب اراضی و رده‌بندی خاک انجام شده است.

پژوهشگران بسیاری ارزیابی تناسب اراضی را با استفاده از نقشه‌برداری رقومی خاک در نقاط مختلف جهان انجام داده‌اند. در مطالعه‌ای که به طور مجزا توسط موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2020) و خاموشی و همکاران (Khamoshi et al., 2018) نقشه رقومی خاک را با استفاده مدل جنگل تصادفی و ارزیابی تناسب اراضی برای بخشی از اراضی کشاورزی منطقه آبیک استان قزوین انجام دادند. ایشان از متغیرهای کمکی مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره لندست ۸ به همراه مدل جنگل تصادفی استفاده نمودند و نشان دادند که مدل جنگل تصادفی از توانایی بالایی برای پیش‌بینی کلاس‌های خاک در منطقه مطالعاتی بود. سرمیدان و همکاران (Sarmadian et al., 2022) تحقیقی به منظور ارزیابی تناسب اراضی در دشت آبیک قزوین به این نتیجه رسیدند که روش‌های تلفیقی دارای قدرت بالاتری در ارزیابی اراضی دارند. کیلیچ و همکاران (Kılıç et al., 2022)، ترکیبی از تکنیک‌های فازی انتخاب تحلیل سلسله مراتبی^۴ و سیستم اطلاعات جغرافیایی^۵ ارزیابی تناسب اراضی را برای کشت گندم انجام دادند. همچنین نقشه تناسب اراضی را برای محصول گندم با ادغام الگوریتم تحلیل سلسله مراتبی AHP_ فازی با GIS تولید کردند. بارودی و همکاران (Baroudy et al., 2020) نشان دادند که مدل‌های پارامتری تطابق بالایی با تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌برداری رقومی دارند. کید و همکاران (Kidd et al., 2016) در تحقیق خود بیان کردند که استفاده از روش‌های یادگیری ماشین در ارزیابی رقومی خاک دقت بالاتری ارائه می‌کند. تقی‌زاده مهرجردی و همکاران (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020) در تحقیقی به منظور ارزیابی تناسب اراضی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مدل‌های یادگیری ماشین دارای قدرت بالایی برای مدل‌سازی کلاس‌های تناسب اراضی هستند.

با توجه به اینکه دشت آبیک یکی از مناطق استراتژیک تولید محصولات زراعی در کشور می‌باشد و سالانه سطح وسیعی از این اراضی توسط کشاورزان و بهره‌برداران تحت کشت می‌باشد، بنابراین تهیه نقشه‌های تغییرپذیری مکانی و پیوسته از وضعیت تناسب اراضی با استفاده از رویکردهای رقومی و مدل‌های یادگیری ماشین جهت اتخاذ برنامه‌ها و تصمیم‌های بهینه مدیریت و افزایش بهره‌وری از اراضی ضروری می‌باشد.

پژوهش حاضر با اهداف، (۱) تهیه نقشه‌های رقومی ارزیابی

کمبود نقشه تناسب اراضی و اطلاعات مرتبط در ایران وجود دارد (Roell et al., 2020) زیرا نقشه‌برداری خصوصیات خاک و نقشه‌برداری تناسب اراضی در ایران از رویکرد سنتی پیروی می‌کند. در رویکرد سنتی، استفاده از یک نقشه خاک به عنوان معیار تغییرپذیری خاک برای ایجاد نمایه‌های خاک، ممکن است باعث کاهش دقت نقشه‌های تناسب اراضی شود و ماهیت پیوسته تغییرات خاک و منظر نادیده گرفته شود و در نتیجه، طبقه‌بندی مکان‌ها به صورت گسسته و مرزهای دقیق مشخص می‌شود که ممکن است نادرست باشد. به علاوه، رویکرد سنتی زمان‌بر و پرهزینه است (Taghizadeh-Mehrjardi et al., 2020). نقشه‌برداری رقومی خاک به عنوان ابزاری نوین در این زمینه، اطلاعات مکانی دقیق و کمی خاک را با استفاده از فناوری‌های پیشرفته آشکار می‌کند. این اطلاعات برای مقابله با مسائلی مانند تخریب اراضی و امنیت غذایی ضروری است (McBratney et al., 2003). ارزیابی رقومی تناسب اراضی با استفاده از روش‌های مختلف، از جمله روش پارامتریک، به ما کمک می‌کند تا تناسب اراضی را برای کاربری‌های مختلف، مانند کشاورزی، جنگلداری و سکونتگاه‌های انسانی، تعیین کنیم. مدل جنگل تصادفی^۱ یکی از روش‌های جدید و کارآمد برای ارزیابی رقومی تناسب اراضی است. این مدل با استفاده از داده‌های مکانی و آماری، به طور دقیق و کارآمد تناسب اراضی را برای کاربری‌های مختلف پیش‌بینی می‌کند (Belgiu & Drăguț, 2016).

مطالعات اخیر برای پیش‌بینی عملکرد محصول از روش‌های یادگیری ماشین^۲ به جای روش‌های آماری استفاده کرده‌اند. الگوریتم‌های یادگیری ماشین امکان تحلیل داده‌های داری پیچیدگی بالا را فراهم می‌کنند و قادر به یادگیری از مجموعه داده‌های بزرگ هستند. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توان روابط خطی و غیرخطی متعددی را کشف کرد که نیازمند استفاده از مدل‌های آماری مختلف هستند (Roell et al., Teng et al., 2018; 2020).

یکی از مزایای دیگر یادگیری ماشین، قابلیت یکپارچه‌سازی آسان انواع داده‌هاست. تلفیق داده‌ها^۳ به عنوان یکی از اصول اصلی برای بهبود پیش‌بینی عملکرد محصول مورد توجه قرار گرفته است. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و ترکیب داده‌های مختلف مانند اطلاعات آب‌وهوا و داده‌های سنجش از دوری، می‌توان پیش‌بینی عملکرد محصول و ارزیابی تناسب اراضی برای محصولات مختلف را انجام داد (Taghizadeh-Dang et al., 2019; Mehrjardi et al., 2020).

اخیراً، استفاده گسترده از مدل‌های یادگیری ماشین در ایجاد

- 1- Random Forest
- 2- Machine Learning
- 3- Data Fusion

4- Analytic Hierarchy Process
5- Geographic Information System

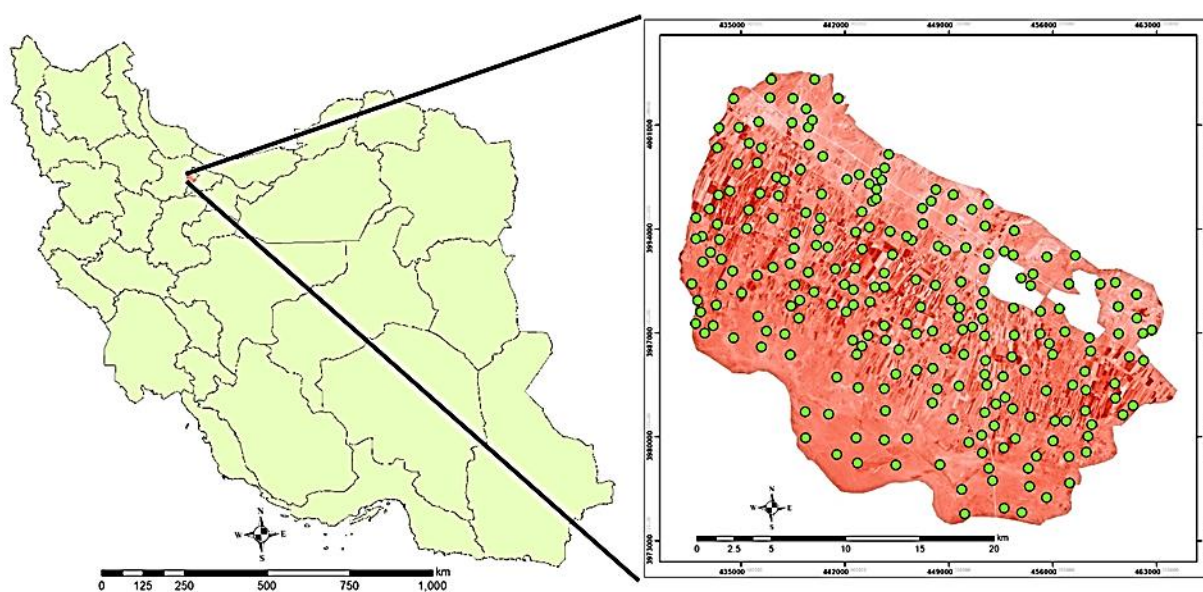
هوای معتدل و نیمه‌خشک است. بلندترین ارتفاع منطقه از سطح دریا ۱۴۸۳ و کمترین آن ۱۱۴۲ می‌باشد. متوسط بارندگی سالانه منطقه ۲۵۷ میلی‌متر، متوسط دما ۱۴/۳ درجه سانتی‌گراد بوده که سردترین ماه سال دی و گرم‌ترین ماه تیر می‌باشد. رژیم رطوبتی خاک‌ها به ترتیب زیریک خشک، اردیک ضعیف، در بخشی از قسمت‌های جنوبی منطقه اکوتیک و رژیم حرارتی ترمیک می‌باشد. کاربری غالب اراضی منطقه شامل زراعت آبی عمدتاً تحت کشت محصولات زراعی یکساله (گندم، جو، ذرت و یونجه)، زراعت دیم، مراتع شور و غیر شور می‌باشد (Mousavi et al., 2022).

تناسب اراضی برای کشت آبی محصولات گندم، جو و یونجه و ارزیابی کارایی مدل جنگل تصادفی، (۲) و معرفی مهم‌ترین متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر پیش‌بینی کلاس‌های تناسب اراضی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۶۰۱۱۵ هکتار از اراضی شهرستان آبیک از توابع استان قزوین می‌باشد که در حد واسط $36^{\circ} 01' 00''$ تا $36^{\circ} 20' 00''$ عرض شمالی و $50^{\circ} 23' 00''$ تا $50^{\circ} 59' 00''$ طول شرقی واقع گردیده است (شکل ۱). شهرستان آبیک دارای آب و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محل حفر پروفیل‌های مطالعاتی در منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location and position of drilled study profiles in the study area

تبخیر و تعرق استفاده شد. طول دوره رشد نیز برای منطقه مورد مطالعه با استفاده از تقویم زراعی منطقه به‌دست آمد. پس از نهایی‌شدن تجزیه‌های آزمایشگاهی پروفیل‌های مورد مطالعه بر اساس سامانه طبقه‌بندی آمریکایی خاک (Soil Survey Staff, 2022) تا سطح فامیل رده‌بندی گردید.

تهیه داده‌های کمکی و محیطی

بر اساس مدل اسکورپن در نقشه‌برداری رقومی خاک علاوه بر داده‌های مربوط به خاک نیاز به یک سری متغیرهای کمکی نیز است. متغیرهای محیطی مورد استفاده در این مطالعه از مدل رقومی ارتفاع سنجنده ALOS با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر بوده با عملیات

مطالعات صحرایی و آنالیزهای آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق از ۲۸۸ خاکرخ استفاده گردید که نحوه پراکنش این نقاط در (شکل ۱) آورده شده است. پس از حفر پروفیل‌ها ویژگی‌هایی مانند عمق افق‌های ژنتیکی، رنگ، بافت، ساختمان، پایداری، تجمع آهک، تجمع گچ، وجود یا عدم وجود سنگریزه در خاک، شیب، فرسایش و غیره در برگه‌های تشریح پروفیل یادداشت شد. سپس برای انجام آزمایشات فیزیکی شیمیایی، از تمامی افق‌ها نمونه‌برداری صورت گرفت. برای اطلاعات اقلیمی منطقه از آمار ۲۲ ساله ایستگاه هواشناسی شهرستان آبیک قزوین استفاده گردید. همچنین تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از نرم‌افزار CRAPWAT 8.0 محاسبه و برای تهیه منحنی دوره رشد از اطلاعات بارندگی و

تصاویر ماهواره‌ای و مدل رقومی ارتفاع مستخرج شده‌اند و در نهایت نقشه رقومی تحت کلاس تناسب اراضی برای سه محصول یونجه، گندم و جو و نقشه رده‌بندی خاک‌ها در سطح فامیل برای منطقه مورد مطالعه به دست آمد. نمای کلی تحقیق در (شکل ۳) نمایش داده شده است.

در این تحقیق برای ارزیابی مدل جنگل تصادفی از ۳۰ درصد از داده‌ها برای اعتبارسنجی مستقل استفاده شد و از دو معیار صحت کلی^۲ (رابطه ۳) و شاخص کاپا^۳ (رابطه ۴) استفاده گردید.

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ij}}{N} \quad (3)$$

N معرف کل پیکسل‌های طبقه‌بندی شده و $\sum_{i=1}^n X_{ij}$ نمایه مجموع پیکسل‌های قطر اصلی ماتریس خطا (پیکسل‌های صحیح طبقه‌بندی شده) می‌باشد.

(۴)

$$Kappa = \frac{N \sum_{i=1}^n X_{ii} - \sum_{i=1}^n (X_{i0} - X_{0i}) / N^2 - \sum_{i=1}^n (X_{i0} - X_{0i})}{N}$$

(n) تعداد ردیف‌ها در ماتریس، (X_{ij}) تعداد مشاهدات در ردیف i و ستون j (درایه‌های قطر اصلی)، X_{0i} و X_{i0} مجموع حاشیه به‌ترتیب ردیف i و ستون i، تعداد کل مشاهدات است تقسیم‌بندی ضریب کاپا در (جدول ۲) ارائه شده است.

نتایج و بحث

همان طور که در (جدول ۳) امار توصیفی خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه بیان شده است، متوسط درصد سنگریزه در نمونه‌های خاک حدوداً ۹/۷۱ است. مقدار کمینه و بیشینه سنگریزه به ترتیب از صفر تا ۸۴ می‌باشد.

در نصف نمونه‌ها، درصد سنگریزه کمتر از ۲ و در نصف دیگر بیشتر از ۲ است. همچنین، داده‌ها در این خصوصیت پراکنده بوده و انحراف از معیار حدوداً ۱۵/۳۱ است. در مورد نسبت جذب سدیم نیز مشاهده می‌شود که این خصوصیت در نمونه‌های خاک متغیر است. میانگین نسبت جذب سدیم حدوداً ۷/۱۹ است، با کمینه صفر و بیشینه ۱۴۰/۴۷ مقدار میانه نیز صفر است، که نشان‌دهنده این است که در نصف نمونه‌ها نسبت جذب سدیم صفر است. متغیریت داده‌ها در این خصوصیت با انحراف از معیار حدوداً ۲۱/۲۱ نشان داده می‌شود. ارقام مشابهی برای خصوصیت شیب نیز مشاهده می‌شود. میانگین شیب حدوداً ۴/۰۸ است، با کمینه صفر و بیشینه ۱۷. مقدار میانه نیز ۲/۱۷ است، نشان‌دهنده این است که نصفی از نمونه‌ها شیب کمتر از ۲/۱۷

Resample در محیط برنامه Saga GIS به ابعاد ۳۰ * ۳۰ تبدیل شدند. پس از اعمال پیش‌پردازش‌های لازم بر روی نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM)، پارامترهایی از قبیل شاخص شدت تابش پخشیده (Diffuse)، شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک بالا (MrVBF)، شاخص همواری قله با درجه تفکیک بالا (MrRTF)، ارتفاعات استاندارد شده (Sht)، عمق دره (Valley_depth)، حوضه آبریز اصلاح شده (m_catchment)، ارتفاع نرمال (NH) و شاخص خیزی توپوگرافی (TWI) در محیط نرم‌افزار SAGA GIS محاسبه و استخراج گردید. تصاویر ماهواره لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر می‌باشد. کلیه متغیرهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزارهای ERDAS IMAGINE 2014 و Saga GIS 5.00 گردیدند. در مجموع ۱۳ متغیر کمکی در این مطالعه جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. ۹ متغیر مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و ۴ متغیر از داده‌های سنجش از دور^۱ مستخرج گردید. شاخص‌های مستخرج از این تصاویر شامل شاخص تفاضلی پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص تفاضلی پوشش گیاهی (DVI)، شاخص شوری خاک (Salin index) و شاخص رس (Clay index) تهیه شدند برخی از این شاخص‌ها در (شکل ۲) نشان داده شدند. سپس کلیه متغیرهای مورد نظر به اندازه پیکسل ۳۰ * ۳۰ متر در سیستم مختصات (WGS 84 UTM) تهیه شده و در نتیجه نقشه‌های نهایی با بزرگنمایی ۳۰ متر مربعی تهیه گردیدند. در (جدول ۱) به تمامی شاخص‌های مستخرج برای مدل‌سازی اشاره شده است.

آماده‌سازی داده و مدل‌سازی

پس از پایان آنالیزهای آزمایشگاهی و با استفاده از داده‌های به‌دست‌آمده و برگه‌های تشریح پروفیل اقدام به نام‌گذاری خاک‌ها تا سطح فامیل بر اساس کلید رده‌بندی خاک ۲۰۲۲ گردید. بعد از رده‌بندی خاک‌ها تا سطح فامیل، کدگذاری خاک‌ها انجام شد. تمامی متغیرهای کمکی با فرمت رستر و اندازه پیکسل ۳۰ متر تهیه شدند و سپس برای هر پروفیل، مقادیر متغیرهای کمکی (شاخص‌های طیفی و شاخص‌های مستخرج از مدل رقومی ارتفاع) استخراج شدند. سپس این مقادیر به‌عنوان متغیر مستقل در مدل‌سازی برای ایجاد نقشه رده‌بندی و تحت کلاس تناسب اراضی مورد استفاده قرار گرفتند. اطلاعات متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره ای در اصل به‌عنوان متغیرهای مستقل که در مدل اسکورپن شناخته شده‌اند به مدل معرفی می‌شوند. تمامی این اطلاعات با فرمت نهایی اکسل (xlsx) تبدیل شده و در نهایت مدل‌سازی در نرم‌افزار R studio اجرا می‌شود آنچه که انجام می‌شود در اصل ایجاد یک مدل ریاضی است که متغیرها آن همان شاخص‌های کمکی هستند که از

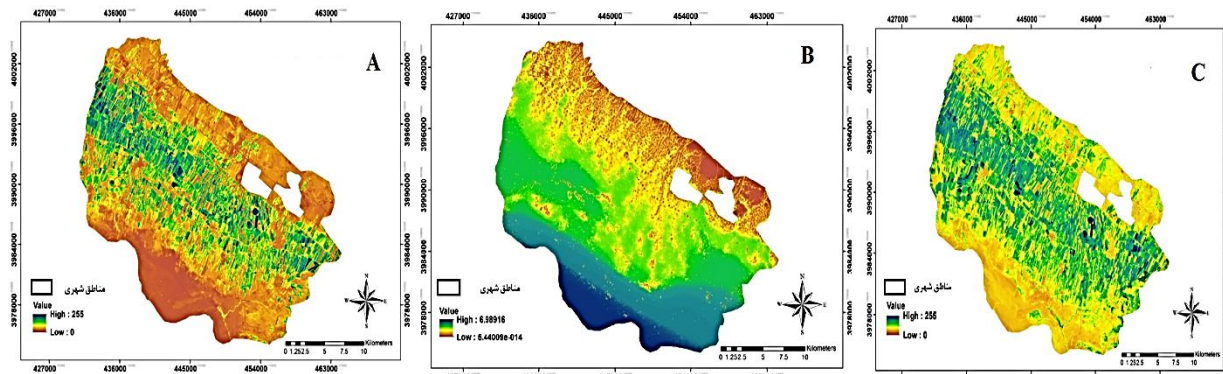
جهت تهیه نقشه رقومی خاک ابتدا با استفاده از آنالیزهای آزمایشگاهی و برگه‌های تشریح پروفیل، خاک‌های منطقه بر اساس کلید رده‌بندی (Soil Survey Staff, 2022) تا سطح فامیل رده‌بندی شدند که مجموعاً ۳۱ فامیل خاک مختلف در منطقه وجود داشت که فایل و مقدار مساحت این خاک‌ها در (جدول ۴) به‌صورت کامل ارائه شده است. پس از مشخص شدن خاک‌ها، داده‌های کمکی پروفیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS 10.4 که به‌صورت فایل اکسل استخراج گردید و برای استفاده در مدل‌سازی آماده شد. با استفاده از نرم‌افزار R و مدل جنگل تصادفی پیش‌بینی کلاس‌های فامیل منطقه انجام شد که در نهایت نقشه خاک منطقه به‌دست آمد.

و نصف دیگر شیب بیشتر از آن دارند. متغیریت داده‌ها در این خصوصیت با انحراف از معیار حدوداً ۲/۲ نشان داده می‌شود. هدایت الکتریکی نیز در نمونه‌های خاک متغیر است. میانگین هدایت الکتریکی حدوداً ۴/۴۵ است، با کمینه ۰/۱۷ و بیشینه ۱۲۴/۲. مقدار میانه هدایت الکتریکی ۰/۸۳ است، یعنی در نصف نمونه‌ها هدایت الکتریکی کمتر از ۰/۸۳ و در نصف دیگر بیشتر از آن است. متغیریت داده‌ها در این خصوصیت با انحراف از معیار حدوداً ۱۵/۱۹ نشان داده می‌شود. در مورد خصوصیت گچ، میانگین مقدار گچ حدوداً ۰/۸۶ است، با کمینه ۰ و بیشینه ۲۹/۰۵ مقدار میانه نیز ۱/۱ است، که نشان می‌دهد نیمی از نمونه‌ها دارای مقادیر گچ کمتر از ۱/۱ هستند و نصف دیگر دارای مقادیر بیشتر از آن هستند.

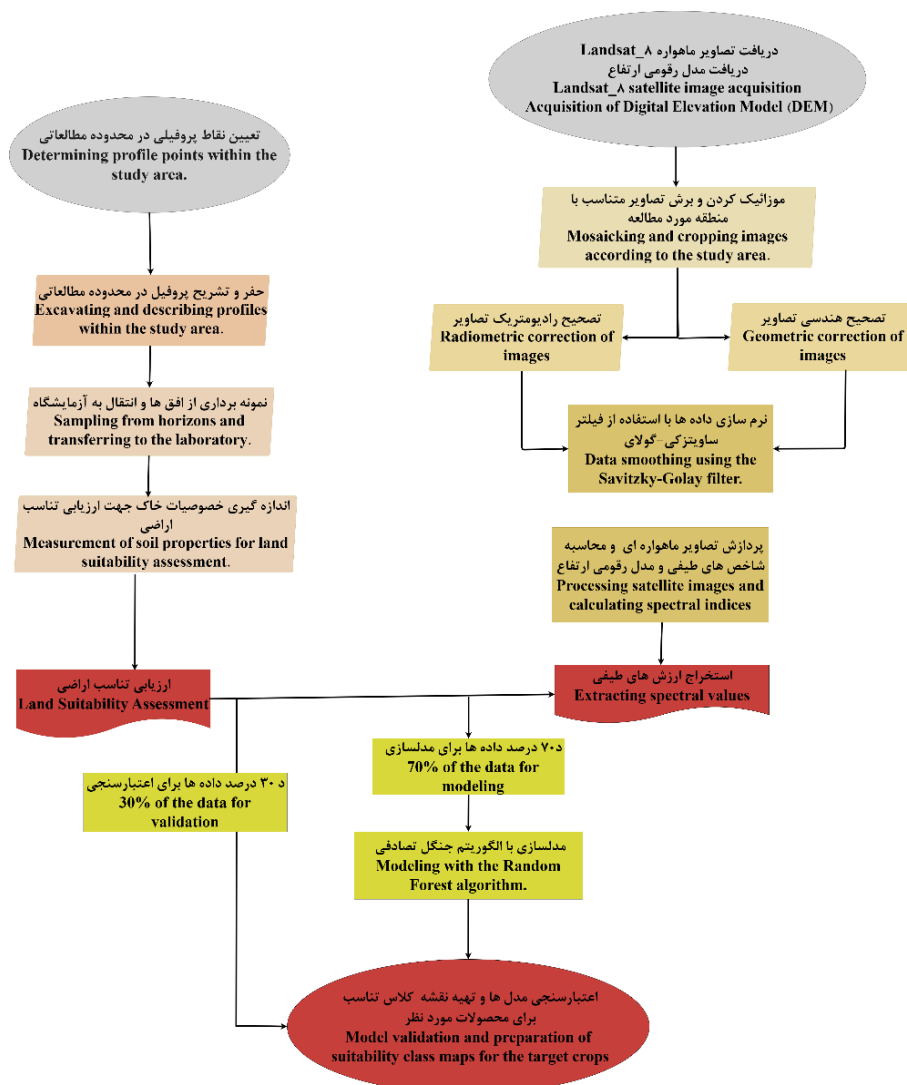
جدول ۱- شاخص‌های مستخرج از مدل رقومی ارتفاع و تصاویر ماهواره لندست ۸

Table 1- Extracted indices from digital elevation model and Landsat 8 satellite images

متغیر Variable	منبع Source	منابع Reference
شاخص بازتابنده سطح Diffuse	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Waruru et al., 2016
شاخص همواری کف دره با درجه تفکیک متعدد Multi-Resolution Index of Valley Bottom Flatness (MrVBF)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Heung et al., 2017
مدل رقومی ارتفاع Digital elevation model (DEM)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Heung et al., 2017
ارتفاع استاندارد Standard height (SHt)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Guo et al., 2019
عمق دره Valley_depth	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Martinez & Munoz, 2016
حوزه آبریز اصلاح شده Modified catchment(m_catchment)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Martinez & Munoz, 2016
شاخص خیسى توپوگرافیک Topographic Wetness Index (TWI)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Heung et al., 2017
شاخص همواری بالای پشته با درجه تفکیک متعدد Multi-Resolution Ridge Top Flatness Index (MrRTF)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Mosleh et al., 2016
ارتفاع نرمال Normal _ Height(NH)	مدل رقومی ارتفاع Digital Elevation Model (DEM)	Kim et al., 2019
شاخص پوشش گیاهی نرمال شده Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Landsat 8 satellite images	Roy et al., 2016
شاخص شورى Saline Index	تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Landsat 8 satellite images	Khan et al., 2005
شاخص اختلاف پوشش گیاهی Difference Vegetation Index (DVI)	تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Landsat 8 satellite images	Pu et al., 2008
شاخص رس Clay Index	تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ Landsat 8 satellite images	Gasmi et al., 2022



شکل ۲- برخی از متغیرهای کمکی مورد استفاده در مدل سازی (A) شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI), (B) MrVBF, (C) شاخص رس
Figure 2- Some auxiliary variables used in the modeling: A) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), B) MrVBF, C) Clay Index



شکل ۳- نمای کلی روش تحقیق در این مطالعه
Figure 3- Flowchart of the research method in this study

جدول ۲- طبقه بندی شاخص کاپا (Landis & Koch, 1977)

Table 2- Classification of the Kappa index (Landis & Koch, 1977)

توضیح Explanation	آماره کاپا Kappa values
عدم توافق No agreement	0 >
توافق ضعیف Slight agreement	0 – 0.20
عملکرد متوسط روبه پایین Moderate agreement	0.21 – 0.40
عملکرد متوسط Substantial agreement	0.41 – 0.60
عملکرد خوب Almost perfect agreement	0.61 - 0.80
عملکرد عالی Perfect agreement	0.81-1.00

جدول ۳- آمار توصیفی خصوصیات خاک منطقه مورد مطالعه

Table 3- Descriptive statistics of soil properties in the study area

خصوصیات خاک Soil properties	میانگین Mean	انحراف از معیار Standard deviation	میان Median	پیشینه Maximum	کمینه Minimum
سنگریزه Gravel (%)	9.71	15.31	2	84	0
نسبت جذب سدیم Sodium adsorption ratio (meq/l)	7.19	21.21	0	140.74	0
شیب Slope (%)	4.08	2.2	2.17	17.0	0
هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS/m)	4.45	15.19	0.83	124.2	0.17
گچ Gypsum (%)	0.86	3.39	1.1	29.05	0
کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)	12.11	7.60	10.42	42	1.1

تأثیر را در مدل سازی مکانی تحت کلاس تناسب اراضی برای محصول گندم آبی دارند. این سه شاخص که به ترتیب بیانگر همواری کف دره، بازتابش سطح و نمره رطوبت توپوگرافیک هستند، ارتباط بالایی داشته و می توانند در پیش بینی بهتر و دقیق تر عملکرد گندم آبی در منطقه مورد مطالعه نقش ایفا کنند و مدل سازی مکانی مفید ارائه دهند. سه شاخص NH، Valley_depth و m_catchmen کمترین تأثیر را در مدل سازی مکانی عملکرد گندم آبی دارند. این نتایج نشان می دهد که این سه شاخص احتمالاً اطلاعات کمتری درباره ویژگی های محیطی مهم برای رشد و عملکرد گندم آبی ارائه می دهند و اهمیت کمتری در مدل سازی دارند. در کل، این نتایج نشان می دهند که برای مدل سازی مکانی عملکرد گندم آبی، شاخص های مستخرج از مدل رقومی ارتفاع Diffuse، MrVBF و TWI اهمیت بیشتری دارند. اما شاخص های NH، Valley_depth و m_catchmen کمترین اهمیت را در مدل سازی دارند.

یونجه آبی: به منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرهای کمکی برای

نقشه پیش بینی کلاس های خاک بر اساس (شکل ۴) نشان داد که از مجموع ۳۱ فامیل خاک، بیشترین وسعت مربوط به فامیل خاک ۲۰ با ۱۴/۷ درصد که Fine-loamy, mixed, thermic Typic Calciexerepts می باشد و کمترین وسعت مربوط به فامیل خاک ۲۲ با ۰/۰۵ درصد که Fine-loamy, mixed, thermic Xeric Haplocalcids می باشد. همچنین برای اعتبارسنجی مدل جنگل تصادفی از ۳۰ درصد داده ها به عنوان داده های اعتبارسنجی استفاده شد. ضریب کاپای برآورد شده برابر ۰/۷۶ و دقت کلی ۰/۸۱ به دست آمدند. ضریب کاپای به دست آمده در رده تقریباً عالی می باشد (Landis & Koch, 1977) که بر پایه آن می توان گفت مدل قادر به یادگیری داده های آموزشی بوده و پیش بینی مطلوبی از کلاس های خاک انجام داده است.

تأثیر متغیرهای کمکی بر نقشه تحت کلاس تناسب اراضی

گندم آبی: سه شاخص Diffuse، MrVBF و TWI بیشترین

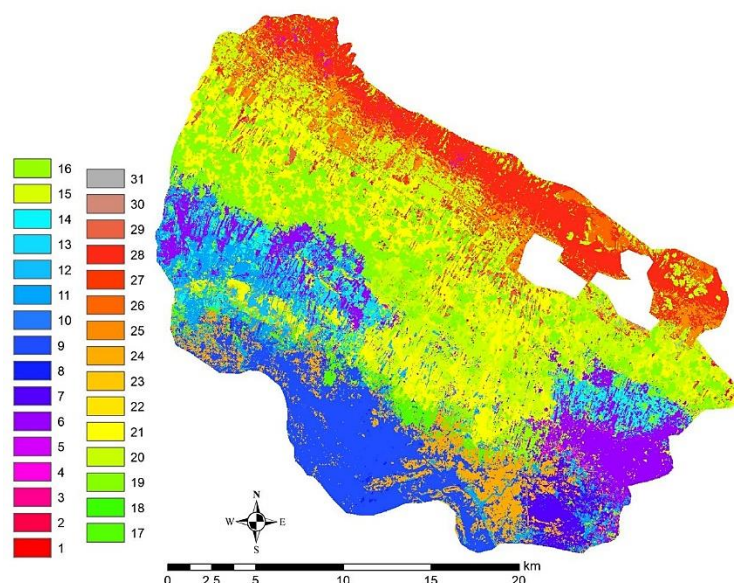
جو آبی: به منظور تعیین اهمیت نسبی متغیرهای کمکی برای ارزیابی تناسب تحت کلاس اراضی برای کشت گیاه جو آبی، مدل جنگل تصادفی مورد بررسی قرار گرفت نتایج حاکی از آن است که متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع Diffuse، SHt و MrVBF بیشترین تأثیر را در اجرای مدل سازی تحت کلاس تناسب اراضی جو آبی داشته‌اند. به عبارت دیگر، این متغیرها به طور معناداری بر روی عملکرد مدل در مدل سازی میزان تولید جو آبی تأثیرگذار بوده‌اند. از سوی دیگر، متغیرهای NH، MrRTF و m_catchmen کمترین تأثیر را در مدل سازی داشته‌اند.

ارزیابی تناسب اراضی برای کشت گیاه یونجه آبی، مدل جنگل تصادفی با استفاده سه متغیر MrVBF، Diffuse و TWI بیشترین تأثیر را در اجرای مدل سازی تحت کلاس تناسب اراضی برای محصول یونجه آبی داشتند، درحالی که Salin، NDVI و Famil کمترین تأثیر را داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که متغیرهای مستخرج از مدل رقومی ارتفاع MrVBF، Diffuse و TWI برای پیش‌بینی عملکرد یونجه آبی از اهمیت بالایی برخوردار هستند و متغیرهای NH، MrRTF، m_catchmen، Salin، NDVI و Famil کمترین تأثیر را در این مدل سازی دارند.

جدول ۴- خاک‌های شناسایی شده تا سطح فامیل در منطقه مورد مطالعه

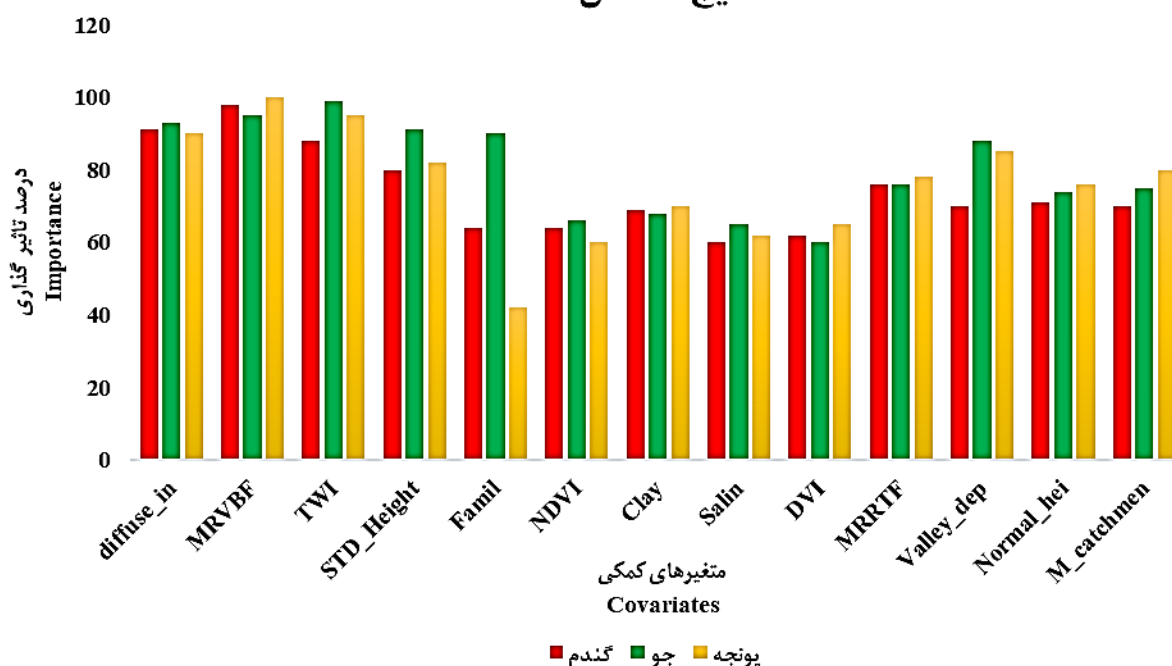
Table 4- Identified soil types up to family level in the study area

کد Cod	فامیل Famil	مساحت Area (hectares)	درصد فراوانی Frequency percentage
1	Coarse-loamy over fragmental, mixed, thermic Typic Haploxerepts	93	0.15
2	Coarse-loamy, mixed, thermic Typic Haploxerepts	313	0.52
3	Coarse-loamy, mixed, thermic Typic Calcixerepts	84	0.09
4	Coarse-loamy, mixed, thermic Xeric Haplocalcids	92	0.10
5	Fine, mixed, thermic Typic Calcixerepts	319	0.35
6	Fine, mixed, thermic Sodic Xeric Haplocalcids	4578	5.08
7	Fine, mixed, thermic Sodic Xeric Haplogypsis	1402	1.56
8	Fine, mixed, thermic Xeric Natrigypsis	41	0.05
9	Fine, mixed, thermic Gypsic Aquisalids	6407	7.11
10	Fine, mixed, thermic Gypsic Haplocambids	104	0.12
11	Fine, mixed, thermic Sodic Xeric Calcigypsis	3535	3.92
12	Fine, mixed, thermic Sodic Xeric Haplogypsis	671	0.74
13	Fine, mixed, thermic Xeric Calcigypsis	733	0.81
14	Fine, mixed, thermic Xeric Haplocalcids	1684	1.87
15	Fine, mixed, thermic Xeric Haplogypsis	113	0.13
16	Fine, mixed, thermic Xerofluventic Haplocambids	773	0.86
17	Fine, mixed, thermic, Typic Haplocambid	937	1.04
18	Fine-loamy over fragmental, mixed, thermic Typic Calcixerepts	183	0.20
19	Fine-loamy, mixed, thermic Fluventic Haploxerepts	6829	7.58
20	Fine-loamy, mixed, thermic Typic Calcixerepts	8838	9.81
21	Fine-loamy, mixed, thermic Typic Haploxerepts	8564	9.50
22	Fine-loamy, mixed, thermic Xeric Haplocalcids	32	0.04
23	Fine-loamy, mixed, thermic Xeric Haplocambids	86	0.09
24	Fine-loamy, mixed, thermic Xeric Haplogypsis	3428	3.80
25	Loamy- skeletal over fragmental, mixed, calcareous, thermic Typic Xerorthents	2843	3.15
26	Loamy-skeletal, mixed, calcareous, thermic Typic Xerorthents	550	0.61
27	Loamy-skeletal, mixed, thermic Fluventic Haploxerepts	80	0.09
28	Loamy-skeletal, mixed, thermic Typic Calcixerepts	6073	6.74
29	Loamy-skeletal, mixed, thermic Typic Xerofluvents	601	0.67
30	Loamy-skeletal, mixed, thermic Xeric Haplocalcids	55	0.06
31	Sandy over fragmental, mixed, calcareous, thermic Typic Xerorthents	78	0.09



شکل ۴- نقشه پیش‌بینی کلاس‌های خاک منطقه توسط مدل جنگل تصادفی در سطح فامیل خاک
Figure 4- Soil class prediction map of the study area using the Random Forest model at the soil family level

نتایج شاخص MDG



شکل ۵- نتایج شاخص MDA در روند مدل‌سازی نقشه رقومی خاک
Figure 5- Results of the MDA index in the process of modeling the digital soil map

تحت کلاس تناسب اراضی در (شکل ۵) نمودار تأثیرگذاری هر یک از شاخص‌ها برای تناسب این محصولات آورده شده است.

در نتیجه، این پژوهش نشان می‌دهد که متغیرهای Diffuse، TWI، MrVBF، SHt و شاخص‌های مرتبط با شوری خاک به‌عنوان متغیرهای مهم در مدل‌سازی و پیش‌بینی جو آبی معرفی می‌شوند. برای مقایسه بهتر میزان تأثیرگذاری این شاخص‌ها در تهیه نقشه

تعیین کلاس تناسب اقلیمی محصولات منطقه

بر اساس تحقیقات انجام شده در منطقه، برای تعیین کلاس تناسب اقلیمی محصولات گندم، جو و یونجه، به دو پارامتر اصلی توجه شده است: متوسط دمای دوره رشد و حداقل دمای سردترین ماه سال. برای گندم، متوسط دمای دوره رشد آن $24/3$ درجه سانتی‌گراد است و این محصول در کلاس تناسب اقلیمی S1 قرار می‌گیرد. جو نیز دارای متوسط دمای دوره رشد $24/5$ درجه سانتی‌گراد است و نیز در کلاس تناسب اقلیمی S1 قرار می‌گیرد. در مورد یونجه، حداقل دمای سردترین ماه سال برای آن ۸ درجه سانتی‌گراد است و نیز یونجه در کلاس تناسب اقلیمی S1 قرار دارد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده انجام محصولات گندم، جو و یونجه در کلاس تناسب اقلیمی S1 قرار می‌گیرند و هیچ محدودیت اقلیمی ندارند.

بررسی عملکرد مدل‌سازی برای محصولات مورد مطالعه در منطقه

ضریب کاپا، نقشه‌های به‌دست‌آمده برای محصولات گندم، یونجه و جو به ترتیب $0/81$ ، $0/84$ و $0/85$ بوده است. ضریب کاپا برای تمامی محصولات نشان‌دهنده توافق قابل قبول مدل با واقعیت است. این نتایج نشان می‌دهند که مدل جنگل تصادفی توانایی خوبی در

تشخیص و پیش‌بینی تحت کلاس تناسب اراضی برای این محصولات دارد. همچنین، دقت کلی نقشه‌های به‌دست‌آمده برای گندم، یونجه و جو به ترتیب $0/86$ ، $0/88$ و $0/89$ بوده است. دقت کلی برای تمامی نقشه‌های به‌دست‌آمده برای تحت کلاس‌های تناسب اراضی بسیار بالا است و نشان می‌دهد که مدل جنگل تصادفی توانسته است پیش‌بینی‌های صحیح و دقیقی را ارائه دهد. به‌طور کلی مدل جنگل تصادفی برای محصولات گندم، یونجه و جو در منطقه مورد مطالعه، عملکرد بسیار خوبی داشته است. این نتایج می‌توانند به کشاورزان و تصمیم‌گیران در انتخاب و برنامه‌ریزی محصولات مورد استفاده در این منطقه کمک کنند.

پهنه‌بندی مکانی تناسب سرزمین

نتایج (جدول ۵) که بیانگر فراوانی پهنه‌های مکانی کلاس و تحت کلاس‌های تناسب اراضی برای کشت محصولات گندم، جو و یونجه است. مجموع اراضی منطقه مورد مطالعه حدود ۶۱۰۰۰ هکتار است که این اراضی دارای بخش‌های مختلفی است در قسمت جنوبی به‌طور کلی شوری بالایی در اراضی مشاهده می‌شود و در قسمت‌های شمالی محدودیت عموماً مرتبط با بافت خاک است.

جدول ۵- درصد فراوانی تحت کلاس‌های ارزیابی اراضی برای محصولات گندم، جو و یونجه

Table 5- Frequency distribution of land evaluation classes for wheat, barley, and alfalfa crops

کلاس تناسب اراضی Land Suitability Class	یونجه Alfalfa		جو Barley		گندم Wheat	
	مساحت Area (hectares)	میانگین Frequency percentage	مساحت Area (hectares)	میانگین Frequency percentage	مساحت Area (hectares)	میانگین Frequency percentage
S1	23572	39.5	24262	40	19474	32.39
S2c	0	0	0	0	12192	20.28
S2n	114	0.18	233	0.38	2103	3.49
S2s	8529	14.18	9480	16	2540	4.22
S2t	1	0	0	0	32	0
S3c	4	0	4.5	0	0	0
S3n	209	0.34	582	1	109	0.18
S3s	12222	20.33	14913	25	12361	21
S3t	2867	5	1053	2	5	0
N	12420	21	9647	16.04	11300	19

مناسب S2n با محدودیت شوری و قلیائیت قرار دارد، در حالی که $3/49$ درصد از مساحت در کلاس نسبتاً مناسب S2s با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک قرار دارد. همچنین، $4/22$ درصد از مساحت منطقه در کلاس نسبتاً مناسب S2t با محدودیت توپوگرافی قرار می‌گیرد. به‌علاوه، $0/18$ درصد از مساحت منطقه در کلاس تناسب کم S3n با محدودیت شوری و قلیائیت قرار دارد و 21 درصد از مساحت

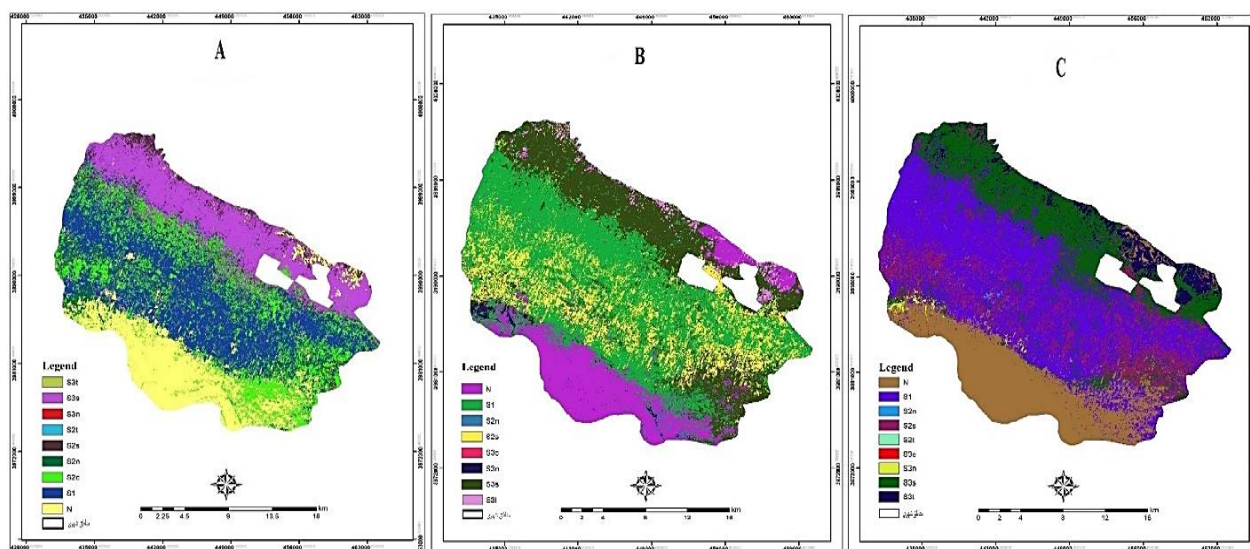
از کل مساحت منطقه مورد مطالعه برای کشت گندم به روش آبی، حدود $39/32$ درصد از کل مساحت منطقه در کلاس مناسب بدون محدودیت S1 قرار دارد. همچنین، درصدی بسیار کمی از مساحت منطقه به کلاس نسبتاً مناسب S2C با محدودیت اقلیمی تعلق دارد که حدوداً $0/3$ درصد از کل مساحت منطقه را شامل می‌شود. علاوه بر این، $28/20$ درصد از مساحت منطقه در کلاس نسبتاً

در کلاس‌های مختلف است. درصدی از مساحت منطقه، به‌طور مشخص، در کلاس مناسب بدون محدودیت S1 قرار دارد که حدوداً ۴۰ درصد از کل مساحت منطقه را شامل می‌شود. همچنین، درصدی معادل ۳۸ درصد از مساحت منطقه در کلاس نسبتاً مناسب S2n قرار دارد که محدودیت شوری و قلیائیت را نشان می‌دهد. همچنین، ۱۶ درصد از مساحت منطقه در کلاس نسبتاً مناسب S2s با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک قرار دارد. علاوه بر این، ۱ درصد از مساحت منطقه برای کشت جو آبی در کلاس تناسب کم S3n با محدودیت شوری و قلیائیت قرار دارد. همچنین، ۲۵ درصد از مساحت منطقه در کلاس تناسب کم S3s با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک قرار دارد. همچنین، ۲ درصد از منطقه در کلاس تناسب S3t با محدودیت توپوگرافی قرار دارد. در نهایت، ۱۶ درصد از مساحت منطقه در کلاس نامناسب N قرار می‌گیرد. همچنین (شکل ۶) نشان‌دهنده نقشه پراکنش تحت کلاس‌های تناسب اراضی برای سه محصول آبی گندم، جو و یونجه است.

در کلاس تناسب کم S3s با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک قرار می‌گیرد. در نهایت، ۱۹ درصد از مساحت منطقه در کلاس نامناسب N قرار دارد.

بر اساس نتایج دست آمده از تحلیل توزیع تحت کلاس‌های تناسب اراضی برای محصول یونجه، مشخص شد که ۳۹/۵٪ از کل مساحت منطقه در کلاس مناسب یا بدون محدودیت (S1) قرار دارد. همچنین، ۱۸/۱٪ از مساحت منطقه در کلاس نسبتاً مناسب با محدودیت شوری و قلیائیت (S2n) قرار داشت و ۱۴/۱۸٪ از مساحت در کلاس نسبتاً مناسب با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک (S2s) قرار گرفت. علاوه بر این، ۳۴/۰٪ از مساحت منطقه در کلاس تناسب کم با محدودیت شوری و قلیائیت (S3n) و ۲۰/۳۳٪ در کلاس تناسب کم با محدودیت خصوصیات فیزیکی خاک (S3s) قرار داشتند. همچنین، ۵٪ از منطقه در کلاس تناسب کم با محدودیت توپوگرافی (S3t) و ۲۱٪ از مساحت در کلاس نامناسب (N) قرار گرفتند.

در روش تناسب اراضی برای کشت جو با استفاده از آبیاری سطحی در منطقه مورد مطالعه، نتایج نشان می‌دهد که توزیع اراضی



شکل ۶- نقشه تحت کلاس تناسب اراضی با روش جنگل تصادفی در نرم‌افزار (A) گندم (B) جو (C) یونجه
Figure 6- Land suitability map using the Random Forest method in R software: A) Wheat, B) Barley, C) Alfalfa

و محصولات مورد نظر برقرار شد. با تهیه نقشه محصولات در منطقه، نتایج نشان داد که مدل برای گندم با ضریب کاپا ۰/۸۱ و دقت کلی ۰/۸۶، برای جو با ضریب کاپا ۰/۸۵ و دقت کلی ۰/۸۹ و برای یونجه با ضریب کاپا ۰/۸۴ و دقت کلی ۰/۸۸، پیش‌بینی قابل قبولی از نقشه محصولات در منطقه مورد مطالعه ارائه کرده است.

نتایج ارزیابی تناسب اراضی برای محصولات مورد نظر نشان داد که کلاس مناسب یا بدون محدودیت کلاس (S1) بیشترین درصد را در ابتدا به جو با ۴۰ درصد، سپس به یونجه با ۳۹/۵ درصد و در نهایت

نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی دقیق تناسب اراضی برای سه محصول، گندم، جو و یونجه تحت آبیاری بود. برای این منظور، داده‌هایی انتخاب شد که بیشترین محدودیت‌ها را برای این محصولات داشته باشند. به عبارت دیگر، برای گندم و جو، میانگین دمای دوره رشد و برای یونجه، حداقل دمای سردترین ماه سال در نظر گرفته شد. با استفاده از این داده‌ها، تطبیق بهتری بین نوع خاک

به گندم با ۳۲ درصد دارد. در شمال منطقه، بیشترین محدودیت‌ها مربوط به بافت و سنگریزه و در جنوب منطقه محدودیت‌هایی مانند آهک و گچ و شوری و قلیائیت وجود دارد. تحلیل پروفیل‌ها نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، ۳۱ نوع خاک مختلف در سطح فامیل وجود دارد. برای مدل‌سازی، از ۱۳ متغیر کمکی استفاده شد، که ۹ متغیر از مدل رقومی ارتفاع و ۴ متغیر از داده‌های سنجش از دور استخراج شده‌اند. با استفاده از مدل جنگل تصادفی و ترکیب نتایج تحلیل پروفیل و داده‌های کمکی، نقشه رقومی خاک منطقه تهیه شد. نتایج نشان داد که این مدل با ضریب کاپا ۰/۷۶ و دقت کلی ۰/۸۱ توانسته است طبقه‌بندی مناسبی از کلاس‌های خاک منطقه را ارائه

دهد.

براساس نقشه رقومی خاک، منطقه مورد مطالعه از ۲ نوع خاک انتی‌سول و اینسپتی سول تشکیل شده است. فامیل خاک-Fine mixed، loamy thermic Typic Calcixerepts بیشترین توزیع را در قسمت مرکزی منطقه دارد، در حالی که فامیل خاک-Loamy thermic Typic Calcixerepts mixed، skeletal thermic mixed، Fine خاک را در قسمت شمالی منطقه و فامیل خاک thermic mixed، Gypsic Aquisalsids بیشترین توزیع را در قسمت جنوبی منطقه دارد.

References

- Alhajj Ali, S., Tallou, A., Vivaldi, G.A., Camposeo, S., Ferrara, G., & Sanesi, G. (2024). Revitalization potential of marginal areas for sustainable rural development in the Puglia region, Southern Italy: Part I: A Review. *Agronomy*, 14(3), 431. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030431>
- Baroudy, A.A. E., Ali, A.M., Mohamed, E.S., Moghanm, F.S., Shokr, M.S., Savin, I., & Lasaponara, R. (2020). Modeling land suitability for rice crop using remote sensing and soil quality indicators: The case study of the Nile delta. *Sustainability*, 12(22), 9653. <https://doi.org/10.3390/su12229653>
- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Dang, K.B., Burkhard, B., Windhorst, W., & Müller, F. (2019). Application of a hybrid neural-fuzzy inference system for mapping crop suitability areas and predicting rice yields. *Environmental Modelling & Software*, 114, 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.015>
- Gasmi, A., Gomez, C., Chehbouni, A., Dhiba, D., & Elfil, H. (2022). Satellite multi-sensor data fusion for soil clay mapping based on the spectral index and spectral bands approaches. *Remote Sensing*, 14(5), 1103. <https://doi.org/10.3390/rs14051103>
- Guo, Z., Adhikari, K., Chellasamy, M., Greve, M.B., Owens, P.R., & Greve, M.H. (2019). Selection of terrain attributes and its scale dependency on soil organic carbon prediction. *Geoderma*, 340, 303-312. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.023>
- Heung, B., Hodul, M., & Schmidt, M.G., (2017). Comparing the use of training data derived from legacy soil pits and soil survey polygons for mapping soil classes. *Geoderma*, 290, 51-68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.12.001>
- Khamoshi, S.E., Sarmadian, F., & Keshavarzi, A. (2018). Digital soil mapping using random forests model in Abyek, Qazvin province. *Iranian Journal of Soil Research*, 32(3), 393-402. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2018.117828>
- Khan, N.M., Rastokuev, V.V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management*, 77(1-3), 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.038>
- Kidd, D., Webb, M., Malone, B., Minasny, B., & McBratney, A. (2015). Digital soil assessment of agricultural suitability, versatility and capital in Tasmania, Australia. *Geoderma Regional*, 6, 7-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2015.08.005>
- Kılıç, O.M., Ersayın, K., Gunal, H., Khalofah, A., & Alsubeie, M.S. (2022). Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for wheat (*Triticum aestivum*) cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2634-2644. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.050>
- Kim, Y.J., Nam, B.H., & Youn, H. (2019). Sinkhole detection and characterization using LiDAR-derived DEM with logistic regression. *Remote Sensing*, 11(13), 1592. <https://doi.org/10.3390/rs11131592>
- Landis, J.R., & Koch, G.G. (1977). A one-way components of variance model for categorical data. *Biometrics*, 671-679. <https://doi.org/10.2307/2529465>
- Martinez Martinez, L.J., & Muñoz, N.C. (2016). Digital elevation models to improve soil mapping in mountainous areas: case study in Colombia. *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*, 377-388. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19159-1_22
- McBratney, A.B., Santos, M.M., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)

16. Mosleh, Z., Salehi, M.H., Jafari, A., Borujeni, I.E., & Mehnatkesh, A. (2016). The effectiveness of digital soil mapping to predict soil properties over low-relief areas. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5204-8>
17. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., & Rahmani, A. (2020). Modelling and prediction of soil classes using boosting regression tree and random forests machine learning algorithms in some part of Qazvin plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(10), 2525-2538. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280905.668198>
18. Mousavi, S.R., Sarmadian, F., Omid, M., & Bogaert, P. (2022). Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran. *Measurement*, 201, 111706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>
19. Pu, R., Gong, P., & Yu, Q. (2008). Comparative analysis of EO-1 ALI and Hyperion, and Landsat ETM+ data for mapping forest crown closure and leaf area index. *Sensors*, 8(6), 3744-3766. <https://doi.org/10.3390/s8063744>
20. Roell, Y.E., Beucher, A., Møller, P.G., Greve, M.B., & Greve, M.H. (2020). Comparing a random forest based prediction of winter wheat yield to historical yield potential. *Agronomy*, 10(3), 395. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030395>
21. Roy, D.P., Kovalskyy, V., Zhang, H.K., Vermote, E.F., Yan, L., Kumar, S.S., & Egorov, A. (2016). Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote sensing of Environment*, 185, 57-70. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.024>
22. Sarmadian, F., Teimuri Bardiani, S., Rahmani Siyalarz, S., & Sayadi, N. (2022). GIS-based land capability and suitability evaluation for irrigated agriculture (Case study: Karaj-Qazvin). *Water and Soil*, 36(4), 459-475. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76330.1159>
23. Soil Survey Staff. (2022). *Keys to Soil Taxonomy*, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service.
24. Taghizadeh-Mehrjardi, R., Nabiollahi, K., Rasoli, L., Kerry, R., & Scholten, T. (2020). Land suitability assessment and agricultural production sustainability using machine learning models. *Agronomy*, 10(4), 573. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040573>
25. Teng, H., Rossel, R.A.V., Shi, Z., & Behrens, T. (2018). Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. *Catena*, 164, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.015>
26. Waruru, B.K., Shepherd, K.D., Ndegwa, G.M., & Sila, A.M. (2016). Estimation of wet aggregation indices using soil properties and diffuse reflectance near infrared spectroscopy: An application of classification and regression tree analysis. *Biosystems Engineering*, 152, 148-164. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.003>

Release of Zinc, Manganese and Magnesium from Mg-Zn-Mn-Al-LDH: Effect of Malic Acid and Divalent to Trivalent Cation Ratios in Mineral Structure

Z. Movahedi Rad¹, M. Hamidpour^{2*}

1- Lecturer, Department of Agriculture, Payame Noor University, Tehran, Iran

2- Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran

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

Received: 18-06-2024
Revised: 19-07-2024
Accepted: 04-08-2024
Available Online: 04-08-2024

How to cite this article:

Movahedi Rad, Z., & Hamidpour, M. (2024). Release of zinc, manganese and magnesium from Mg-Zn-Mn-Al-LDH: Effect of malic acid and divalent to trivalent cation ratios in mineral structure. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 495-509. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.88568.1414>

Introduction

Recently, layered double hydroxides (LDHs) have attracted significant attention due to their various applications, particularly as slow-release fertilizers for essential plant nutrients. Several studies have reported the release of nitrate and phosphorus from LDHs. Additionally, micronutrients such as zinc (Zn), copper (Cu), and manganese (Mn) can be structurally incorporated into the metal hydroxide layers. Recent research indicates that LDHs have considerable potential for releasing these micronutrients. However, further studies are needed to enhance our understanding of the mechanisms and reactions of LDHs under different conditions. Currently, there is a lack of information regarding the divalent (M^{2+}) to trivalent cation (M^{3+}) ratios in LDHs and the influence of malic acid on the release of Zn, Mn, and magnesium (Mg) from these compounds. This study aimed to investigate the effects of malic acid and the ratio of M^{2+}/M^{3+} on the kinetics release of Zn, Mn and Mg from Mg-Zn-Mn-Al-LDH intercalated with nitrate.

Materials and Methods

All chemicals used in this study including malic acid ($C_4H_6O_5$), KCl, $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$, $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ and $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ were of analytical grades, purchased from Chem-Lab or Merck Chemical Corporations. The solutions were made with the decarbonated ultrapure water (electrical resistivity = 18 MΩcm). The LDHs were synthesized by co-precipitation method at constant pH=9.2-9.6. Two types of LDHs were synthesized with varying the $M^{2+}(Zn+Mn+Mg)/M^{3+}(Al)$ 3:1 and 4:1 in the precursor solution while being stirred vigorously in a nitrogen atmosphere. The pH was kept at 9.2-9.6 by adding volumes of 3 M NaOH. The crystals of LDH were ripened in the mixture for 2 h and after that, the precipitates were centrifuged at 3000 rpm for 20 min and washed several times with distilled water and placed in an oven at 70 °C for 8 h to dry. The chemical composition of the synthesized LDHs was determined by furnace atomic absorption spectrophotometry (SavantAA, GBC) after acid digestion. The physical, chemical, and morphological characteristics of the LDHs were determined using X-ray diffraction analysis (Panalytical x Pert ProX-ray diffractometer), Fe-SEM (Sigma VP), FT-IR (Nicolet iS10 spectrometer), and BET (BELSORP Mini II) techniques. A batch study was done to determine the effect of different ratios of M^{2+}/M^{3+} in LDHs and the effect of malic acid on release of Zn, Mn,



©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.2024.88568.1414>

and Mg from LDH (3:1) and LDH (4:1). Briefly, 0.01 g of synthesized LDH were put in a centrifuge tube mixed with 10 ml background electrolyte (KCl 0.01 M) and 1.25 mM malic acid in initial pH=6-7 and constant temperature (25 ± 0.5 °C). Blank samples (without ligand) were also considered. Suspensions were shaken at periods ranging from 5 to 720 min agitation (180 rpm). Then, the supernatant solution was separated using a centrifuge at a speed of 4000 rpm for 20 min. Zn, Mn, and Mg concentrations in supernatants solutions were determined by graphite furnace atomic absorption spectrophotometry. The effect of pH in the range of 5 to 10 on the release of Zn, Mn, and Mg from LDH was also studied. Two equations (pseudo-second-order and Elovich) were used to fit the kinetics data.

Results and Discussion

The results showed that the calculated molar ratio of divalent cation to trivalent cation was similar to their molar ratio in the solution prepared for the synthesis of LDH samples. The X-ray diffraction patterns of LDH (3:1) and LDH (4:1) samples showed the existence of strong and sharp peaks for 003 and 006 plates. Accordingly, the reflections of the 003 and 006 plates revealed the layered structure of the synthesized LDH materials. Two bands of FT-IR spectrums around 3480 and 1620 cm^{-1} for all synthesized LDH materials designated stretching vibrations of the O-H group of hydroxide layers and the interlayer water molecules. The sharp characteristic band around 1382 cm^{-1} in LDH (3:1) and band around 1354 cm^{-1} in LDH (4:1) was attributed to the antisymmetric stretching mode of nitrate anion in LDH. The specific surface area of LDH (3:1) and LDH (4:1) were 5.50 m^2g^{-1} and 16.54 m^2g^{-1} respectively. The average pore diameters in LDH (3:1) and LDH (4:1) were 1.92 nm and 2.55 nm, respectively. Time-dependent cumulative release of Zn, Mn, and Mg from LDH (3:1) and LDH (4:1) in the presence and absence of malic acid was investigated. Time-dependent Zn, Mn, and Mg release from LDH (3:1) and LDH (4:1) was accelerated in the presence of malic acid. The Zn, Mn, and Mg release from the LDHs was likely to be separated into two stages. In the initial stage from 0 to 60 min, the release rate of Zn, Mn, and Mg was rapid, then either remained constant or slightly enhanced during 60–720 min. In this research, among the non-linear models used to determine the release kinetics of Zn, Mn, and Mg, the result with the highest R^2 values was chosen. The R^2 values were 0.91–0.99, 0.93–0.99, 0.93–0.99, 0.89–0.99, and 0.55–0.86 for pseudo-first-order, pseudo-second-order, Elovich, power function, and parabolic diffusion, respectively. So, pseudo-second-order and Elovich models were used to analyze kinetic data. The amounts of release of Zn, Mn and Mg were higher from LDH (4:1) than from LDH (3:1) because of greater specific surface area, volume, and pore diameter in LDH (4:1). A comparison of metal release versus time profiles exhibited that dissolution was greatly dependent on the pH.

Conclusion

The results of this research indicated that the release of Zn, Mn, and Mg from layered double hydroxides (LDHs) was influenced by factors such as time, ligand, solution pH, and the type of LDH. According to the kinetics models fitted to the experimental data, the release rate of Zn, Mn, and Mg from LDH (4:1) was higher than that from LDH (3:1). In both types of LDHs, the presence of malic acid significantly increased both the rate and amount of Zn, Mn, and Mg release compared to the absence of malic acid. While this study demonstrated that varying the ratios of divalent to trivalent cations can influence the amount and rate of Zn and Mn release, further greenhouse studies are required to confirm the effectiveness of LDH as a slow-release fertilizer in calcareous soils.

Keywords: Layered double hydroxide, Organic acid, Micronutrients, Slow-release fertilizer

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۴۹۵-۵۰۹

رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از Mg-Zn-Mn-Al-LDH: اثر اسید مالیک و نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی

زهره موحدی راد^۱ - محسن حمیدپور^{۲*} 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

چکیده

امروزه هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای به‌عنوان گروهی از ترکیبات با قابلیت رهاسازی تدریجی عناصر غذایی به‌طور ویژه مورد توجه قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر Mg-Zn-Mn-Al-LDH با آنیون بین لایه‌ای نترات و نسبت‌های متفاوت کاتیون دو به سه ظرفیتی در دو نوع LDH (3:1) و LDH (4:1) به روش هم‌رسوبی تهیه و ویژگی‌های آن مورد مطالعه قرار گرفت. به‌منظور بررسی اثرات نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی موجود در ساختار LDH، اسید مالیک و pH، در رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم در زمان‌های مختلف مطالعات پیمانه‌ای انجام گرفت. مدل‌های مختلف سینتیکی جهت بررسی سینتیک رهاسازی عناصر استفاده شد. اثر اسید مالیک بر رهاسازی عناصر از هر دو نوع LDH قابل توجه بوده به‌طوری‌که سرعت اولیه رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) به‌ترتیب افزایش ۳/۷۵، ۸۲/۴ و ۰/۶ برابری نسبت به شرایط بدون حضور اسید مالیک داشت و سرعت اولیه رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) به‌ترتیب ۸۴/۷۵، ۳/۳۹ و ۱/۶۴ برابر نسبت به شاهد افزایش یافت. همچنین رهاسازی عناصر در زمان‌های اولیه با سرعت بیشتر و بعد از زمان ۶۰ دقیقه با سرعت کمتر انجام گرفت. از بین مدل‌های مختلف سینتیکی بررسی شده، مدل‌های شبه مرتبه دوم و الووچ به‌دلیل دارا بودن ضریب تبیین بالاتر و خطای استاندارد کمتر جهت برازش بر داده‌های سینتیکی انتخاب گردیدند. بررسی اثر تغییرات pH محیط (محدوده بین ۵ تا ۱۰) بر رهاسازی عناصر نشان داد که کاهش pH بر روند رهاسازی عناصر از این ترکیبات اثر افزایشی داشته و در تمام شرایط مورد مطالعه رهاسازی عناصر از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) بیشتر بود. به‌طور کلی با توجه به پتانسیل مناسب رهاسازی عناصر روی و منگنز از این ترکیبات، ممکن است LDHs به‌عنوان کود کندهای روی و منگنز برای گیاهان مفید باشند که بررسی آن نیازمند مطالعه در حضور گیاه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، عناصر کم‌مصرف، کود کندها، هیدروکسید دوگانه لایه‌ای

مقدمه

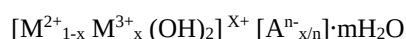
فراهمی عناصر غذایی ضروری کم‌مصرف نقش بسیار مهمی در تولید محصولات غذایی دارد و استفاده از کودهای کندها می‌تواند

تأثیر قابل توجهی در تغذیه محصولات داشته باشد (Everaert et al., 2023). روی و منگنز از عناصر ضروری کم‌مصرف برای رشد و توسعه گیاهان بوده و نقش‌های فیزیولوژیک مهمی را بر عهده دارند (Khoshgotarmanesh, 2007). کمبود روی و منگنز در گیاهان گسترش زیادی در سرتاسر جهان دارد و معمولاً در خاک‌های آهکی مشاهده می‌شود. زیرا در این خاک‌ها به‌دلیل رسوب این عناصر فراهمی زیستی آن‌ها کم است. علاوه بر این در خاک‌های درشت بافت، خاک‌های اسیدی و خاک‌هایی که آبشویی شدید داشته‌اند نیز مقدار روی و منگنز کل و مقادیر قابل جذب آن‌ها کم می‌باشد

۱- مربی گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
 ۲- استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران
 * - نویسنده مسئول
 (Email: m.hamidpour@vru.ac.ir)

(Mortvedt et al., 1991). از این رو به منظور رفع کمبود عناصر غذایی کم مصرف در خاک، استفاده از منابع حاوی این عناصر به عنوان یک استراتژی پایدار برای افزایش عملکرد و کیفیت غذایی محصولات توصیه می شود.

امروزه به منظور افزایش کارایی کودهای شیمیایی و کاهش اثرات مخرب آن ها برای خاک و محیط زیست و تولید منابع جدید کودی، تلاش های زیادی صورت گرفته است. در همین راستا استفاده از هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای (LDHs) به عنوان منبع تأمین عناصر پر مصرف (Everaert et al., 2016) و کم مصرف مورد نیاز گیاه در حال بررسی می باشد (Atafar et al., 2010). هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای گروهی از ترکیبات غیرسیلیکاتی دارای صفحات شبه پروسایت ($Mg(OH)_2$) با بار مثبت هستند که در آن کاتیون دو ظرفیتی در هشت وجهی به وسیله گروه های هیدروکسیل هم آرایشی شده است. جانشینی هم شکل در این ورقه توسط کاتیون سه ظرفیتی انجام می شود. بار مثبت ایجاد شده با ورود آنیون بین لایه ای خنثی می گردد (Zumreoglu-Karan et al., 2012). فرمول کلی هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای به شکل زیر است:



که در آن M^{2+} و M^{3+} به ترتیب کاتیون های فلزی دو ظرفیتی و سه ظرفیتی، A^{n-} آنیون n ظرفیتی و x برابر نسبت مولی کاتیون سه ظرفیتی به دو ظرفیتی ($M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$) است (Kameliya et al., 2023). حلالیت هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای به عواملی از جمله pH محیط، قدرت پیوند کاتیون ها، نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی موجود در ساختار آن ها (Everaert et al., 2016) و نوع آنیون بین لایه ای بستگی دارد (Imran et al., 2016).

هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای دارای کارایی بسیار متنوع بوده و در چند سال اخیر توجه بیشتری به استفاده از این ترکیبات در برطرف نمودن آلودگی های زیست محیطی و همچنین به عنوان ترکیبات کندرها شده است. در چندین مطالعه کارایی هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای به عنوان منابع کندرهای عناصر فسفر (Hatami et al., 2018)، نیترات (Berber et al., 2014; Halajnia et al., 2013)، روی (Shafigh et al., 2019) و بور (De Castro et al., 2020) بررسی شده است. اخیراً روی و همکاران (Roy et al., 2023) گزارش کردند که LDH پتانسیل بالایی در تأمین عنصر غذایی فسفر برای گیاهان دارند.

هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای دارای پایداری نسبی در pH بالاتر از ۷/۵ (شرایط متداول در خاک های مناطق خشک) می باشند. اما این پایداری تحت تأثیر عوامل مختلف موجود در خاک قرار می

گیرد که در این ارتباط می توان به اثر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم اشاره نمود (Essington, 2004). منشأ اسیدهای آلی در خاک از ترشحات ریشه گیاهان (Oburger et al., 2009)، فعالیت ریزجانداران به ویژه باکتری ها و قارچ های آزاد و میکوریز و همچنین تجزیه مواد آلی می باشد. مقدار اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم بین ۰/۵ تا ۵ درصد مقدار کل کربن محلول خاک گزارش شده است (Strobel, 2001; Van Hees et al., 2000). اسیدهای آلی خاک نقش های مهم زیادی در ریزوسفر به عهده دارند که تعدادی از این نقش ها به توانایی آن ها در ایجاد کمپلکس های محلول با کاتیون های فلزی ارتباط دارد. عمده تأیون های دی کربوکسیلیک و تری کربوکسیلیک اسیدهای آلی در فرآیند تشکیل این کمپلکس ها (مالات، سترات و اگزالات) مؤثرند. این امر منجر به آزادسازی عناصر غذایی و رشد و توسعه گیاهان می شود (Adeleke et al., 2017). مطالعات متعددی در ارتباط با نقش اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم در انحلال کانی های خاک و رهاسازی عناصر انجام شده است. در پژوهشی اثر اسیدهای آلی در رهاسازی فسفر از سنگ های فسفات بررسی و گزارش شد که آزادسازی فسفر تحت تأثیر ساختار شیمیایی، نوع و موقعیت گروه های عاملی لیگاندها و غلظت اسیدهای آلی قرار دارد (Kpombekou et al., 1994). اعتمادیان و همکاران (Etemadian et al., 2018) در بررسی کاربرد اسیدهای آلی سیتریک، اگزالیک و استیک و برخی اسیدهای معدنی بر رهاسازی عناصر غذایی در خاک های آهکی بیان نمودند که اثر تیمارهای مختلف این اسیدها بر استخراج عناصر فسفر و پتاسیم از خاک ها معنی دار شده و اسیدهای آلی در آزادسازی عناصر فلزی کم مصرف تأثیر بیشتری نسبت به اسیدهای معدنی دارند. شفیق و همکاران (Shafigh et al., 2019) به بررسی آزادسازی روی از هیدروکسیدهای دوگانه لایه ای با آنیون بین لایه ای نیترات، فسفات و کربنات تحت تأثیر اسیدهای آلی پرداخته و گزارش کردند روند رهاسازی روی در حضور اسیدهای آلی تسریع شد. حاتمی و فتوت (Hatami & Fotovat, 2023) در کاربرد LDHs ZnMnAl به عنوان ترکیبی برای رهاسازی بور، روی و منگنز در محیط شبیه سازی شده محلول خاک نشان دادند کاربرد اسیدهای آلی باعث افزایش حلالیت LDH، افزایش و جذب بور و همچنین افزایش رهاسازی روی و منگنز در مقایسه با نیترات پتاسیم گردید.

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر رهاسازی عناصر از این ترکیبات، نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی در ساختار آن هاست که می توان از آن برای کاربردهای ویژه استفاده نمود (Everaert et al., 2016). این نسبت نه تنها پایداری LDH را تعیین می کند، بلکه به طور مستقیم بر ظرفیت تبادل آنیونی LDH تأثیر دارد. نتایج اوررت و همکاران (Everaert et al., 2016) نشان داد که پایداری LDH با کاهش نسبت فلز دو ظرفیتی به سه ظرفیتی افزایش می یابد، زیرا افزایش بار

طیف‌سنجی مادون قرمز (FT-IR) و سطح ویژه با دستگاه اندازه‌گیری سطح ویژه (BET) استفاده گردید.

برای بررسی سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید مالیک، تکنیک مطالعه پیمانه ای^۲ مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که مقدار ۱۰ میلی گرم از هر دو نوع LDH توزین و به‌طور جداگانه به لوله‌های فالكون حاوی ۱۰ میلی لیتر الکترولیت زمینه ۰/۰۱ مولار کلرید پتاسیم در حضور و عدم حضور اسید مالیک با غلظت ۱/۲۵ میلی مولار با pH اولیه ۶-۷ و در دو تکرار اضافه گردید. سوسپانسیون‌ها در دوره‌های زمانی ۵، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۷۲۰ دقیقه تکان داده شده و سپس به‌وسیله سانتریفیوژ با سرعت ۴۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه محلول زلال رویی از بخش جامد جدا گردید. غلظت روی، منگنز و منیزیم به‌وسیله دستگاه طیف‌سنج اتمی (SavantAA, GBC) اندازه‌گیری شد.

به‌منظور بررسی اثر تغییرات pH بر رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) مقدار ۱۰ میلی گرم از هر دو نوع LDH توزین و به لوله‌های فالكون حاوی ۱۰ میلی لیتر الکترولیت زمینه ۰/۰۱ مولار کلرید پتاسیم در pH ۵ تا ۱۰ و در دو تکرار اضافه گردید و سوسپانسیون‌ها به مدت ۸ ساعت تکان داده شدند. جهت تنظیم pH اولیه از ۵ تا ۱۰ از نتایج پیش آزمون و با استفاده از مقادیر معینی اسید و باز تعیین گردید. مابقی مراحل کار مشابه آزمایش مربوط به بررسی اثر اسید مالیک بود.

برای برازش مدل‌های سینتیکی بر داده‌های رهاسازی تجمعی عناصر روی، منگنز و منیزیم از معادله‌های شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، الووچ ساده شده، تابع توانی و پخشیدگی پارابولیکی به‌صورت رگرسیون غیر خطی در محیط نرم‌افزار DataFit9 استفاده شد. در نهایت معادله شبه مرتبه دوم و الووچ که در بین معادلات دارای بالاترین ضریب تبیین (R^2) و کمترین خطای استاندارد (SE)، که فرمول محاسبه آن در ذیل آمده است، بودند جهت پیش‌بینی سینتیک رهاسازی عناصر انتخاب گردیدند و نمودارها با استفاده از نرم‌افزار Excel رسم گردید.

$$SE = \sum_{n=1}^N (\hat{r}_n - r_n)^2$$

در این معادله $\hat{r}_n$ به ترتیب میانگین مقدار عنصر رهاسده اندازه‌گیری شده (واقعی) و میانگین مقدار عنصر برآورد شده توسط مدل در زمان t می‌باشند (Wang & Lu, 2018).

جدول ۱ شکل ریاضی مدل‌های مورد استفاده را نمایش می‌دهد (Shafigh et al., 2019).

مثبت منجر به افزایش ظرفیت تبادل آنیونی و ایجاد پیوند قوی‌تر بین لایه‌های هیدروکسید و آنیون‌های بین لایه‌ای می‌شود.

با وجود مطالعات متعدد انجام شده در مورد LDHs، اطلاعاتی کمی در مورد آزادسازی عناصر روی و منگنز از LDHs حاوی نیترات بین لایه‌ای، با نسبت‌های کاتیون دو به سه ظرفیتی متفاوت تحت تأثیر اسیدهای آلی با وزن مولکولی کم وجود دارد. بنابراین هدف از تحقیق حاضر، مقایسه آزادسازی روی و منگنز از دو نوع LDH (3:1) و LDH (4:1) تحت تأثیر اسید مالیک در زمان‌های متفاوت و همچنین بررسی روند آزادسازی این عناصر از این ترکیبات در pH های مختلف می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور ساخت ترکیب Mg-Zn-Mn-Al(III)-LDH با آنیون بین لایه‌ای نیترات و با نسبت‌های کاتیون دو به سه ظرفیتی سه به یک و چهار به یک (به ترتیب LDH (3:1) و LDH (4:1)) از روش هم‌رسوبی^۱ نیترات روی ($Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$)، نیترات منگنز ($Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$)، نیترات منیزیم ($Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$) و نیترات آلومینیوم ($Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$) در pH ثابت ۹/۲-۹/۶ و اتمسفر نیتروژن بر اساس روش تغییر یافته اورارت و همکاران استفاده شد (Everaert et al., 2016). نمک‌های حاوی کاتیون دو ظرفیتی جهت ساخت LDH (3:1) و LDH (4:1) در غلظت‌های به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۸ مولار و نمک حاوی کاتیون سه ظرفیتی جهت ساخت LDH (3:1) و LDH (4:1) در غلظت‌های به ترتیب ۰/۷۵ و ۰/۶ مولار استفاده گردید. سپس رسوبات تشکیل شده به مدت ۲ ساعت جهت طی شدن مرحله پیرشدگی^۲ به حال خود رها شده و بعد از آن رسوبات سانتریفیوژ شده و چندین مرتبه با آب مقطر دوبار تقطیر شستشو داده شد و در مرحله بعد در آون در دمای ۷۰ درجه سلسیوس به مدت ۸ ساعت خشک شدند. (Everaert et al., 2016).

پس از ساخت LDH به‌منظور اندازه‌گیری عناصر فلزی LDH مقدار ۵۰ میلی گرم از دو نوع LDH توزین و در بالن حجمی ۵۰ میلی لیتر با ۱۰ میلی لیتر اسید کلریدریک یک مولار حل شده و با آب مقطر دوبار تقطیر به حجم رسانیده شد. مقدار عناصر فلزی تشکیل دهنده (آلومینیوم، روی، منگنز و منیزیم) با دستگاه طیف‌سنج اتمی مجهز به کوره گرافیت (Savant AA, GBC) اندازه‌گیری شد. به‌منظور بررسی وضعیت ساختار بلوری از پراش پرتو ایکس (XRD)، نوع پیوند با

1- Co-precipitation

2- Ripened

نتایج و بحث

ظرفیتی به کاتیون سه ظرفیتی محاسبه شده مشابه با نسبت مولی آن‌ها در محلول تهیه شده جهت سنتز نمونه‌های LDH است.

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های LDH سنتز شده را نشان می‌دهد. با توجه به داده‌های جدول نسبت مولی مناسب کاتیون دو

جدول ۱- مدل‌های سینتیکی مورد استفاده

Table 1- Used kinetic models

مدل‌های سینتیکی Kinetics model	معادلات Equations	پارامترها Parameters
شبه مرتبه اول Pseudo-first-order	$q_t = q_e (1 - e^{-k_1 t})$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g^{-1}) at time q_e = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان تعادل q_e = the amount of released elements (mg g^{-1}) at equilibrium time K_1 = ثابت سرعت معادله سینتیکی شبه مرتبه اول K_1 = rate constant of pseudo-first order
شبه مرتبه دوم Pseudo-second-order	$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t}$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g^{-1}) at time q_e = مقدار عنصر آزاد شده (میلی گرم بر گرم) در زمان تعادل q_e = the amount of released elements (mg g^{-1}) at equilibrium time k_2 = ثابت سرعت معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم (گرم بر میلی گرم در دقیقه) k_2 = rate constant of pseudo-second-order kinetic equation ($\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$) $h = k_2 q_e^2$ = مقدار رهاسازی اولیه (میلی گرم بر گرم در دقیقه) h = the initial release rate value ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$)
تابع توانی Power function	$q_t = at^b$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g^{-1}) at time a و b = ثابت‌های معادله تابع توانی a and b = constant of power function
پخشیدگی پارابولیک Parabolic diffusion	$q_t = Rt^{\frac{1}{2}} + C$	R = ثابت سرعت معادله سینتیکی پخشیدگی پارابولیک (میلی گرم بر گرم در دقیقه) R = the rate constant of the parabolic diffusion kinetic equation ($\text{mg g}^{-1} \text{min}^{-1}$) C = عرض از مبدا معادله پخشیدگی پارابولیک C = Parabolic diffusion equation y-intercept
الوویچ Elovich	$q_t = \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln t$	t = زمان تعادل (دقیقه) t = Equilibrium time (min) q_t = مقدار عنصر رها شده (میلی گرم بر گرم) در زمان q_t = the amount of released elements (mg g^{-1}) at time α و β = ثابت‌های معادله الوویچ α and β = constant of Elovich

جدول ۲- ترکیب شیمیایی LDH (3:1) و LDH (4:1)

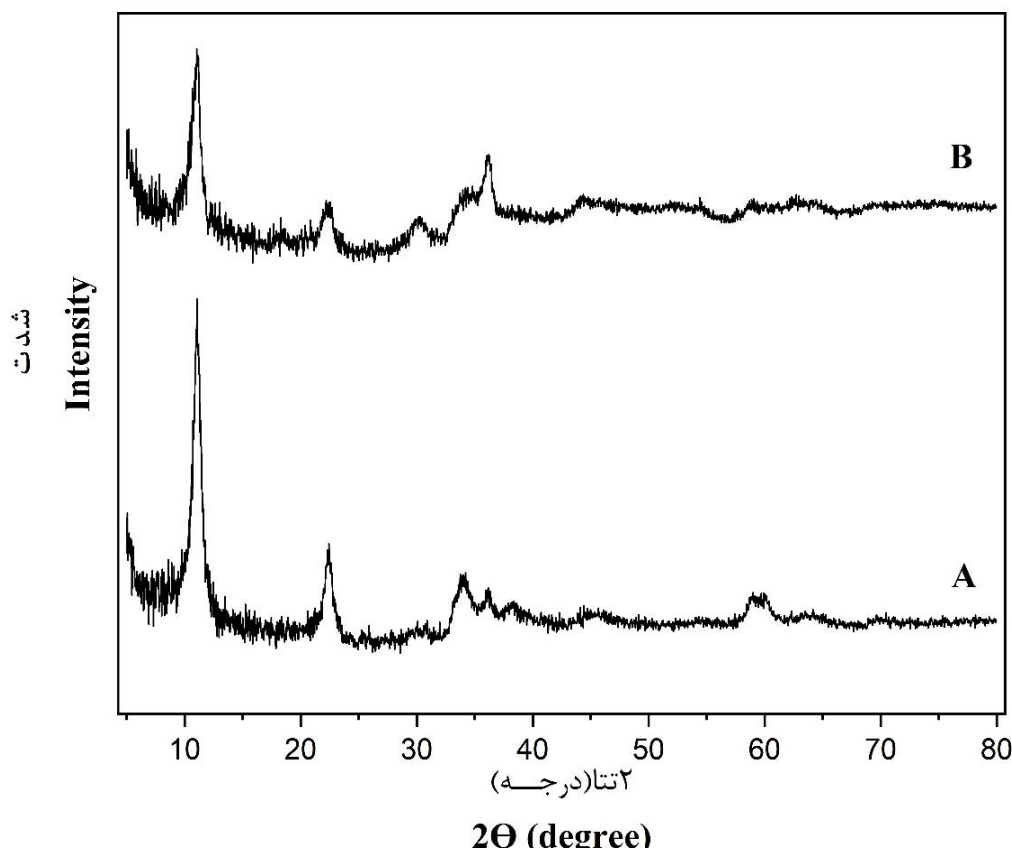
Table 2- Chemical composition of LDH (3:1) and LDH (4:1)

نوع LDH LDH Type	روی Zn (%)	منیزیم Mg (%)	منگنز Mn (%)	آلومینیوم Al (%)	نسبت مولی کاتیون دو به سه ظرفیتی Mole ratio of $M^{2+}:M^{3+}$
LDH(3:1)	34.535	7.815	30.146	5.185	3.175
LDH(4:1)	27.15	2.48	22.14	3.89	4.20

بین لایه‌ای و تأیید کننده ساختار مناسب این ترکیب می‌باشد. شفیق و همکاران (Shafigh et al., 2019) و حاتمی و همکاران (Hatami et al., 2018) پیک مربوط به عدد موجی 1380 cm^{-1} را به ارتعاشات کششی N-O مرتبط دانستند. نتایج حاصل از طیف‌سنجی مادون قرمز LDH (4:1) نیز مشابه LDH (3:1) مؤید وجود گروه‌های هیدروکسیل ساختمانی و مولکول‌های آب در فضای بین لایه‌ای بوده اما دو شانه شدن باریکه جذبی در محدوده 1380 cm^{-1} علاوه بر وجود نیترات نشان از حضور مقادیری ناخالصی کربنات در ترکیب است.

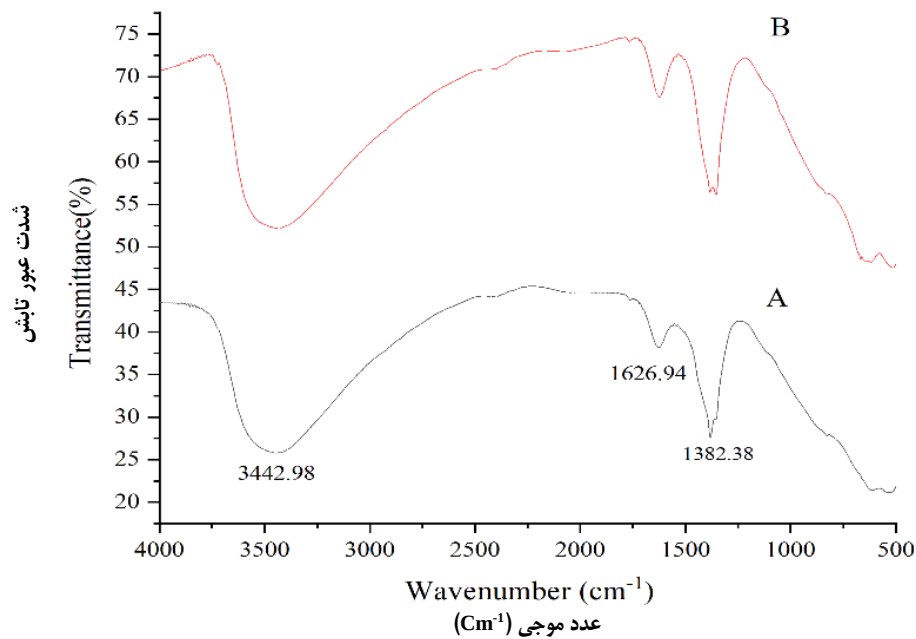
نتایج نشان داد که LDH (3:1) و LDH (4:1) به‌ترتیب دارای سطح ویژه ۵/۵ و ۱۶/۵۴ متر مربع در گرم و به‌طور میانگین دارای قطر منافذ ۱/۹۲ و ۲/۵۵ نانومتر بودند (جدول ۳). سطح ویژه هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای به روش و شرایط سنتز بستگی دارد و تا ۲۰۰ متر مربع در گزارش شده است (Geraud, 2006).

شکل ۱ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های LDH (3:1) و LDH (4:1) را نشان می‌دهد. وجود پیک‌های قوی و تیز برای صفحات ۰۰۳ و ۰۰۶ و پیک‌های پهن مربوط به دو تاهای بالاتر می‌باشد. این الگوی پراش پرتو ایکس از مشخصه‌های اصلی هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای بوده و همین امر سنتز موفقیت آمیز ترکیبات مدنظر را تأیید می‌نماید. نتایج به‌دست آمده در پژوهش ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016) نیز دلالت بر همین موضوع دارد. طیف FTIR مربوط به LDH مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. در LDH سنتز شده حضور باند جذبی در محدوده 3480 و 1620 بیانگر ارتعاشات کششی گروه‌های هیدروکسیل ساختمانی و مولکول‌های آب بین لایه‌ای است (Cheng et al., 2010; Hosni & Srasra, 2010). همچنین بررسی FTIR نشان از وجود باریکه جذبی در محدوده 1382 cm^{-1} در LDH (3:1) و حضور این باند در طیف، مربوط به ارتعاشات کششی آنیون نیترات در فضای



شکل ۱- الگوی پراش نگار پرتو ایکس LDH (3:1) (A) و LDH (4:1) (B)

Figure 1- XRD pattern of LDH (3:1) (A) and LDH (4:1) (B)



شکل ۲- طیف مادون قرمز (A) LDH (3:1) و (B) LDH (4:1)

Figure 2- FT-IR spectra of LDH (3:1) (A) and LDH (4:1) (B)

جدول ۳- سطح ویژه، حجم منافذ و میانگین قطر منافذ در LDH (3:1) و LDH (4:1)

Table 3- Specific area, pore volume and mean pore diameter in LDH (3:1) and LDH (4:1)

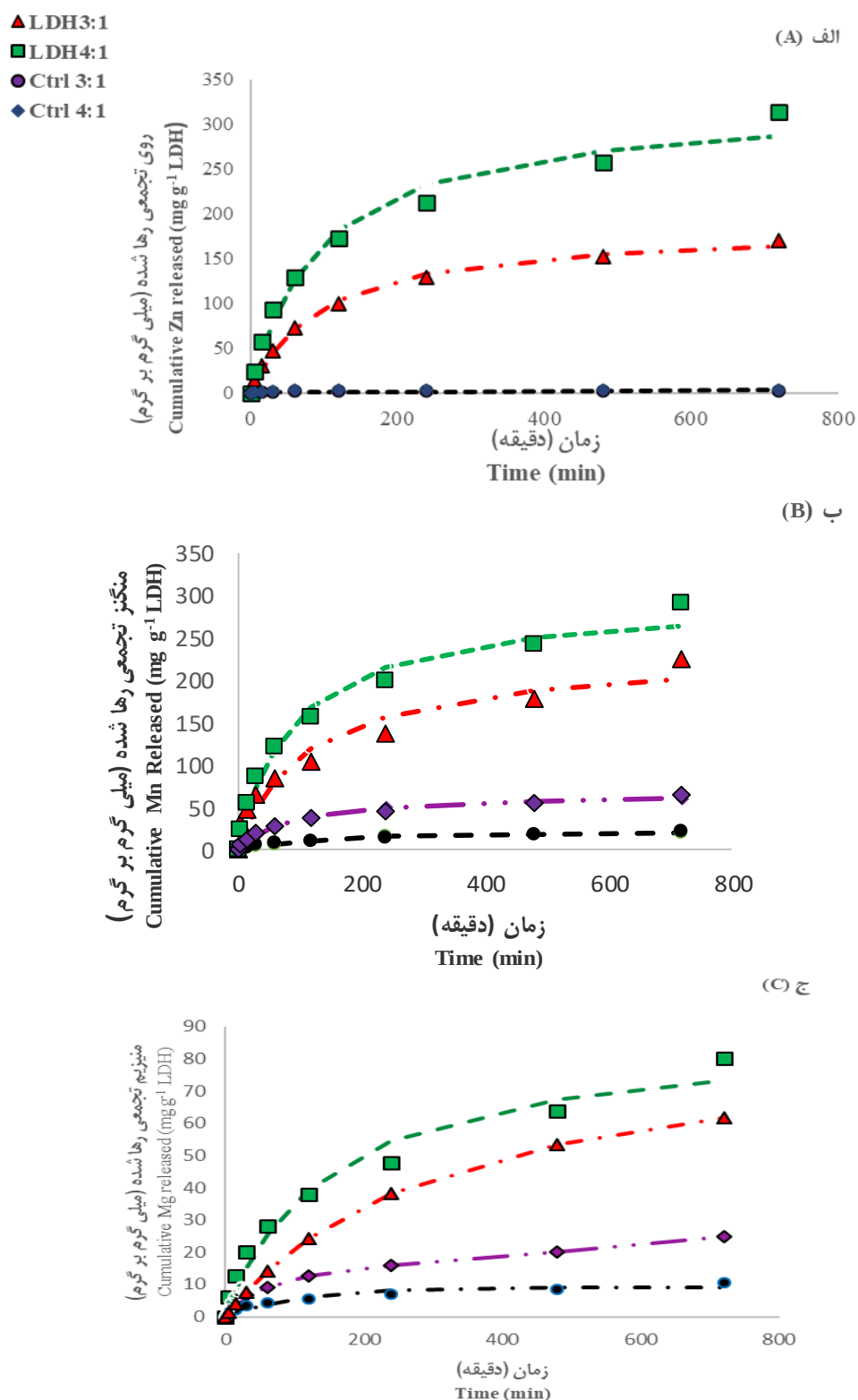
نوع LDH	میانگین قطر منافذ	حجم منافذ	سطح ویژه
LDH type	Mean pore diameter(nm)	Pore volume (mm ³ g ⁻¹)	Specific surface (m ² g ⁻¹)
LDH 3:1	1.92	3.11	5.50
LDH 4:1	2.55	10.01	16.54

(Shafigh et al., 2018) و عنصر روی در مطالعات شفیق و همکاران (Shafigh et al., 2019) مطابقت دارد.

در هر دو نوع LDH حضور اسید مالیک منجر به افزایش سرعت رهاسازی این عناصر نسبت به وضعیت شاهد گردید که این شرایط می‌تواند شبیه به آن‌چه در ریزوسفر و در حضور اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه گیاه اتفاق می‌افتد، فرض شود. این نتیجه با گزارش ساندرا لویز و همکاران مطابقت دارد (Sandra Lopez et al., 2017).

از بین مدل‌های غیر خطی مورد استفاده جهت نمایش سینتیک رهاسازی روی، منگنز و منیزیم مدل شبه مرتبه اول دارای R^2 بین ۰/۹۹ - ۰/۹۱، مدل شبه مرتبه دوم دارای R^2 بین ۰/۹۳ - ۰/۹۹، مدل الویج دارای R^2 بین ۰/۹۹ - ۰/۹۳، مدل تابع توانی دارای R^2 بین ۰/۸۹ - ۰/۹۹ و مدل پخشیدگی پارابولیکی دارای R^2 بین ۰/۸۶ - ۰/۵۵ بوده و در نتیجه مدل شبه مرتبه دوم و الویج به دلیل داشتن ضریب تبیین بالاتر و خطای استاندارد کمتر جهت تحلیل داده‌های سینتیکی مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ۴ پارامترهای سینتیکی مدل‌های الویج و شبه مرتبه دوم را نشان می‌دهد.

نتایج نشان داد که در حضور و در عدم حضور اسید مالیک، مقدار رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) بیشتر از LDH (3:1) بود (شکل ۳). رهاسازی در زمان‌های اولیه با شیب تندتر و در نتیجه با سرعت بیشتر انجام گرفت و پس از زمان ۶۰ دقیقه، رهاسازی با شیب ملایم و با سرعت کمتر صورت گرفت. به احتمال زیاد دلیل شدت بیشتر رهاسازی در زمان‌های اولیه، سرعت بالای جدا شدن عناصر از سطوح خارجی و مکان‌های لبه‌ای ترکیبات سنتز شده بوده است (Baranimotlagh & Gholami, 2013). علاوه بر این، بیشتر بودن مقدار رهاسازی در LDH (4:1) می‌تواند به بزرگ‌تر بودن سطح ویژه، حجم و قطر منافذ این ترکیب (جدول ۳) مرتبط باشد. به عبارت دیگر مقادیر بزرگ‌تر سطح ویژه سبب افزایش سطوح قابل دسترس در LDH (4:1) شده است. از سوی دیگر بیشتر بودن نسبت مولی کاتیون‌های دو ظرفیتی به سه ظرفیتی در LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) ناپایداری را افزایش داده است که این موضوع منجر به افزایش رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) شده است. این الگوی رهاسازی با الگوی رهاسازی عنصر بر و روی در مطالعات سنگنخوم (Songkhum et



شکل ۳- سینتیک رهاسازی روی (الف)، منگنز (ب) و منیزیم (ج) از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور و عدم حضور اسید مالیک با برازش مدل شبه مرتبه دوم بر داده‌های سینتیکی

Figure 3- The kinetics of Zn (a), Mn (b) and Mg(c) released from LDH (3:1) and LDH (4:1) in the absence (Ctrl) or presence of malic acid. Curves have been fitted as pseudo-second-order

جدول ۴- پارامترهای مدل الوویچ و شبه مرتبه دوم برازش داده شده بر داده‌های رهاسازی روی، منگنز و منیزیم در عدم حضور (Ctrl) و حضور اسید مالیک (MA)

Table 4- Elovich and pseudo-second-order models parameters fitted to the release data of Zn, Mn, and Mg from LDH in the absence (Ctrl) and presence of malic acid (MA)

	نوع LDH LDH type	نوع اسید آلی Organic acid type	معادله الویچ		معادله شبه مرتبه دوم					R ²	SE
			Elovich model		Pseudo second order model						
			α	β	R ²	SE	h (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	K ₂ (g mg ⁻¹ min ⁻¹)	q _e (mg g ⁻¹)		
روی Zinc	LDH 3:1	Ctrl	0.2	2.26	0.97	0.14	0.40	0.065	2.49	0.99	0.02
		MA	4.84	0.027	0.99	3.83	1.94	0.56×10 ⁻⁴	186.10	0.99	4.50
	LDH 4:1	Ctrl	0.26	1.36	0.94	0.33	0.04	0.007	3.95	0.99	0.24
		MA	11.55	0.01	0.97	17.89	3.43	0.32×10 ⁻⁴	324.26	0.98	16.21
منگنز Manganese	LDH 3:1	Ctrl	0.46	0.21	0.95	1.70	0.15	0.24×10 ⁻³	25.33	0.97	1.45
		MA	6.05	0.023	0.93	17.21	2.01	0.37×10 ⁻⁴	233.71	0.95	18.65
	LDH 4:1	Ctrl	2.50	0.08	0.97	3.66	0.74	0.16×10 ⁻³	67.98	0.98	3.28
		MA	11.02	0.02	0.98	15.39	3.25	0.36×10 ⁻⁴	299.01	0.98	13.73
منیزیم Magnesium	LDH 3:1	Ctrl	0.41	0.54	0.95	0.69	0.11	0.10×10 ⁻²	10.67	0.97	0.69
		MA	1.87	0.09	0.82	9.38	0.28	0.35×10 ⁻⁴	88.84	0.93	6.22
	LDH 4:1	Ctrl	0.59	0.19	0.97	1.31	0.22	0.30×10 ⁻³	26.65	0.98	1.32
		MA	1.77	0.06	0.96	5.57	0.58	0.76×10 ⁻⁴	88.17	0.97	5.00

۱۰۰ درصد بیشتر بود. علاوه بر این مقدار روی، منگنز و منیزیم تعادلی محاسبه شده (q_e) در LDH (3:1) به ترتیب ۷/۳۳، ۸/۲۳ و ۷/۳۳ برابر نسبت به شاهد افزایش داشت. در LDH (4:1) مقدار روی، منگنز و منیزیم تعادلی (q_e) به ترتیب ۸۱، ۳/۳۹ و ۲/۳ برابر نسبت به شاهد افزایش نشان داد. در مقایسه روی و منگنز تعادلی محاسبه شده (q_e) در دو نوع LDH این مقدار در LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) به ترتیب ۷۴ درصد و ۲۷ درصد افزایش نشان داد اما مقدار منیزیم تعادلی محاسبه شده تقریباً با هم برابر بود. به نظر می رسد در حضور H⁺ اسید و پروتونه شدن گروه‌های OH⁻ سطحی پروسه حلالیت افزایش یافته است (Sandra Lopez et al., 2017). برخی پژوهشگران از پارامترهای α و β در معادله الوویچ برای برآورد سرعت واکنش استفاده کرده‌اند. بر همین اساس کاهش در مقدار β و یا افزایش در مقدار α باعث افزایش سرعت واکنش خواهد شد (Sparks et al., 2022). با توجه به جدول ۴ مشخص شد در فرآیند رهاسازی عنصر روی، مقدار پارامتر α در حضور اسید مالیک در LDH (3:1) برابر با ۴/۸۴ و در LDH (4:1) برابر با ۱۱/۵۵ بوده است که بیشتر از مقدار آن در تیمار شاهد (به ترتیب ۰/۲ و ۰/۲۶) بود. همچنین بیشتر بودن مقدار α در رهاسازی روی از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) نشان‌دهنده افزایش سرعت رهاسازی اولیه

در این تحقیق از آنالیز رگرسیون غیر خطی برای برازش مدل‌های سینتیکی بر داده‌های آزادسازی وابسته به زمان عناصر روی، منگنز و منیزیم استفاده شد. با توجه به پارامترهای به دست آمده از مدل شبه مرتبه دوم (جدول ۴)، مقدار h که بیانگر نرخ رهاسازی اولیه عناصر است، برای هر سه عنصر روی، منیزیم و منگنز در LDH (4:1) بیشتر از LDH (3:1) بود. همچنین مقدار h تیمار شاهد در هر دو نوع LDH (بدون حضور اسید مالیک) کمتر از مقدار آن در حضور اسید مالیک بود. بر اساس نتایج، اسید مالیک اثر قابل توجهی بر پارامترهای مدل شبه مرتبه دوم داشت. به طوری که، سرعت اولیه آزادسازی روی (h) از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور این اسید آلی نسبت به شاهد به ترتیب ۳/۷۵ و ۸۴/۷۵ برابر افزایش یافت. سرعت اولیه رهاسازی منگنز (h) از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید مالیک نسبت به شاهد (عدم حضور اسید مالیک) به ترتیب ۱۲/۴ و ۳/۳۹ برابر بود. سرعت اولیه رهاسازی منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) در حضور اسید مالیک نسبت به شاهد به ترتیب ۰/۶ و ۱/۶۴ بود که این افزایش رهاسازی را می‌توان به تشکیل گونه‌های کمپلکس محلول مالات با روی، منگنز و منیزیم مرتبط دانست. نتایج نشان می‌دهد که سرعت اولیه رهاسازی عناصر روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) به ترتیب ۷۶، ۶۱ و

میزان حضور کاتیون‌های دو ظرفیتی نسبت به کاتیون سه ظرفیتی ثبات و پایداری LDH نیز تغییر می‌کند. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش مشابه نتایج اوررت و همکاران (Everaert et al., 2016) بوده که نشان‌دهنده کاهش پایداری LDH همراه با افزایش نسبت مولی فلز دو ظرفیتی به سه ظرفیتی در ساختار کانی است.

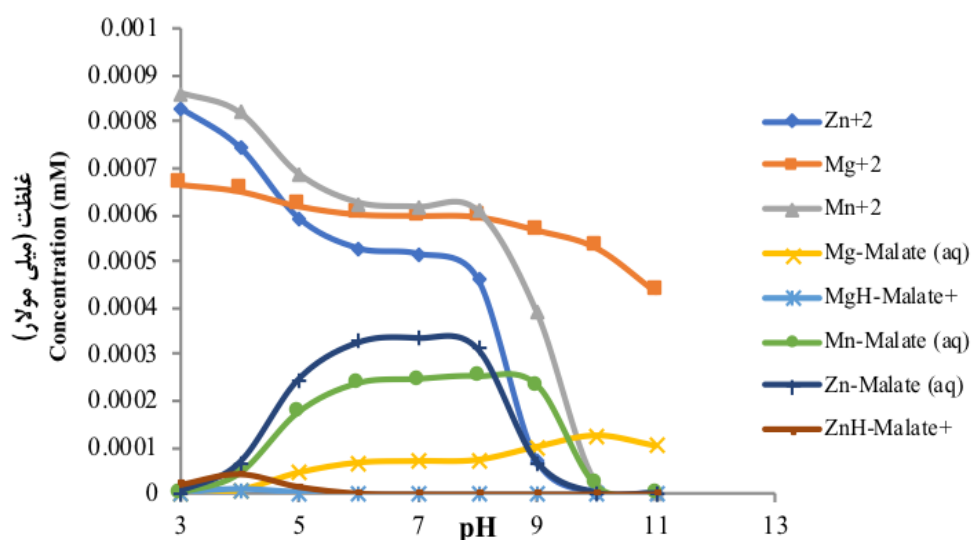
به‌منظور تفسیر اثر اسید مالیک بر انحلال کانی و آزادسازی عناصر ساختاری از نتایج گونه‌بندی به‌وسیله نرم‌افزار ویژوال مینتک استفاده شد (شکل ۴). نتایج گونه‌بندی نشان داد علاوه بر گونه‌های آزاد Mg^{2+} ، Mn^{2+} ، Zn^{2+} ، کمپلکس بدون بار، شامل Mg -Malate، Zn -Malate و Mn -Malate، از گونه‌های مهم روی، منیزیم و منگنز در محلول در حضور اسید مالیک می‌باشند. تشکیل گونه‌های ذکرشده ممکن است باعث افزایش غلظت روی، منیزیم و منگنز محلول در این محدوده از pH (۵-۷) و همچنین کاهش جذب سطحی مجدد عناصر رها شده نسبت به سیستم‌های بدون اسید مالیک شده باشند. گونه‌های کمپلکس بخش عمده‌ای از روی، منیزیم و منگنز موجود را به حالت محلول نگه داشتند. همچنین ایجاد کمپلکس‌های محلول با روی، منیزیم و منگنز موجب بر هم خوردن تعادل بار الکتریکی در کانی می‌شود و پیوند بین سایر اتم‌های موجود در ساختار LDH را تضعیف می‌کند. از آنجایی که تشکیل گونه‌های کمپلکس منجر به کاهش غلظت گونه‌های آزاد می‌گردد در نتیجه منجر به افزایش تخریب و افزایش رهاسازی عناصر می‌گردد.

رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (3:1) و LDH (4:1) تحت تأثیر تغییرات pH محیط، در شکل ۵ نشان داده شده است.

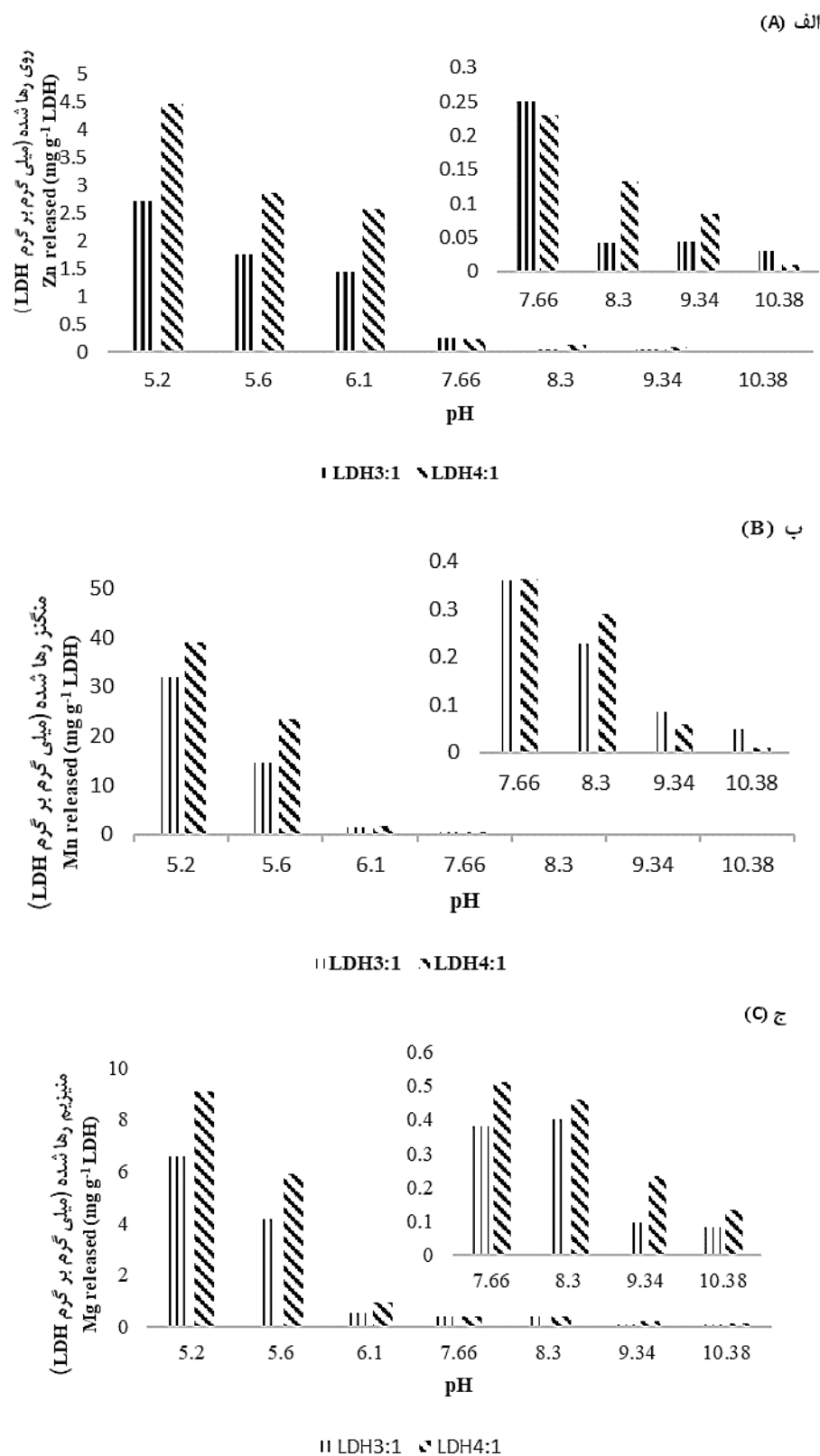
عنصر روی از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) است. بررسی مقدار α در رهاسازی منگنز و منیزیم از هر دو نوع LDH نتایج مشابهی را نشان داد به‌طوری‌که مقدار α در رهاسازی منگنز از LDH (3:1) و LDH (4:1) به‌ترتیب ۱۳ و ۴/۵ برابر شواهد مربوطه بود. برای منیزیم مقدار پارامتر α در LDH (3:1) و LDH (4:1) به‌ترتیب برابر با ۱/۸۷ و ۱/۷۷ بود که در مقایسه با تیمار شاهد افزایش حدود ۳/۵ برابری را نشان داد.

مقایسه α در رهاسازی منگنز در دو نوع LDH و بیشتر بودن مقدار آن در LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) نشان‌دهنده بیشتر بودن سرعت رهاسازی اولیه عنصر منگنز از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) است. شفیق و همکاران (Shafigh et al., 2019) در بررسی اثر اسیدهای آلی بر رهاسازی روی از LDH با آنیون بین لایه‌ای کربنات، فسفات و نیتрат نشان دادند که در حضور لیگاند آلی مقدار α افزایش یافت. در پژوهشی بر روی LDH با آنیون بین لایه ای نیترات و کربنات با کاتیون ساختاری روی و منیزیم مشخص شد که کاهش pH منجر به افزایش رهاسازی روی و منیزیم از LDH کربناته و نیتراته می‌گردد (Imran et al., 2016).

عوامل متعددی در پایداری ساختاری LDH مؤثرند که از آن جمله می‌توان به پایداری ساختاری میان آنیون‌های بین لایه‌ای و مولکول‌های آب، ثبات ساختاری لایه‌ها (Zhang et al., 2010)، طول پیوند، زاویه پیوند هیدروژنی، برهمکنش بار بین لایه‌ای پایه، آنیون‌های بین لایه‌ای (Wang et al., 2022)، قدرت پیوند کاتیون‌ها و نیز تغییر نسبت مولی کاتیون‌های دو به سه ظرفیتی اشاره نمود (Everaert et al., 2016). با تغییر نسبت مولی کاتیون‌ها و افزایش



شکل ۴- گونه‌بندی عناصر روی، منگنز و منیزیم در حضور اسید مالیک
Figure 4- Speciation of zinc, manganese and magnesium in the presence of malic acid



شکل ۵- رهاسازی روی (الف)، منگنز (ب) و منیزیم (ج) از LDH (3:1) و LDH (4:1) در pH های مختلف
Figure 5- Release of Zn(a), Mn(b) and Mg(c) from LDH (3:1) and LDH (4:1) at different pHs

۷ پایدار بوده اما با کاهش pH کاتیون‌های ساختاری وارد محلول شدند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که رهاسازی عناصر ساختاری (روی، منگنز و منیزیم) از LDH وابسته به زمان، لیگاند، نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی ساختاری و pH است. میزان رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDH (4:1) نسبت به LDH (3:1) بیشتر بود. در هر دو نوع LDH حضور اسید مالیک منجر به افزایش سرعت و مقدار رهاسازی روی، منگنز و منیزیم نسبت به وضعیت عدم حضور اسید مالیک گردید که این شرایط می‌تواند شبیه به آن‌چه در ریزوسفر و در حضور اسیدهای آلی ترشح شده از ریشه گیاه اتفاق می‌افتد، فرض شود. اگر چه نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان با ساخت این ترکیبات در نسبت‌های کاتیون دو ظرفیتی به سه ظرفیتی متفاوت، در مقدار و چگونگی آزادسازی عناصر کم مصرف تأثیر گذاشت ولی به منظور تأیید کارایی LDH به‌عنوان یک کود کندره‌های عناصر کم مصرف در خاک‌های آهکی و تأمین نیاز گیاهان به مطالعات گلخانه‌ای نیاز است.

همان‌گونه که در شکل مشخص است، رهاسازی عناصر از هر دو نوع LDH همراه با افزایش pH محیط کاهش چشمگیری داشته است. بر اساس نتایج این پژوهش با کاهش pH محلول از ۹ به ۵ مقدار روی رها شده از LDH (3:1) ۳۳ برابر، مقدار منگنز رها شده از آن ۱۶/۷ برابر و مقدار منیزیم رها شده از LDH (3:1) ۴/۶ برابر افزایش یافت. با کاهش pH محلول از ۹ به ۵ مقدار روی رها شده از LDH (4:1) ۲۹ برابر، مقدار منگنز رها شده از آن ۲۷ برابر و مقدار منیزیم رها شده از این نوع LDH ۳ برابر افزایش یافت.

به‌طور کلی در مقایسه اثر کاهش pH بر رهاسازی عناصر از دو نوع LDH با نسبت کاتیون دو به سه ظرفیتی متفاوت، روند مشابهی مشاهده شد. در تمام pH های مورد مطالعه رهاسازی روی، منگنز و منیزیم از LDHs با کاهش pH افزایش نشان داد. کاهش pH باعث افزایش مکان‌های فعال پروتونه شده در سطح می‌شود که در نهایت منجر به افزایش رهاسازی عناصر از LDH می‌گردد (Parello et al., 2010). ایمران و همکاران (Imran et al., 2016) در بررسی اثر pH بر رهاسازی روی بیان کردند نسبت روی رها شده از LDH با کاهش pH افزایش یافت. در نتایج این تحقیق گزارش شد رهاسازی کاتیون های ساختاری منیزیم و روی از Zn-Mg-Fe-LDH به‌طور قابل توجهی به pH وابسته است. به‌طوری‌که این ترکیبات در pH بالاتر از

References

- Adeleke, R., Nwangburuka, C., & Oboirien, B. (2017). Origins, roles and fate of organic acids in soils: A review. *South African Journal of Botany*, 108, 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.09.002>
- Atafar, Z., Mesdaghinia, A., Nouri, J., Homaei, M., Yunesian, M., Ahmadimoghaddam, M., & Mahvi, A.H. (2010). Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration. *Environmental Monitoring and Assessment*, 160(1-4), 83-89. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0659-x>
- Baranimotlagh, M., & Gholami, M. (2013). Time-Dependent zinc desorption in some calcareous soils of Iran. *Pedosphere*, 23(2), 185-193. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60006-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60006-5)
- Berber, M.R., Hafez, I.H., Minagawa, K., & Mori, T. (2014). A sustained controlled release formulation of soil nitrogen based on nitrate-layered double hydroxide nanoparticle material. *Journal of Soils and Sediments*, 14, 60-66. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0766-3>
- Cheng, X., Huang, X., Wang, X., & Sun, D. (2010). Influence of calcination on the adsorptive removal of phosphate by Zn-Al layered double hydroxides from excess sludge liquor. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1-3), 516-523. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.063>
- De Castro, G.F., Zotarelli, L., Mattiello, E.M., & Tronto, J. (2020). Alginate beads containing layered double hydroxide intercalated with borate: a potential slow-release boron fertilizer for application in sandy soils. *New Journal of Chemistry*, 44, 16965-16976. <https://doi.org/10.1039/D0NJ03571H>
- Essington, M.E., (2004). *Soil and Water Chemistry: An Integrative Approach*, 1st ed. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Etemadian, M., Hassani, A., Nourzadeh Haddad, M., & Hanifei, M. (2017). Effect of organic and inorganic acids on the release of nutrients in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(5), 73-91. (In Persian). <https://doi.org/10.22069/JWSC.2017.12528.2723>
- Everaert, M., Warrinnier, R., Baken, S., Gustafsson, J.P., De Vos, D., & Smolders, E. (2016). Phosphate-exchanged Mg-Al layered double hydroxides: A new slow release phosphate fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(8), 4280-4287. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00778>
- Everaert, M., Andelkovic, I.B., Smolders, E., Degryse, F., Baird, R., & Mclaughlin, M.J. (2023). Layered transition metal molybdates as new slow-release micronutrient fertilizer matrices for Zn, Cu, and Mo. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(20), 7859-7867. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00498>

11. Géraud, E., Prevot, V., & Leroux, F. (2006). Synthesis and characterization of macroporous MgAl LDH using polystyrene spheres as template. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 67(5-6), 903-908. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.01.002>
12. Halajnia, A., Oustan, S., Najafi, N., Khataee, A.R., & Lakzian, A. (2013). Adsorption-desorption characteristics of nitrate, phosphate and sulfate on Mg-Al layered double hydroxide. *Applied Clay Science*, 80, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.05.002>
13. Hatami, H., Fotovat, A., & Halajnia, A. (2018). Comparison of adsorption and desorption of phosphate on synthesized Zn-Al LDH by two methods in a simulated soil solution. *Applied Clay Science*, 152, 333-341. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.032>
14. Hatami, H., & Fotovat, A. (2023). Evaluation of Zn[Mn]-Al LDHs as matrices for release of B, Zn and Mn in a simulated soil solution. *Journal of Water and Soil*, 36(6), 761-771. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.73093.1109>
15. Hosni, K., & Srasra, E. (2010). Evaluation of phosphate removal from water by calcined-LDH synthesized from the dolomite. *Colloid Journal*, 72, 423-431. <https://doi.org/10.1134/S1061933X10030178>
16. Imran, A., López-Rayó, S., Magid, J., & Hansen, H.C.B. (2016). Dissolution kinetics of pyroaurite-type layered double hydroxide doped with Zn: perspectives for pH controlled micronutrient release. *Applied Clay Science*, 123, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.01>
17. Kameliya, J., Verma, A., Dutta, P., Arora, C., Vyas, S., & Varma, R.S. (2023). Layered double hydroxide materials: A Review on their preparation characterization and applications. *Inorganics*, 11(121), 1-22. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030121>
18. Khoshgoftarmanesh, A.H., (2007). *Principles of Plant Nutrition*. Isfahan University of Technology, Publishing Center. (In Persian)
19. Kpombrekou-a, K., & Tabatabai, M. (1994). Effect of organic acids on release of phosphorus from phosphate rocks. *Soil Science*, 158(6), 442-453.
20. López-Rayó, S., Imran, A., Bruun Hansen, H.C., Schjoerring, J.K., & Magid, J. (2017). Layered double hydroxides: Potential release-on-demand fertilizers for plant zinc nutrition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(40), 8779-8789. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02604>
21. Mortvedt, J.J., Cox, F.R., Shuman, L.M., & Welch, R.M. (1991). *Micronutrients in Agriculture*. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
22. Oburger, E., Kirk G.J.D., Wenzel, W.W., Puschenreter, M., & Jones, D.L. (2009). Interactive effects of organic acids in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(3), 449-457. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.10.034>
23. Parello, M.L., Rojas, R., & Giacomelli, C.E., (2010). Dissolution kinetics and mechanism of Mg-Al layered double hydroxides: a simple approach to describe drug release in acid media. *Journal of Colloid and Interface Science*, 351(1), 134-139. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.07.053>
24. Roy, A.S., de Beer, M., Pillai, S.K., & Ray, S.S. (2023). Application of Layered Double Hydroxides as a Slow-Release Phosphate Source: A comparison of hydroponic and soil systems. *ACS omega*, 8(17), 15017-15030. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07862>
25. Shafigh, M., Hamidpour, M., & Furrer, G. (2019). Zinc release from Zn-Mg-Fe (III)-LDH intercalated with nitrate, phosphate and carbonate: The effects of low molecular weight organic acids. *Applied Clay Science*, 170, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.01.016>
26. Songkhum, P., Wuttikhun, T., Chanlek, N., Khemthong, P., & Laohhasurayotin, K. (2018). Controlled release studies of boron and zinc from layered double hydroxides as the micronutrient hosts for agricultural application. *Applied Clay Science*, 152, 311-322. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.11.028>
27. Sparks, D.L., Singh, B., & Siebecker, M.G. (2022). *Environmental soil chemistry (Third edition)*. Elsevier.
28. Strobel, B.W. (2001). Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution—a review. *Geoderma*, 99(3-4), 169-198. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00102-6)
29. Van Hees, P.A.W., Lundstrom, U.S., & Giesler, R. (2000). Low molecular weight organic acids and their Al-complexes in soil solution-composition, distribution and seasonal variation in three podzolized soils. *Geoderma*, 94(2-4), 173-200. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00140-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00140-2)
30. Wang, W., & Lu, Y., (2018). Analysis of the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) in assessing rounding model. *IOP Conf. Series: Materials Science Engineering* 324, 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/324/1/012049>
31. Wang, X., Zhao, H., Chang, L., Yu, Z., Xiao, Z., Tang, S., & Huang, C. (2022). First-principles study on interlayer spacing and structure stability of NiAl-layered double hydroxides. *ACS Omega*, 7(43), 39169-39180. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05067>

32. Zhang, L., Li, F., Evans, D.G., & Duan, X. (2010). Cu– Zn–(Mn)–(Fe)– Al layered double hydroxides and their mixed metal oxides: physicochemical and catalytic properties in wet hydrogen peroxide oxidation of phenol. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(13), 5959-5968. <https://doi.org/10.1021/ie9019193>
33. Zhang, S., Kano, N., & Imaizumi, H. (2016). Synthesis and characterization of LDHs (layered double hydroxides) intercalated with EDTA (ethylenediaminetetracetic acid) or EDDS (N, N'-1, 2-ethanediylbis-1-aspartic acid). *Journal of Environmental Science and Engineering*, A(5), 549-558. <https://doi.org/10.17265/2162-5298/2016.11.001>
34. Zumreoglu-Karan, B., & Ay, A.N. (2012). Layered double hydroxides-multifunctional nanomaterials. *Chemical Papers*, 66(1), 1-10. <https://doi.org/10.2478/s11696-011-0100-8>

Evaluation of Potassium Status in the Soils of Oak Forests of Kohgilouye and Boyerahamad Province

Z. Barati¹, H.R. Owliaie^{1,2*}, E. Adhami², M. Najafi-Ghiri³

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor, Soil Science Department, Yasouj University, Yasouj, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: owliaie@yu.ac.ir)

3- Associate Professor, College of Agriculture and Natural Resources of Darab, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 04-08-2024
Revised: 07-09-2024
Accepted: 08-09-2024
Available Online: 08-09-2024

How to cite this article:

Barati, Z., Owliaie, H.R., Adhami, E., & Najafi-Ghiri, M. (2024). Evaluation of potassium status in the soils of oak forests of Kohgilouye and Boyerahamad Province. *Journal of Water and Soil*, 38(4), 511-524. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89206.1423>

Introduction

Zagros oak forest ecosystem is one of the largest forest ecosystems under destruction in Iran, which is of great importance in terms of water and soil protection. Moisture stress in recent years has caused the deterioration of these forests in a wide area. Iranian oak (*Quercus brantii* Lindlb.) is the main tree species forming these forests. Potassium (K) is considered to be the most important nutrient cation in terms of its quantity in plant tissue and its physiological and biochemical functions. Soil tests measure the quantity of a nutrient element that is extracted from soil by a particular extracting solution. Over the years, many different soil testing methods and extracting solutions were evaluated to identify a technique that provides the most reliable prediction of crop yield response to nutrient application. It was determined that some soil testing procedures are best suited for particular soil types and climatic regions. There has been no research on the general status of K in the soil of Zagros forests, related to oak trees. It is important to identify appropriate potassium (K) extractants for assessing the available K in these soils. Therefore, this research was conducted to achieve these objectives in several forest areas within the province.

Materials and Methods

Ten forest areas with dominant coverage of oak trees were selected in different parts of Kohgiluyeh and Boyerahmad Province. The physiochemical properties of the soil samples were determined based on standard methods. Soil pH, texture, electrical conductivity, calcium carbonate equivalent (CCE), organic carbon, and cation exchange capacity (CEC) were identified. The content of K present in different forms was determined by standard methods. Solution K was measured in the saturated extract. Exchangeable K was determined by extraction of 5 g soil sample with 20 mL 1 M NH₄OAc (pH 7) for 5 min. Nitric acid-extractable K was measured by extraction of 2.5 g soil sample with 30 mL of boiling 1.0 M HNO₃ for 1 h. Non-exchangeable K was calculated as the difference between HNO₃-extractable K and NH₄OAc-extractable K. Total K was determined following digestion of 0.5 g soil sample with 10 mL of 48% HF and 1 mL of aqua regia. The 12 extracting solutions were 1M NaCl, 2M NaCl, 0.01M CaCl₂, Morgan, AB-DTPA, 1M NH₄OAc, 0.25M NH₄OAc, 1M MgOAc, 1M NaOAc, 2M HCl, 0.1M HNO₃, and 0.025M H₂SO₄. The K content of leaf samples was determined in 1g of each sample. The samples were dried and then ashed in 450°C for 4 h. 2M HCl was used to digest the samples. Potassium was measured on all filtrated extracts using a Corning 405 flame photometer.

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.2024.89206.1423>

The soils are all calcareous (average of 42.9 and 44.7% CCE in surface and subsurface, respectively), with pH in the range of 7.0-7.8. The textural classes were sandy clay loam, clay loam, and clay. The range of soluble potassium is between 4.8 to 32.7 with an average of 15.4 mgkg⁻¹, exchangeable potassium from 65.1 to 364 (with an average of 247 mgkg⁻¹, non-exchangeable potassium from 106 to 876 with an average of 515 mg kg⁻¹, structural potassium was from 761 to 7322 with an average of 4026 mgkg⁻¹ and total potassium was from 1051 to 8110 with an average of 4493. Soluble, exchangeable, non-exchangeable, and structural potassium were 0.49, 9.6, 12.1, and 77.8%, of the total K, respectively. Among the 12 tested methods, 1.0 mol L⁻¹ NH₄OAC extracted the highest amount of K (mean 229.3 mg kg⁻¹, ranging 64.9-384.2 mg kg⁻¹) and 1.0 mol L⁻¹ MgOAC removed the lowest amount of K (mean 53.0 mg kg⁻¹, ranged 19.1-88.0 mg kg⁻¹). Correlation coefficients between K extracted by 12 extractants were positive and significant. The highest correlation between leaf K and soil-extracted K was observed with AB-DTPA, 0.25 M NH₄OAC, 1M NaCl, and Morgan-Wolfe extractants ($r = 0.60, 0.59, 0.56, \text{ and } 0.55$, respectively). The lowest correlation was found with 2 M HCl and 0.025 M H₂SO₄ ($r = 0.41 \text{ and } 0.44$, respectively). The potassium content in oak leaves, ranging from 0.65% to 1.18%, showed a significant correlation with exchangeable soil potassium. In 50% of the oak leaf samples, potassium levels were below the critical threshold of 1%. Overall, 1 M NaCl and 0.25 M NH₄OAC are recommended as potassium extractants due to their higher correlation with leaf K, simplicity of use, and cost-effectiveness

Conclusion

The results of this research showed that the range of the values of different forms of K in different parts of the province had a relatively large difference (6- and 8-times difference in exchangeable and non-exchangeable K values). The available forms of K in the western regions of the province, which receive less rainfall, were generally higher than in the more humid eastern regions. In 60% of the studied areas, the average exchangeable K was below the critical threshold of 250 واحد ها به یک شکل نوشته شود of soil. Similarly, the average leaf K content in 50% of the samples was below the critical level. Given the importance of K in the nutrition of oak trees and its role in helping them cope with environmental stress, particularly soil moisture deficiency, it is recommended to closely monitor K levels in the soils of the province's forested areas. Additionally, fertilization and foliar spraying of trees in certain forest areas should be considered.

Keywords: Ammonium acetate, Exchangeable potassium, Forest soil, Oak leaf

ارزیابی وضعیت پتاسیم در خاک جنگل‌های بلوط استان کهگیلویه و بویراحمد

زینب براتی^۱ - حمیدرضا اولیایی^{۱*} - ابراهیم ادهمی^۲ - مهدی نجفی قیری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

زیست‌بوم جنگل‌های بلوط زاگرس، از گسترده‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی در حال تخریب در ایران است که از نظر حفاظت آب و خاک و مسائل اقتصادی و اجتماعی اهمیت بالایی دارد. تنش‌های رطوبتی در سال‌های اخیر موجب رو به زوال رفتن این جنگل‌ها در گستره وسیعی شده‌است. مقدار و شکل عنصر پتاسیم در خاک با توجه به نقشی که این عنصر در مقاومت گیاه به تنش رطوبتی دارد، اهمیت زیادی دارد. این پژوهش به منظور بررسی وضعیت کلی پتاسیم در خاک و درختان بلوط در ۱۰ منطقه جنگلی در استان کهگیلویه و بویراحمد و معرفی عصاره‌گیرهای مناسب برای استخراج پتاسیم صورت گرفت. عصاره‌گیرهای مورد استفاده شامل کلرید سدیم ۱ و ۲ مولار، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، مورگان، بیکرنات آمونیوم-DTPA، استات آمونیوم ۱ و ۰/۲۵ مولار، استات سدیم ۱ مولار، استات منیزیم ۱ مولار، اسید نیتریک ۰/۱ مولار، اسید کلریدریک ۲ مولار و اسید سولفوریک ۰/۰۲۵ مولار بوده‌اند. میانگین پتاسیم محلول، تبدلی، غیرتبدلی، ساختمانی و کل به ترتیب ۱۵/۴، ۲۴۷، ۵۱۵، ۴۰۲۶ و ۴۴۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بوده است. پتاسیم استخراج شده توسط عصاره‌گیرهای DTPA، استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار و کلرید سدیم ۱ مولار، بیشترین همبستگی را با پتاسیم برگ بلوط نشان دادند. مقدار پتاسیم موجود در برگ بلوط (در دامنه ۰/۶۵ تا ۱/۱۸ درصد) همبستگی معناداری با پتاسیم تبدلی خاک نشان داد. نتایج نشان داد که میزان پتاسیم در نیمی از نمونه‌های گیاه کمتر از حد بحرانی بوده‌است. عصاره‌گیرهای کلریدسدیم ۱ مولار و استات‌آمونیم ۰/۲۵ مولار، به دلیل همبستگی بیشتر، سادگی روش و اقتصادی بودن جهت استخراج پتاسیم پیشنهاد می‌گردند.

واژه‌های کلیدی: استات آمونیوم، برگ بلوط، پتاسیم تبدلی، خاک جنگل

مقدمه

منطقه رویشی زاگرس با کارکردهای زیست‌محیطی فراوان، مهم‌ترین رویشگاه جنگلی کشور محسوب می‌شود که در سالیان دراز دستخوش دگرگونی و تحولات زیادی شده و در حال حاضر نیز به دلیل عوامل مختلف محیطی و غیرمحیطی با پدیده زوال درختان بلوط روبه‌رو شده است (Kooch Soltani et al., 2018). این زیست‌بوم از گسترده‌ترین اکوسیستم‌های جنگلی در حال تخریب در ایران است که از نظر حفاظت آب و خاک و مسائل اقتصادی و

اجتماعی اهمیت بالایی دارد. وسعت این جنگل‌ها به دلیل بهره‌برداری بی‌رویه با سرعت زیاد در حال کاهش است. براساس آمار گزارش شده، بین سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۳ نزدیک به ۲۵ درصد از جنگل‌های بلوط زاگرس نابود شدند (Ostakh et al., 2020). به نظر می‌رسد که کمبود بارندگی و تنش‌های خشکی سبب تشدید زوال درختان بلوط در این جنگل‌ها شده‌اند. براساس اطلاعات موجود، در حال حاضر گستره‌ای بیشتر از یک میلیون هکتار از جنگل‌های زاگرس به این پدیده مبتلاست (Pourhashemi & Sadeghi, 2020).

بلوط ایرانی (*Quercus brantii* Lindlb.) اصلی‌ترین گونه درختی تشکیل‌دهنده این جنگل‌ها می‌باشد. احیا و غنی‌سازی این جنگل‌ها با گونه بلوط که مهم‌ترین گونه چوبی تشکیل‌دهنده آن است، امری ضروری است. حاصلخیزی خاک‌های مناطق جنگلی علاوه بر مواد مادری و رسوبات اتمسفری به‌طور عمده از انباشت

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

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

۳- دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.89206.1423>

گزارش نمودند که پوشش درخت بلوط منجر به افزایش ۲/۲ برابری و ۱/۶ برابری پتاسیم تبدلی در دو عمق ۲۰-۰ و ۶۰-۴۰ سانتی متری شده است که ناشی از انتقال پتاسیم از لایه‌های عمقی به سطح خاک، توسط ریشه‌های عمقی درخت و انتقال به اندام هوایی و در نهایت افزوده شدن لاشبرگ‌ها به سطح خاک، عنوان شده است. جهانبازی و همکاران (Jahanbazi et al., 2022) در بررسی دلائل خشکیدگی درختان بلوط استان چهارمحال و بختیاری اظهار نمودند که نقش عناصر پتاسیم و فسفر در افزایش مقاومت درختان در برابر تنش‌های محیطی و توقف روند خشکیدگی تعیین کننده است. نامبردگان پیشنهاد کردند که برای جلوگیری از پیشرفت خشکیدگی، درختان درگیر با پدیده زوال با اولویت این عناصر، محلول پاشی شوند.

اگرچه خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک ممکن است حاوی مقادیر زیادی پتاسیم تبدلی و غیرتبدلی باشد، اما ممکن است میزان پتاسیم تبدلی در این مناطق به دلیل کشت متمرکز گیاه کاهش یابد (Jalali & Zarrabi, 2006). در آزمون خاک برای ارزیابی مقدار یک عنصر غذایی، انتخاب عصاره گیر مناسب و تعیین همبستگی بین مقدار عنصر غذایی و پاسخ‌های گیاهی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Corey, 1987). جهت تعیین پتاسیم قابل استفاده گیاه، روش‌های عصاره‌گیری با استفاده از کاتیون‌های جانشین شونده به کار می‌رود (Liu & Bates, 1990). پژوهش‌های صورت گرفته طی دهه‌های اخیر، بیانگر آن است که هیچ یک از روش‌های عصاره‌گیری پتاسیم برای شرایط متغیر مناسب نیستند، زیرا پتاسیم جذب شده از خاک طی دوران رشد گیاه، توسط تعدادی از عوامل فیزیکی، فیزیولوژیکی، شیمیایی و زیستی کنترل می‌شود (Kumari & Aiyer, 1993).

تعیین مقدار پتاسیم قابل جذب توسط گیاه در خاک امری ضروری است. ایجاد ارتباط بین مقدار عنصر استخراج شده توسط عصاره‌گیر با مقدار جذب آن عنصر توسط گیاه، یکی از مراحل اصلی آزمون خاک می‌باشد و شاخصی مهم در انتخاب روش آزمون خاک است (Beegle & Oravec, 1990). ملکوتی و غیبی (Malakouti & Gheibi, 1999) حد بحرانی ۲۵۰ میلی گرم بر کیلوگرم خاک (عصاره‌گیری شده با استات آمونیم یک نرمال) را برای خاک‌های زراعی و باغی ایران پیشنهاد دادند که با توجه به فقدان منابعی مرتبط با گونه‌های جنگلی، در این پژوهش همین مقدار مورد استناد قرار می‌گیرد. برای استخراج و اندازه‌گیری شکل‌های مختلف پتاسیم از عصاره‌گیرهای متفاوتی که توانایی‌های متفاوتی در استخراج این عنصر دارند، استفاده می‌شود. این عصاره‌گیرها به مشخصات فیزیکی و شیمیایی و کانی‌شناسی خاک‌ها مرتبط می‌باشند. با اندازه‌گیری مقدار پتاسیم قابل دسترس گیاه می‌توان درباره وضعیت این عنصر در خاک و نیاز به مصرف یا عدم مصرف کود تصمیم درستی اتخاذ کرد. با این روش می‌توان با عصاره‌گیری از خاک و مشخص نمودن مقدار کمبود عناصر، مدیریت

بقایای گیاهان یک ساله، برگ، میوه و شاخه‌های خشکیده بر روی خاک و تجمع آن در لایه حاصلخیز سطحی خاک تأمین می‌شود که در نهایت بستر بسیار مناسبی را برای تجدید حیات و رشد سریع آن و تأمین نیاز غذایی عناصر حیاتی در جنگل فراهم می‌کند. کاهش حاصلخیزی خاک موجب ضعف جدی درختان و کاهش توان آنها در برابر تنش‌های محیطی شده است (Jahanbazi et al., 2022; Owliaie et al., 2011).

پتاسیم نه تنها از نظر مقدار موجود در بافت‌های گیاهی، بلکه از نظر وظایف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی، مهمترین کاتیون غذایی محسوب می‌شود و بعد از نیتروژن، پرمصرف‌ترین عنصر مورد نیاز گیاه شناخته شده است. بسته به اندام گیاه، مرحله رشد، رقم، غلظت پتاسیم در خاک و شرایط اقلیمی ۱ تا ۱۰ درصد وزن خشک گیاه را تشکیل می‌دهد (Epstein & Bloom, 2005). مقدار پتاسیم در خاک‌های معدنی در محدوده ۳-۰/۴ درصد می‌باشد (Dovlati et al., 1999; Salih & Anderson, 2008). پتاسیم در فرآیندهای حیاتی متعددی از جمله فعالیت بیش از ۸۰ آنزیم، پایداری پهاش سلولی، تنظیم کربوهیدرات‌ها، باز و بسته شدن روزنه‌ها، تعادل کاتیون‌ها و آنیون‌ها و فرآیند انتقال الکترون در غشای سیتوپلاسمی شرکت می‌کند (Saykhul et al., 2013; Dovlati et al., 2008).

اشکال پتاسیم در خاک شامل محلول، تبدلی، تثبیت شده در بین لایه‌ها و ساختمانی می‌باشند. ریشه گیاهان، پتاسیم را از محلول خاک دریافت می‌نمایند. این ذخیره بسیار کم بوده و سایر اشکال از جمله تبدلی و غیرتبدلی و یا افزودن کود، در تأمین نیاز گیاه نقش دارند (Fathi et al., 2014). میزان پتاسیم محلول بسیار کم و حدود ۵ درصد از کل نیاز گیاه را در طی فصل رشد تأمین می‌کند. در مقابل، پتاسیم تبدلی حدود ۹۰ درصد پتاسیم قابل جذب گیاه را شامل می‌شود. پتاسیم تبدلی به میزان زیادی برای تعیین قابلیت استفاده پتاسیم خاک و تعیین نیاز کودی گیاهان زراعی به کار برده می‌شود (Dobermann et al., 1996). کمبود این عنصر در گیاه باعث از دست رفتن آب بافت گیاهی می‌شود و رشد شاخه‌ها و کارایی مصرف آب در گیاه را کاهش می‌دهد. از طرف دیگر تنش رطوبتی در خاک، پخشیدگی یون پتاسیم را در محلول خاک محدود نموده و مانع جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه می‌شود (Malakouti & Tabatabaei, 1999; Salih & Anderson, 2001).

محمدزاده و همکاران (Mohammadzadeh et al., 2019) تأثیر شدت‌های مختلف خشکیدگی را بر جذب عناصر در درختان بلوط ایرانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش شدت خشکیدگی، مقدار عناصر پتاسیم، منیزیم، کلسیم، فسفر، آهن، سدیم و نیتروژن در برگ درختان بلوط افزایش یافته است. اولیایی و همکاران (Owliaie et al., 2011) در مطالعه اثر سایه‌انداز درخت بلوط بر تغییر ویژگی‌های خاک در سه منطقه جنگلی بویراحمد

کشور دارد. بیش از دوسوم از وسعت استان کهگیلویه و بویراحمد را عرصه‌های جنگلی به خود اختصاص می‌دهد. تنش‌های رطوبتی به‌ویژه در سال‌های اخیر بر پایداری جنگل‌های زاگرس اثرات قابل‌ملاحظه‌ای داشته‌است. پتاسیم به‌عنوان یک عنصر کلیدی در تغذیه گیاهان و کنترل تنش‌های رطوبتی گیاهی نقش مهمی دارد. تاکنون پژوهشی پیرامون وضعیت کلی پتاسیم در خاک جنگل‌های زاگرس، مرتبط با مهمترین گونه درختی این جنگل‌ها (بلوط)، صورت نگرفته‌است. معرفی عصاره‌گیری که واجد شرایط مطلوب باشد، حائز اهمیت است. لذا این پژوهش به‌منظور دستیابی به اهداف یادشده در برخی مناطق جنگلی استان کهگیلویه و بویراحمد انجام گرفت.

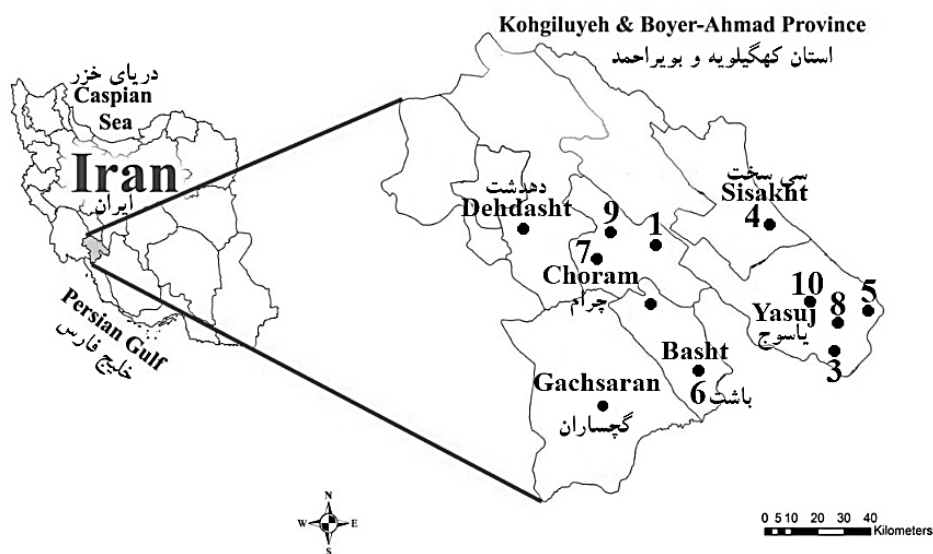
مواد و روش‌ها

ده منطقه جنگلی با پوشش غالب درختان بلوط، در بخش‌های مختلف استان کهگیلویه و بویراحمد (سردسیری و گرمسیری) انتخاب شدند (شکل ۱). جدول ۱ اطلاعات کلی مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ارتفاع مناطق مورد مطالعه در دامنه ۷۱۷ تا ۲۰۱۷ متر از سطح دریا (به‌ترتیب مناطق چرام و سی‌سخت) بوده است.

مناسب کودی را انجام داد (Simard & Zizka, 1994). استات-آمونیم یکی از متداول‌ترین عصاره‌گیرهای مورد استفاده است. با این وجود این روش در خاک‌هایی با مقدار نسبتاً قابل توجه پتاسیم غیرتبادلی، مناسب نبوده چراکه استات‌آمونیم، تنها شکل‌های محلول و تبادلی را استخراج می‌کند (Zarrabi & Jalali, 2008). عصاره‌گیر باید بخش‌های قابل دسترس عنصر درخاک را استخراج نموده و ضمناً روش پیشنهادی باید اقتصادی، سریع و قابلیت تکرارپذیری داشته باشد (Hosseinpur & Zarenia, 2012).

در ارزیابی عصاره‌گیرهای شیمیایی پتاسیم در برخی خاک‌های زیتون‌کاری استان فارس، ۱۲ عصاره‌گیر استفاده شدند و از بین آنها، کلریدسدیم ۲ مولار، استات‌آمونیم ۰/۲۵ مولار و استات‌سدیم ۱ مولار، بیشترین همبستگی را با پتاسیم برگ درختان زیتون داشتند (Ahrari et al., 2017). تأثیر نوع عصاره‌گیر بر استخراج میزان پتاسیم در ۶۲ نمونه خاک مزارع سراسر کشور بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار پتاسیم قابل جذب اندازه‌گیری شده، توسط عصاره‌گیرهای استات‌آمونیم و مهلیج-۳ فاقد اختلاف معنادار بوده اما این دو عصاره‌گیر با آمونیوم بی‌کربنات- DTPA اختلاف معنادار داشتند (Shahbazi et al., 2022).

زیست‌بوم جنگلی زاگرس نقش مهمی در حفظ منابع خاک و آب



شکل ۱- موقعیت نقاط برداشت نمونه در استان کهگیلویه و بویراحمد
Figure 1- Location of sampling points in Kohgiluyeh and Boyerahmad province

شدند. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک‌ها پس از هواخشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، به روش‌های استاندارد تعیین شدند. بافت خاک به روش هیدرومتر (Day, 1965)، پهاش گل اشباع توسط دستگاه پهاش سنج، قابلیت هدایت الکتریکی خاک در عصاره گل

از خاک زیر سایه‌انداز در چهار جهت و به فاصله نصف لبه تاج درخت تا تنه، از دو عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متری نمونه‌های خاک تهیه شدند. چهار نمونه به‌دست آمده اطراف هر درخت، مخلوط و از مجموع آن‌ها یک نمونه مرکب برداشت و به آزمایشگاه منتقل

در منابع گوناگون مورد استفاده قرار گرفته‌اند، در **جدول ۲** آمده است. برداشت نمونه برگ درختان بلوط در ماه‌های تیر، مرداد و شهریور از شاخه‌های یکسان انجام شد. نمونه‌های برگ، پس از شستشو با آب مقطر، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد در آون خشک و سپس آسیاب شدند. ۱ گرم از برگ آسیاب شده برداشته و در بوتله چینی ریخته و به مدت ۴ ساعت در کوره با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار داده شد. خاکستر باقی مانده، با استفاده از اسید کلریدریک ۱ نرمال عصاره‌گیری شد و سپس غلظت پتاسیم آنها به روش شعله‌سنجی اندازه‌گیری شد (Rowell, 1994). مقدار میانگین غلظت پتاسیم در سه ماه برداشت برای هر منطقه در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از این آزمایش با استفاده از نرم‌افزار SAS تجزیه و تحلیل آماری شدند.

اشباع توسط دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی، ظرفیت تبادل کاتیونی خاک با استات سدیم یک نرمال پ‌هاش ۸/۲ (Chapman, 1965)، کربنات کلسیم به روش تیتراسیون برگشتی اسید کلریدریک (Richards, 1954)، کربن آلی به روش سوزاندن تر، با بی‌کرومات پتاسیم (Jackson, 1975) اندازه‌گیری شدند. شکل‌های مختلف پتاسیم شامل محلول، تبدلی، غیرتبدلی و کل به‌ترتیب در عصاره اشباع، عصاره‌گیری با استات آمونیوم ۱ نرمال پ‌هاش خنثی، عصاره‌گیری با اسید نیتریک جوشان و هضم با اسید فلوریدریک و تیزاب سلطانی تعیین شدند (Pratt, 1965). پتاسیم عصاره‌های به‌دست آمده به روش شعله‌سنجی با دستگاه Jenway 405 اندازه‌گیری شدند. پتاسیم ساختمانی از تفاضل پتاسیم کل از پتاسیم عصاره‌گیری شده توسط اسید نیتریک جوشان محاسبه گردید. عصاره‌گیرهای مورد استفاده برای استخراج پتاسیم قابل جذب گیاه که

جدول ۱- اطلاعات کلی مناطق مورد مطالعه
Table 1- General data of the studied locations

شماره خاک Soil No.	منطقه Location	میانگین بارش Rainfall (mm)	میانگین دما Temperature (°C)	رژیم رطوبتی و حرارتی خاک SMTR	طول جغرافیایی Longitude (m)	عرض جغرافیایی Latitude (m)	ارتفاع Elevation (m)	رده‌بندی خاک Soil classification
1	آبرم Abarm	530	21.4	Xeric-Thermic	485456	3399373	1134	Lithic Xerorthent
2	خیمند Kheymand	480	22.5	-Xeric- Hyper thermic	480220	3390800	860	Typic Xerorthent
3	پریکدان Perikedan	860	13.0	Xeric-Thermic	558692	3377529	1980	Typic Haploxeroll
4	سی‌سخت Sisakht	710	11.9	Xeric-Mesic	550488	3401194	2017	Typic Argixeroll
5	کاکان Kakan	970	11.4	Xeric-Mesic	557365	3397328	1889	Typic Calcixerapt
6	باشت Basht	430	22.6	Ustic-Hyperthermic	523710	3354623	778	Typic Calcixerapt
7	چرام Choram	495	21.2	Xeric-Thermic	475582	3399158	717	Typic Haploxerapt
8	وزگ Vezg	860	13.0	Xeric-Mesic	559403	3384720	1915	Typic Haploxeroll
9	آرند Arand	500	20.8	-Xeric- Hyper thermic	480092	3401492	927	Lithic Xerorthent
10	یاسوج Yasouj	820	15.1	Xeric-Thermic	558966	3392595	1934	Typic Haploxerapt

جدول ۲- عصاره‌گیرهای شیمیایی مورد استفاده برای استخراج پتاسیم قابل استفاده خاک

Table 2- Chemical extractants used to extract available soil potassium

شماره No.	عصاره‌گیر Extractant	غلظت Concentration (M)	نسبت خاک:عصاره گیر Soil:Extractant ratio	زمان تکان دادن Shaking time (min)	منبع Reference
1	سولفوریک اسید Sulfuric acid	0.025	1:10	30	Knudsen <i>et al.</i> , 1990
2	کلریدریک اسید Hydrochloric acid	2	1:10	30	Tiwari <i>et al.</i> , 1995
3	مورگان-ولف* Morgan wolfe	-	1:10	30	Jones, 1990
4	استات سدیم Sodium acetate	1	1:10	10	Knudsen <i>et al.</i> , 1982
5	استات منیزیم Magnesium acetate	1	1:20	10	Mustscher, 1995
6	کلرید سدیم Sodium chloride	1	1:10	15	Martin & Sparks, 1983
7	کلرید سدیم Sodium chloride	2	1:10	15	Martin & Sparks, 1983
8	کلرید کلسیم Calcium chloride	0.01	1:10	60	Salmon, 1998
9	بیکربنات آمونیوم-DTPA** Ammonium bicarbonate-DTPA	-	1:10	10	Jones, 1990
10	استات آمونیوم Ammonium acetate	0.25	1:5	30	Rowell, 1994
11	استات آمونیوم Ammonium acetate	1	1:5	30	Rowell, 1994
12	نیتریک اسید Nitric acid	0.1	1:10	30	Knudsen <i>et al.</i> , 1982

* شامل استات سدیم و اسید استیک. ** شامل بی‌کربنات آمونیوم ۱ مولار و DTPA ۰/۰۰۵ مولار

* Sodium acetate + Acetic acid. ** Ammonium bicarbonate 1M + DTPA 0.005 M.

نتایج و بحث

جدول ۳ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. خاک‌هایی که شماره آنها به ۱ ختم می‌شود مربوط به عمق ۰-۳۰ و خاک‌هایی که شماره آنها به ۲ ختم می‌شود، مربوط به عمق ۳۰-۶۰ سانتی‌متر می‌باشند. ماده مادری خاک‌های مورد مطالعه همگی آهکی است. حدود تغییرات pH در نمونه‌های خاک در دامنه ۷/۰ تا ۷/۸ و میانگین آن ۷/۳۶ می‌باشد. pH خاک توسط میزان املاح خاک از جمله آهک، ماده آلی، میزان بارندگی سالیانه، فعالیت ریزموچودات، ریشه درختان، مواد مادری و غیره کنترل می‌شود (Owliaie *et al.*, 2011). دامنه تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی بین ۰/۴۴ (منطقه آرند) تا ۱/۳۸ (منطقه پریکدان) دسی‌زیمنس بر متر با میانگین آن ۰/۷۸ دسی‌زیمنس بر متر است. بر این اساس هیچ‌کدام از خاک‌ها دارای محدودیت شوری نبوده و مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در عمق بالایی بیش از عمق پایینی بوده است (۰/۹۳ در

برابر ۰/۶۴ دسی‌زیمنس بر متر). میزان کربن آلی در محدوده ۰/۲۶ (افق زیرین منطقه خیمند) تا ۷/۰۷ درصد (افق سطحی خاک منطقه سی‌سخت) متغیر بوده و متوسط آن ۳/۶۶ درصد است. بر اساس نتایج، میزان ماده آلی با شرایط اقلیمی منطقه (بارش بیشتر و دمای کمتر) و میزان تراکم پوشش گیاهی همبستگی مثبت داشته است. ظرفیت تبادل کاتیونی در محدوده ۲۲/۴ (منطقه آبرم) تا ۵۷/۶ (منطقه سی‌سخت) با میانگین ۴۳ سانتی‌مول بر کیلوگرم خاک بوده است. این ویژگی با مقدار رس و ماده آلی خاک‌ها همبستگی داشته است. متوسط درصد شن، سیلت و رس ۳۱/۲، ۲۹/۱ و ۳۹/۷ درصد می‌باشد که موجب شده است، کلاس بافتی این خاک‌ها از رسی تا لومی رسی شنی متغیر باشند. کربنات کلسیم معادل نیز که به‌طور عمده به ماده مادری و میزان آبشویی وابسته است در دامنه ۱۸ (منطقه سی‌سخت) تا ۶۱ درصد (منطقه آبرم) با میانگین ۴۴ درصد گزارش شده است.

جدول ۳- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه^۱

Table 3- Physical and chemical properties of the studied soils

شماره خاک Soil no.	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کلاس بافتی Textural class ²	پ-هاش pH	کربن آلی OC %	کربنات کلسیم معادل CCE %	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC cmol(+)kg ⁻¹	هدایت الکتریکی EC dSm ⁻¹
1-1	49.2	24.0	26.7	SCL	7.57	2.94	57.2	35.9	0.52
1-2	49.2	28.0	22.7	L	7.62	1.83	60.5	22.4	0.52
2-1	23.3	24.0	52.7	C	7.38	2.17	56.0	48.5	0.71
2-2	22.6	25.0	52.4	C	7.42	0.26	45.5	52.2	0.62
3-1	25.6	30.0	44.4	C	7.00	6.22	41.1	48.9	1.38
3-2	27.7	27.6	44.7	C	7.24	5.71	42.0	50.0	0.84
4-1	29.3	26.0	44.7	C	7.29	7.07	18.0	53.3	1.29
4-2	30.6	20.0	49.4	C	7.16	2.94	22.1	57.6	0.84
5-1	44.2	28.0	27.8	CL	7.11	5.20	43.5	43.5	0.74
5-2	39.4	27.4	33.2	CL	7.41	1.15	49.1	39.1	0.52
6-1	24.6	32.0	43.4	C	7.23	6.13	39.5	51.1	1.06
6-2	23.7	32.0	44.3	CL	7.31	3.49	43.6	48.9	0.60
7-1	24.6	36.4	39.0	CL	7.36	5.37	39.3	45.7	0.65
7-2	25.3	35.0	39.7	CL	7.39	3.24	45.4	42.4	0.56
8-1	27.3	30.0	42.7	C	7.11	6.18	42.4	42.4	1.10
8-2	19.3	30.0	50.7	C	7.16	2.85	49.7	45.7	0.82
9-1	21.2	38.4	40.4	C	7.57	2.26	41.1	35.9	0.62
9-2	25.6	28.0	46.4	C	7.58	1.06	48.8	37.0	0.44
10-1	47.1	26.0	26.9	SCL	7.57	4.43	51.2	31.5	1.22
10-2	45.3	33.0	21.7	L	7.80	2.64	55.0	28.3	0.61
Average 0-30 cm	31.7	29.5	38.8	-	7.32	4.80	42.9	43.6	0.93
Average 30-60 cm	30.8	28.6	40.5	-	7.41	2.52	44.7	42.3	0.64
میانگین Total Average	31.3	29.0	39.7	-	7.36	3.66	43.8	43.0	0.78

^۱ خاک‌های با شماره ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی متر می‌باشند.²Soils numbered 1 and 2, correspond to the depth of 0-30 and 30-60 cm, respectively.²SCL=Sandy clay loam, CL=Clay loam, L=Loam, C=Clay

پتاسیم‌های محلول، تبدلی، غیرتبدلی و ساختمانی به‌ترتیب ۰/۴۹، ۹/۶ و ۱۲/۸ درصد از مجموع کل پتاسیم را در خاک‌های مورد مطالعه به خود اختصاص داده‌اند. در اکثر نمونه‌ها، مقدار پتاسیم محلول در بخش سطحی خاک بیش از بخش عمقی است. دلیل این امر احتمالاً هوادیدگی بیشتر کانی‌های پتاسیم‌دار در سطح و آزاد شدن پتاسیم به محلول خاک، بازگشت بقایای گیاهی و انتقال پتاسیم موجود در محلول خاک از اعماق به سطح به‌دلیل تبخیر در سطح می‌باشد. نتایج مشابهی توسط احراری و همکاران گزارش شده است. بر اساس نتایج، مقدار پتاسیم تبدلی و غیرتبدلی نیز در خاک‌های مختلف از سطح به عمق کاهش می‌یابد. هوادیدگی بیشتر کانی‌های میکایی در خاک‌های سطحی نسبت به خاک‌های زیرسطحی و در نتیجه بیشتر بودن مقدار پتاسیم غیرتبدلی آزادشده بر اثر تیمار اسیدنیتریک در میکاهای هوادیده دارای لبه‌های بازشده، از دلایل این امر برشمرده شده است (Ahrari et al., 2017).

شکل‌های مختلف پتاسیم و توزیع نسبی آنها در خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. حدود تغییرات پتاسیم محلول بین ۴/۸ (خاک زیرین منطقه خیمند) تا ۳۲/۷ (خاک سطحی منطقه وزگ) با میانگین ۱۵/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، پتاسیم تبدلی از ۶۵/۱ (خاک زیرین منطقه یاسوج) تا ۳۶۴/۱ (خاک سطحی منطقه باشت) با میانگین ۲۴۷ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، پتاسیم غیرتبدلی از ۱۰۶ (خاک زیرین منطقه یاسوج) تا ۸۷۶ (خاک سطحی منطقه سی‌سخت) و با میانگین ۵۱۵ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک، پتاسیم ساختمانی از ۷۶۱ (خاک سطحی منطقه أبرم) تا ۷۳۲۲ (خاک عمقی منطقه سی‌سخت) با میانگین ۴۰۲۶ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک و پتاسیم کل، از ۱۰۵۱ (خاک سطحی منطقه أبرم) تا ۸۱۱۰ (خاک زیرین منطقه سی‌سخت) با میانگین ۴۴۹۳ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بوده است. به جز پتاسیم ساختمانی، مقادیر بقیه شکل‌های پتاسیم در خاک سطحی بیش از خاک زیرین بوده است. از نظر درصد نیز

جدول ۴- شکل‌های مختلف پتاسیم و توزیع نسبی آنها در خاک‌های مورد مطالعه^۱
 Table 4- Different forms of potassium and their relative distribution in the studied soils

شماره خاک Soil No.	شکل‌های پتاسیم Potassium forms (mgkg ⁻¹)					شکل‌های پتاسیم Potassium forms (%)			
	محلول Solution	تبادلی Exch.	غیر تبادلی Non-Exch.	ساختمانی Structural	کل Total	محلول Solution	تبادلی Exch.	غیر تبادلی Non-Exch.	ساختمانی Structural
1-1	21.0	230	290	761	1051	2.00	21.9	27.6	48.4
1-2	9.62	108	177	1688	1865	0.52	5.79	9.50	84.2
2-1	22.9	300	324	2686	3010	2.27	29.6	32.1	35.9
2-2	4.80	244	601	3312	3913	0.16	8.37	20.6	70.8
3-1	20.6	258	536	4522	5058	0.41	5.10	10.5	83.9
3-2	20.6	255	599	5635	6234	0.33	4.08	9.61	85.9
4-1	24.4	360	876	6109	6985	0.35	5.15	12.5	81.9
4-2	8.92	301	788	7322	8110	0.11	3.71	9.72	86.4
5-1	16.6	253	347	3516	3863	0.43	6.54	8.99	84.0
5-2	10.0	114	224	3617	3841	0.26	2.96	5.83	90.9
6-1	12.9	364	790	5192	5982	0.22	6.09	13.2	80.4
6-2	17.0	299	667	3956	4623	0.37	6.47	14.4	78.7
7-1	14.5	279	570	4822	5392	0.27	5.18	10.5	83.9
7-2	5.40	163	466	4941	5407	0.10	3.02	8.61	88.2
8-1	32.7	351	657	4646	5303	0.62	6.63	12.3	80.3
8-2	12.6	245	406	4704	5110	0.25	4.79	7.94	87.0
9-1	11.4	165	409	4609	5018	0.23	3.28	8.16	88.3
9-2	4.90	148	377	6032	6409	0.07	2.30	5.88	91.7
10-1	30.7	115	126	1276	1402	0.40	1.02	14.1	84.4
10-2	5.80	65.1	106	1190	1296	0.47	5.95	7.08	86.5
Average 0-30cm	20.9	281.2	594.5	3813	4306	0.72	9.06	15.0	75.2
Average 30-60cm	9.8	213.5	434.6	4240	4681	0.26	4.74	9.62	85.4
میانگین Average	15.4	247.3	515	4026	4493	0.49	9.60	12.1	77.8

^۱ خاک‌های با شماره ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به عمق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر می‌باشند.

¹Soils numbered 1 and 2, correspond to the depth of 0-30 and 30-60 cm, respectively.

کیلوگرم از خاک‌ها استخراج شده است.

در مقایسه چند عصاره‌گیر برای استخراج پتاسیم قابل جذب گندم در برخی از خاک‌های استان همدان، استات آمونیوم بیشترین میزان استخراج پتاسیم را داشته است. همچنین عصاره‌گیرهای مورد استفاده در این پژوهش بر اساس مقادیر پتاسیم استخراج شده از خاک، به دو گروه نسبتاً ضعیف شامل اسید سولفوریک ۰/۰۲۵ مولار، کلرید سدیم ۱ مولار و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و عصاره‌گیرهای نسبتاً قوی شامل کلرید باریم ۰/۱ مولار و استات آمونیوم ۱ مولار تقسیم شده‌اند (Zarabi & Jalali, 2008). حسین‌پور و متقیان (Hosseinpour & Motaghian, 2013) در پژوهش‌های خود بر روی خاک‌های مرکزی ایران گزارش کردند از میان ۱۱ عصاره‌گیر استفاده شده، اسید نیتریک، کلرید باریم و استات آمونیوم، به ترتیب بیشترین پتاسیم و آب مقطر، مهلیج ۱، کلرید استرانسیم ۰/۰۰۲ مولار و کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، کمترین پتاسیم را از خاک عصاره‌گیری نمودند.

ایجاد رابطه بین یک عنصر غذایی که به‌وسیله عصاره‌گیری از خاک استخراج شده با مقدار جذب شده آن عنصر در گیاه، یکی از مراحل مهم و اساسی در آزمون خاک به شمار می‌رود. با ایجاد همبستگی، مقدار غلظت عنصر غذایی استخراج شده از خاک با مقدار جذب شده توسط گیاه با یکدیگر مرتبط می‌شوند. جدول ۵ میزان پتاسیم عصاره‌گیری شده از خاک‌ها توسط ۱۲ عصاره‌گیر مختلف و همچنین درصد پتاسیم موجود در برگ بلوط را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، بیشترین میزان پتاسیم عصاره‌گیری شده به ترتیب توسط استات آمونیوم ۱ مولار (۲۲۹/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و پس از آن توسط استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار (۲۲۱/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، محلول DTPA (۱۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و محلول مورگان-ولف (۱۱۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بوده است. در مقابل کمترین پتاسیم توسط اسیدکلریدریک ۲ مولار به میزان ۴۴/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پس از آن توسط کلرید سدیم ۲ مولار و به میزان ۴۷/۹ میلی‌گرم بر

جدول ۵- مقدار پتاسیم استخراج شده توسط عصاره‌گیرها در خاک‌های مطالعه‌شده (mgkg^{-1}) و میزان پتاسیم در برگ بلوطTable 5- The amount of potassium extracted by the extractants in the studied soils (mgkg^{-1}) and the amount of potassium in oak leaves

عصاره‌گیر Extractant	استات سدیم Na OAc 1 M	استات منیزیم Mg OAc 1 M	استات آمونیوم NH_4OAc 0.25 M	استات آمونیوم NH_4OAc 1 M	کلرید سدیم NaCl 1 M	کلرید سدیم NaCl 2 M	کلرید کلسیم CaCl_2 0.01 M	کلریدریک اسید HCl 2 M	سولفوریک اسید H_2SO_4 0.025 M	نیتریک اسید HNO_3 0.1 M	مورگان-ولف Morgan-Wolfe	*DTPA	پتاسیم برگ Leaf K (%)
Soil No.													
1-1	113.7	75.0	246.0	251.4	122.5	62.8	121.0	56.7	172.9	154.1	167.5	209.5	1.16
1-2	49.2	32.0	120.2	117.5	47.0	29.6	53.4	27.5	66.6	60.4	63.0	107.9	
2-1	115.8	88.0	318.5	322.5	131.9	85.5	150.5	69.7	212.2	178.6	186.1	270.1	1.07
2-2	48.3	31.5	176.6	248.6	43.8	27.4	38.4	43.8	49.3	54.8	66.5	153.8	
3-1	105.8	57.2	260.2	278.2	85.3	58.2	84.4	59.0	112.7	110.2	129.2	230.4	0.95
3-2	102.6	52.0	278.2	275.2	77.3	47.8	75.7	54.9	97.7	101.9	120.3	208.9	
4-1	102.5	66.4	388.2	384.2	99.6	53.8	81.5	84.5	115.9	123.0	160.5	317.8	1.10
4-2	62.7	44.1	303.6	309.6	68.3	41.6	50.4	57.6	79.8	85.8	107.4	253.3	
5-1	101.1	60.3	287.1	269.1	98.3	65.1	99.2	43.8	146.9	129.1	147.7	217.6	0.95
5-2	39.8	20.9	119.7	123.7	30.8	25.4	32.0	20.9	40.3	48.8	49.9	104.1	
6-1	120.5	72.6	381.1	377.1	114.7	75.3	105.7	70.2	158.8	153.5	196.9	317.9	1.05
6-2	94.1	56.3	313.0	316.0	93.0	60.0	82.7	49.7	111.1	120.1	143.3	258.6	
7-1	103.8	55.3	293.7	293.7	86.0	55.1	93.0	42.3	134.5	126.6	150.0	231.3	0.90
7-2	38.2	27.9	164.8	168.8	43.9	32.1	43.1	24.7	54.2	59.6	73.7	136.3	
8-1	123.8	73.4	377.2	384.2	118.2	78.8	125.9	49.7	169.1	166.5	192.6	313.9	1.18
8-2	96.7	45.1	260.2	257.2	76.0	50.7	72.2	32.2	96.1	95.0	103.6	209.5	
9-1	627.7	30.0	170.1	176.1	49.7	32.1	46.0	24.4	60.7	63.3	73.7	141.4	0.91
9-2	55.9	23.8	155.3	152.3	38.7	26.8	36.1	20.6	44.4	50.3	58.6	123.8	
10-1	58.2	37.3	122.5	115.5	46.0	31.3	61.8	41.7	81.3	72.5	70.6	105.8	0.65
10-2	42.8	19.1	57.9	64.9	22.5	17.3	32.5	21.5	39.2	40.7	36.7	56.7	
Average 0-30cm	91.6	56.8	248.2	259.3	86.6	54.4	88.1	49.3	124.1	116.1	134.1	214.1	-
Average 30-60cm	57.3	39.6	179.4	184.9	49.2	32.6	46.9	32.1	61.7	65.2	74.8	146.6	-
میانگین Average	81.9	53.0	221.3	229.3	74.7	47.9	74.3	44.8	102.2	99.8	115	198.4	0.92

انبساط‌پذیری کم و حضور بین‌لایه‌های هیدروکسید آهن و آلومینیوم، از لبه و سطوح خارجی کمی برخوردار است و ایلیت نیز یک میکای دی‌اکتاهدرال غیرقابل انبساط سرشار از پتاسیم است. در کانی ایلیت، پتاسیم زیادی در بین اکسیژن‌های قاعده‌ای، ورقه‌های چهاروجهی (در فضای بین‌لایه‌ای) وجود دارد، اما به دلیل قوی بودن پیوند بین لایه‌ها و کاتیون‌های بین لایه‌ای، دسترسی به فضای بین‌لایه‌ای برای ملکول‌های آب یا سایر ملکول‌های قطبی امکان‌پذیر نبوده و این کانی دارای فضای بین لایه‌ای ثابتی می‌باشد. بنابراین لبه‌ها از هم باز نشده و در معرض محلول بیرونی قرار نمی‌گیرند و پتاسیم بین لایه‌ای برای عصاره‌گیرهای ضعیف به راحتی قابل استخراج نیست (Najafi Ghiri et al., 2011; Sadri et al., 2016).

بر اساس نتایج بدست آمده (جدول ۵) حداقل مقدار پتاسیم اندازه‌گیری‌شده در برگ بلوط در نمونه ۱۰ (منطقه یاسوج) به میزان ۰/۶۵ درصد و حداکثر مقدار مربوط به نمونه ۸ (منطقه وزگ) به میزان ۱/۱۸ درصد بوده است. میانگین پتاسیم تبادلی استخراج شده در دو عمق خاک در نمونه‌های ۱۰ و ۸ نیز مقدار حداقل و حداکثر پتاسیم در بین نمونه‌های مورد مطالعه بوده‌اند (به ترتیب ۹۰ و ۳۲۰ میلی‌گرم بر

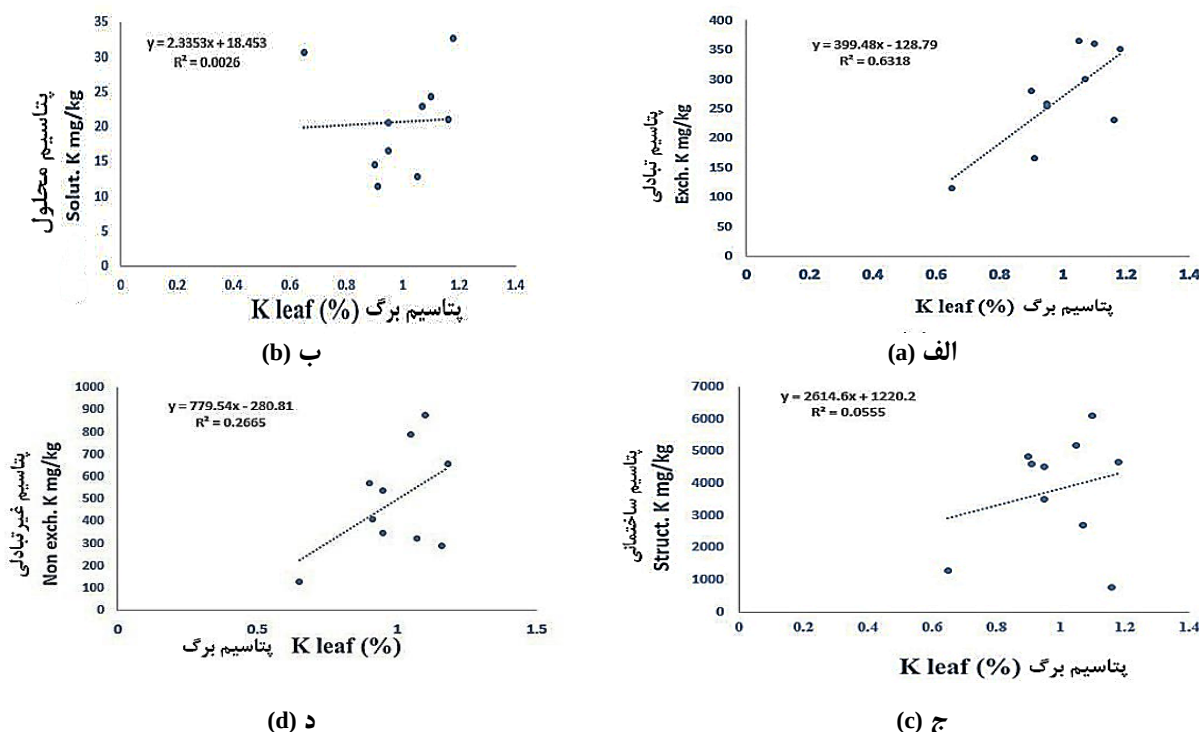
مقدار زیاد پتاسیم عصاره‌گیری شده توسط استات‌آمونیوم را می‌توان به مشابه بودن بار، اندازه و انرژی هیدراتاسیون یون آمونیوم با یون پتاسیم مرتبط دانست. به همین دلیل، در فرآیندهای تبادلی یون آمونیوم به راحتی می‌تواند یون پتاسیم را از مکان‌های تبادلی خارج کند. دلیل کم بودن رهاسازی پتاسیم توسط کلرید کلسیم این است که یون کلسیم از طریق جانشینی، تبادل را با یون‌های دیگر انجام می‌دهد و اندازه و انرژی هیدراتاسیون بالای این یون، نسبت به یون پتاسیم باعث می‌شود که به سختی با پتاسیم‌های بین لایه‌ای مبادله شود، ولی با پتاسیم موجود روی لبه‌ها و سطوح کانی به راحتی جانشین می‌شود (Najafi Ghiri et al., 2019a; Zarrabi & Jalali, 2008). البته توانایی کلسیم در استخراج پتاسیم به خاطر داشتن ظرفیت بیشتر، نسبت به سدیم بیشتر است. از طرف دیگر در خاک‌های مطالعه شده کانی‌های غالب موجود در خاک‌های مورد مطالعه را کانی‌های کلریت و ایلیت و در مقادیر کمتر در مناطق مرطوب‌تر اسمکتیت، تشکیل می‌دهند (Najafi Ghiri et al., 2019b). کلریت به دلیل داشتن ظرفیت تبادل کاتیونی پایین و

پژوهش صورت گرفته پیرامون ویژگی‌های خاک و عناصر غذایی برگ درختان بلوط ایرانی در منطقه کوهمره سرخی شیراز دامنه غلظت ۰/۵ تا ۱ درصدی پتاسیم با میانگین ۰/۷ درصدی در برگ درختان منطقه گزارش گردید (Zarafshar et al., 2021). مقدار میانگین پتاسیم اندازه‌گیری شده در برگ ۵ گونه بلوط در جنوب ترکیه در دامنه ۱/۰۹ تا ۱/۱۹ درصد بوده است (Ozkan et al., 2016). با توجه به نتایج این پژوهش، از ده نمونه برگ درخت بلوط نمونه‌برداری شده، مربوط به ۱۰ منطقه جنگلی، ۵ نمونه دارای پتاسیم کمتر از یک درصد بوده است (میانگین ۰/۹۲ درصد)، که بیانگر اهمیت توجه بیشتر به وضعیت این عنصر در خاک‌های جنگلی این استان دارد. عمده مناطق با کمبود پتاسیم در بافت گیاهی در مناطق پرباران شرقی استان بوده‌اند. بارش بیشتر موجب افزایش هوادیدگی کانی‌های میکایی غنی از پتاسیم و تغییر شکل آنها به کانی‌های با بار لایه‌ای کمتر و انبساط‌پذیری بیشتر می‌شود که پیامد آن کاهش میزان پتاسیم در دسترس در خاک می‌باشد.

از بین شکل‌های چهارگانه پتاسیم، بیشترین همبستگی میان پتاسیم برگ بلوط با پتاسیم تبادلی ($r^2=0.63$) و کمترین همبستگی با پتاسیم محلول ($r^2=0.002$) بدست آمد که بیانگر نقش مهم‌تر این بخش از پتاسیم در خاک در تامین پتاسیم مورد نیاز گیاه بلوط را دارد (شکل ۲).

کیلوگرم) بوده است (جدول ۵) که بیانگر ارتباط بین پتاسیم در دسترس خاک با میزان پتاسیم در برگ درخت بوده است. نیاز گیاهان به پتاسیم بسته به گونه‌های گیاهی بسیار متفاوت است. محصولات درختی مانند گردو، هلو، سیب و غیره نیاز به پتاسیم نسبتاً کمتری دارند. مقدار بحرانی پتاسیم در برگ درختان از ۰/۷۵ تا ۱/۲۵ درصد (میانگین یک درصد) متغیر است. برای گونه‌های علفی، نیاز به پتاسیم بیشتر بوده و مقدار بحرانی در دامنه ۱/۲ تا ۲/۰ درصد است. حد کفایت پتاسیم یک درصد است، افزایش پتاسیم منجر به کاهش انتقال کلسیم و منیزیم می‌شود. به دلیل تحرک پتاسیم، هم در گیاه و هم در خاک، علائم کمبود به‌طور معمول با سرعت زیادی ایجاد شده و این علائم ابتدا در بافت مسن‌تر گیاه ظاهر می‌شود. غلظت پتاسیم در گیاه با افزایش سن کاهش می‌یابد (Jahanbazi et al., 2022).

مقدار میانگین پتاسیم در برگ درختان بلوط منطقه هلن استان چهارمحال و بختیاری ۱/۳۲ درصد گزارش شد (Jahanbazi et al., 2020). در پژوهش مشابهی در تنگه دالاب استان ایلام مقدار پتاسیم برگ بلوط در دامنه ۱/۷۴ تا ۲/۹۱ درصد با میانگین ۲/۴ درصد اعلام گردید (Maleki et al., 2014). همچنین مقادیر پتاسیم برگ در جنگل‌های بلوط در منطقه منج استان چهارمحال و بختیاری در دامنه ۱/۱۷ تا ۱/۲۱ درصد گزارش شده است (Jahanbazi et al., 2022). مقدار پتاسیم در لاشبرگ تازه درختان بلوط در منطقه بانه استان کردستان ۰/۹۴ درصد گزارش گردید (Ghasemi et al., 2016).



شکل ۲- همبستگی میان پتاسیم برگ بلوط با شکل‌های مختلف پتاسیم خاک (میانگین دو عمق)

Figure 2- Correlation between oak leaf potassium and different forms of soil potassium (Average of two depths)

جدول ۶- همبستگی شکل‌های مختلف پتاسیم با برخی ویژگی‌های مطالعه‌شده خاک را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول، پهاش فقط با پتاسیم محلول، همبستگی ($r = -0.44^*$) داشته است. قابلیت هدایت الکتریکی و کربن آلی با هیچکدام از شکل‌های پتاسیم همبستگی معنادار نداشته‌اند. کربنات کلسیم معادل با همه شکل‌های پتاسیم بجز محلول همبستگی منفی داشته است. مقدار رس با همه شکل‌های پتاسیم بجز محلول همبستگی مثبت و مقدار شن فقط با مقدار پتاسیم کل همبستگی منفی داشته است ($r = -0.48^*$). همه شکل‌های پتاسیم (بجز پتاسیم محلول) با یکدیگر همبستگی مثبت داشته‌اند. در پژوهشی که پیرامون وضعیت پتاسیم در افق‌های سطحی و زیرسطحی سری‌های غالب خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد صورت گرفت، مقادیر پتاسیم تبدلی و غیرتبدلی با مقادیر رس، ظرفیت تبادل کاتیونی و کربن آلی همبستگی مثبت معنادار و با کربنات کلسیم معادل همبستگی منفی نشان دادند (Shakeri et al., 2015). وضعیت شکل‌های مختلف پتاسیم در ارتباط با ویژگی‌های خاک و کانی‌شناسی رس در برخی از خاک‌های آهکی استان کهگیلویه و بویراحمد مطالعه شد. بر اساس نتایج مقادیر پتاسیم تبدلی، غیرتبدلی و ساختمانی با مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی، رس،

کربنات کلسیم معادل و مقدار کانی ایلیت همبستگی معنادار و با مقادیر کربن آلی، شن و سیلت همبستگی نشان داده نشده است (Owliaie et al., 2014).

پتاسیم در ذرات مختلف خاک مانند شن، سیلت و رس یافت می‌شود، اما مقدار نسبی آن در این ذرات متفاوت می‌باشد. پتاسیم بر اثر هواپیدگی ذرات خاک می‌تواند آزاد شده و در فازهای تبدلی و محلول قرار گیرد، اما مقدار و سرعت آزاد سازی به عوامل مختلفی بستگی دارد. نجفی قیری و جابری (Najafi Ghiri & Jaber, 2013) بر نقش رس در تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه تأکید کردند و نقش سیلت و شن را کمتر از ۴۰ درصد کل پتاسیم آزاد شده از خاک گزارش کردند. نقش خاک‌های زیرسطحی در تغذیه گیاهان و تأمین پتاسیم مورد نیاز گیاه می‌تواند به اندازه خاک‌های سطحی مهم باشد (Berlinger, 1985). گیاهان دارای ریشه‌های عمیق مانند بلوط می‌توانند مقدار قابل توجهی از پتاسیم مورد نیاز خود را از خاک‌های زیرسطحی جذب کنند. سرینیواسارائو و همکاران (Srinivasarao et al., 2001) بیان کردند که مقدار کل شکل‌های پتاسیم در خاک زیرسطحی (۳۰-۱۵ سانتی متر) ۲۲ سری از خاک‌های هند به اندازه ۹۶ درصد خاک‌های سطحی می‌باشد.

جدول ۶- همبستگی شکل‌های مختلف پتاسیم با برخی ویژگی‌های خاک (میانگین دو عمق)

Table 6- Correlation of different forms of potassium with some soil characteristics (Average of two depths)

پتاسیم محلول	پتاسیم تبدلی	پتاسیم غیرتبدلی	پتاسیم ساختمانی	پتاسیم کل	شن	سیلت	رس	کربنات کلسیم معادل	کربن آلی	قابلیت هدایت الکتریکی	پهاش
Solut. K	Exch. K	Non Exch. K	Struc. K	Total K	Sand	Silt	Clay	CCE	OC	EC	pH
1	0.01	0.03	0.03	0.32	0.14	0.01	0.03	0.04	0.10	0.36	-0.44*
	1	0.83**	0.83**	0.56**	-0.31	0.03	0.44*	-0.58**	0.29	0.34	-0.39
		1	0.98**	0.59**	-0.38	0.01	0.46*	-0.79**	0.28	0.32	-0.43
			1	0.99**	-0.41	0.01	0.48*	-0.76**	0.14	0.25	-0.34
				1	-0.48*	0.01	0.50*	-0.74**	0.10	0.29	-0.36

* و ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد

*, ** statistically significant at 1 and 5% probability levels, respectively.

ارتباط بین پتاسیم غیرتبدلی و کانی‌های میکایی در خاک‌های آهکی استان فارس مطالعه شد. نتایج نشان داد که پتاسیم غیرتبدلی ارتباط مثبت و معناداری با شکل‌های دیگر پتاسیم شامل تبدلی، ساختمانی و کل داشت؛ اما ارتباطی بین این شکل از پتاسیم با پتاسیم محلول گزارش نشد. به‌هرحال پتاسیم محلول در خاک‌ها دارای نوسانات بسیار زیادی بوده و عوامل متعددی بر آن تأثیر دارند و معمولاً تعادل بین شکل‌های پتاسیم بیشتر مربوط به شکل‌های

تبدلی، غیرتبدلی و ساختمانی می‌باشد (Najafi Ghiri et al., 2011). در زیست‌بوم‌های جنگلی به‌دلیل وابستگی سیستم تغذیه‌ای گیاهی به چرخه عناصر، بخش زیادی از نیاز تغذیه‌ای گیاهان از طریق تجزیه بقایای گیاهی و لاشبرگ‌ها تأمین می‌شود. در مطالعه‌ای آزادسازی عناصر پرنیاز از بقایای برگ بلوط در یک بازه زمانی دوساله مقایسه شدند. نتایج نشان داد که عنصر پتاسیم بیشترین آزادسازی را (۹۱ درصد) در مقایسه با عناصر منیزیم، کلسیم، گوگرد، فسفر و

ولف ($r^2=0/515^*$) که در یک دامنه هستند و استات منیزیم ۱ مولار ($r^2=0/45^*$)، استات سدیم ۱ مولار ($r^2=0/45^*$) نیز در سطح ۵ درصد با پتاسیم برگ رابطه معنادار مثبت داشتند. با توجه به نتایج بدست آمده بین تمامی عصاره‌گیرهای استفاده شده رابطه معناداری وجود داشت. از میان عصاره‌گیرها تنها کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار، اسید کلریدریک ۲ مولار و اسید سولفوریک ۰/۰۲۵ مولار با پتاسیم گیاه همبستگی نشان نداده‌اند.

نیترژن داشته‌است. این پتاسیم به شکل محلول بوده و امکان جذب یا آبشویی سریع را دارد (Blair, 1988).

با توجه به نتایج جدول ۷، پتاسیم استخراج شده توسط عصاره‌گیر DTPA ($r^2=0/60^{**}$) بیشترین همبستگی را با پتاسیم برگ گیاه نشان داده است و پس از آن استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار ($r^2=0/593^{**}$) و کلرید سدیم ۱ مولار ($r^2=0/567^{**}$) بیشترین همبستگی‌ها را با پتاسیم برگ بلوط نشان دادند. کلرید سدیم ۲ مولار ($r^2=0/515^*$) و اسید نیتریک ۰/۱ مولار ($r^2=0/515^*$) و مورگان-

جدول ۷- ضرایب همبستگی بین مقادیر میانگین پتاسیم استخراج شده در دو عمق توسط عصاره‌گیرها و پتاسیم برگ

Table 7- Correlation coefficients between average potassium of two depths extracted by extractants and leaf potassium

K leaf	Exch. K	DTPA	Morgan Wolfe	0.1M HNO ₃	H ₂ SO ₄ 0.025M	HCl 2M	0.01 CaCl ₂ M	NaCl 2M	1M NaCl	NH ₄ Acet. 1M	NH ₄ Acet. 0.25M	Mg Acet. 1M	Na Acet. 1M	Extracant عصاره‌گیر
1	0.63**	0.60**	0.51*	0.51*	0.44	0.41	0.44	0.51*	0.56**	0.46	0.59**	0.50*	0.45*	K leaf
	1	0.97**	0.86**	0.78**	0.69**	0.81**	0.67**	0.81**	0.82**	0.74**	0.98**	0.77**	0.79**	Exch. K
		1	0.92**	0.85**	0.77**	0.84**	0.75**	0.87**	0.87**	0.78**	0.99**	0.84**	0.85**	DTPA
			1	0.98**	0.94**	0.80**	0.93**	0.96**	0.98**	0.73**	0.91**	0.97**	0.94**	Morgan Wolfe
				1	0.98**	0.75**	0.98**	0.98**	0.98**	0.68**	0.84**	0.99**	0.94**	0.1 HNO ₃ M
					1	0.71**	0.99**	0.96**	0.96**	0.62**	0.75**	0.97**	0.90**	H ₂ SO ₄ 0.025M
						1	0.68**	0.72**	0.79**	0.76**	0.82**	0.70**	0.73**	2M HCl
							1	0.99**	0.96**	0.61**	0.73**	0.97**	0.90**	CaCl ₂ 0.01M
								1	0.97**	0.67**	0.86**	0.98**	0.93**	NaCl 2M
									1	0.67**	0.86**	0.98**	0.94**	NaCl 1M
										1	0.77**	0.66**	0.68**	NH ₄ Acet. 1M
											1	0.83**	0.85**	NH ₄ Acet. 0.25M
												1	0.94**	Mg Acet. 1M
													1	Na Acet. 1M

* و ** به ترتیب در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد

*, ** statistically significant at 1 and 5% probability levels, respectively.

براساس نتایج، قدرت استخراج عصاره‌گیرها از عصاره‌گیر اولسن، استات آمونیوم یک مولار، کلرید کلسیم ۰/۰۲ مولار، بری و کورتز، اسید نیتریک یک نرمال، اسید نیتریک ۰/۱ نرمال و آب مقطر به ترتیب کاهش یافت. در نهایت عصاره‌گیرهای استات آمونیوم یک مولار، اسید نیتریک ۰/۱ نرمال و آب مقطر به عنوان عصاره‌گیرهای مناسب برای استخراج پتاسیم قابل استفاده معرفی شدند. در پژوهش دیگری، عصاره‌گیرهای شیمیایی به منظور تعیین پتاسیم قابل استفاده پسته در خاک‌های رفسنجان ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که

در پژوهشی عصاره‌گیرهای اسید نیتریک ۰/۱ مولار، مهلیج ۱، کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و آب مقطر برای اندازه‌گیری پتاسیم قابل استفاده گیاه ذرت انتخاب شدند (Hosseinpour & Samavati, 2008). همچنین روش‌های عصاره‌گیری کلرید کلسیم ۰/۰۱ مولار و اسید نیتریک ۰/۱ مولار به عنوان عصاره‌گیرهای مناسب تعیین پتاسیم قابل جذب برنج پیشنهاد شده‌اند (Shivaprakash et al., 2008). پاندا و پاترا (Panda & Patra, 2018) با مطالعه ۲۴ نمونه خاک در هندوستان قابلیت استخراج هفت عصاره‌گیر پتاسیم را ارزیابی نمودند.

(تفاوت ۶ و ۸ برابری به ترتیب در مقادیر پتاسیم تبدیلی و غیرتبدیلی). مقادیر اشکال قابل جذب پتاسیم در مناطق غربی استان با بارش کمتر، در اکثر موارد بیشتر از مناطق مرطوب تر شرقی بوده است. میانگین مقدار پتاسیم تبدیلی در ۶۰ درصد مناطق مطالعه شده، کمتر از مقادیر معمول پیشنهادی برای خاکها بوده است، گرچه نیاز به بررسی بیشتر وضعیت پتاسیم خاکهای جنگلی زاگرس وجود دارد. همچنین میزان میانگین پتاسیم برگ در ۵۰ درصد نمونهها نیز کمتر از حد بحرانی (یک درصد) بوده است. نظر به اهمیت زیاد پتاسیم در تغذیه درختان بلوط و مقابله با تنشهای محیطی، به ویژه کمبود رطوبت خاک، توجه بیش از پیش به شرایط این عنصر در خاک مناطق جنگلی استان و مناطق مشابه توصیه می گردد. حفظ بقایای گیاهی در سطح خاک به منظور بازگشت عناصر به گیاه نقش مهمی در چرخه این عنصر دارد. همچنین انجام برخی طرحهای پژوهشی به منظور بررسی اثرات کوددهی (خاکی یا محلول پاشی) بر وضعیت پتاسیم درختان بلوط نیز توصیه می گردد.

سیاسگزاری

نویسندگان مقاله از معاونت محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه یاسوج به خاطر تأمین مالی این پژوهش در قالب طرح پیشنهادی شماره ۸۸۹۰-۱۴۰۰ قدردانی می نمایند.

عصاره گیرهای استات سدیم مولار و کلرید سدیم ۲ مولار به دلیل داشتن بالاترین ضریب همبستگی با غلظت پتاسیم برگ و اندام هوایی پسته مناسب ترین عصاره گیرها می باشند. کاووسی و کلباسی (Kavoosi & Kalbasi, 2008) در مطالعات خود جهت مقایسه روشهای عصاره گیری پتاسیم خاک، برای تعیین سطح بحرانی پتاسیم برای برنج در تعدادی از خاکهای شالیزاری استان گیلان گزارش کردند که استات منیزیم، اسید سولفوریک، عصاره گیر مورگان و کلرید کلسیم یک صدم مولار همبستگی بالایی با غلظت پتاسیم گیاه داشته اند.

در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده، هر چند DTPA و استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار و کلرید سدیم ۱ مولار هر سه عصاره گیرهای مناسبی تشخیص داده شده اند، اما با در نظر گرفتن سهولت و سرعت کار و اقتصادی بودن، عصاره گیرهای کلرید سدیم ۱ مولار و استات آمونیوم ۰/۲۵ مولار، با توجه به جنبه های اقتصادی و زمان، جهت استخراج پتاسیم خاکهای جنگلی مطالعه شده و مناطق مشابه در استان کهگیلویه و بویراحمد توصیه می شوند.

نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که دامنه مقادیر شکل های مختلف پتاسیم در بخش های مختلف استان تفاوت نسبتاً زیادی داشته است

References

- Ahrari, M., Owliaie, H.R., Adhami, E., & Najafi Ghiri, M. (2017). Study of potassium status and evaluating chemical extractants for estimating available K in soils of some olive orchards of Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 30(3), 835-845. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v31i3.54445>
- Beegle, D.B., & Oravec, D.C. (1990). Comparison of field calibration for Mehlich 3 P and K with Bray- Kurtz P1 and ammonium acetate K for corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21, 1025-1036. <https://doi.org/10.1080/00103629009368288>
- Beringer, H. (1985). Adequacy of soil testing for predicting fertilizer requirements. *Plant and Soil*, 83, 21-37.
- Blair, J.M. (1988). Nutrient release from decomposing foliar litter of three tree species with special reference to calcium, magnesium and potassium dynamics. *Plant and Soil*, 110, 49-55.
- Chapman, H.D. (1965). Cation exchange capacity. p. 891-901. In: Black, C.A. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Corey, R.B. (1987). Soil testing procedures: Correlation. In: JR Brown et. al. (Eds.), *Soil testing: Sampling, Correlation, Calibration and Interpretation*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin. pp. 15-22.
- Day, P.R. (1965). Particle fractionation and particle size analysis: 545-565. In: Black, C.A., (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. American Society of Agronomy, 1572p.
- Dobermann, A., Sta Cruz, P.C., & Cassman, C.G. (1996). Potassium balance and potassium supplying power in intensive irrigated rice systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46, 1-10.
- Dovlati, B., Oustan, Sh., & Samadi, A. (2008). Different forms of potassium and Q/I relationships in soils of sunflower (Khoy area). *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 46, 623-636. (In Persian with English abstract)
- Epstein, E., & Bloom, A.J. (2005) *Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives*. 2th Ed. Sinauer Associates Inc., Sunderland Mass.
- Fathi, S., Samadi, A., Davari, M., & Asadi Kapourchal, S. (2014). Evaluating different extractants to determine available potassium for corn in calcareous soils of Kurdistan province. *Cereal Research*, 4(3), 253-266. (In Persian with English abstract)

- 12- Ghasemi, F., Veisi, G., & Hosseini, V. (2016). Investigating nutrient quality and litter decomposition of Lebanon Oak (*Quercus libani*) in early stages of decomposition process in the northern Zagros forests (Case study: Hoare Khul Forests in the City of Baneh). *Journal of Zagros Forests Researches*, 3(1), 1-17. (In Persian)
- 13- Hosseinpour, A.R., & Samavati, M. (2008). Evaluation of chemical extractants for the determination of available potassium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39, 1559-1570. <https://doi.org/10.1080/00103620802006693>
- 14- Hosseinpour, A.R., & Motaghian, H.R. (2013). Application of kinetic models in describing soil potassium release characteristics and their correlations with potassium extracted by chemical methods. *Pedosphere*, 23(4), 482-492. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60041-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60041-7)
- 15- Hosseinpour, A.R., & Zarenia, M. (2012). Evaluating chemical extractants to estimate available potassium for pinto beans (*Phaseolus vulgaris*) in some calcareous soils. *Plant, Soil and Environment*, 58(1), 42-48. <https://doi.org/10.17221/314/2011-PSE>
- 16- Jackson, M.L. (1975). Soil Chemical Analysis: Advanced Course. University of Wiscon., College of Agriculture, Department of Soil, Madison, 930p.
- 17- Jahanbazi, H., Iranmanesh, Y., Talebi, M., & Pourhashemi, M. (2022). The effect of spray solution of nutrition elements on the amount of macro elements on healthy and drought oak trees (*Quercus brantii* Lindl.) in Monj region of Chaharmahal and Bakhtiari province. *Ecological Iran Forest*, 10(19), 9-21. (In Persian with English abstract)
- 18- Jahanbazi, H., Iranmanesh, Y., Talebi, M., Shirmardi, H., Mehnatkesh, A., Pourhashemi, M., & Habibi, M. (2020). Effect of physiographic factors on absorption of essential nutritional elements of the leaf in Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.) affected by decline (Case study: Helen forest, Chaharmahal & Bakhtiari province). *Journal of Plant Research*, 33, 544-553. <https://doi.org/20.1001.1.23832592.1399.33.3.18.2>
- 19- Jalali, M., & Zarabi, M. (2006). Kinetics of nonexchangeable-potassium release and plant response in some calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil*, 169, 96-204. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521772>
- 20- Kavooosi, M., & Kalbasi, M. (2008). comparison of soil potassium extracting methods to determine critical level of potassium for rice in some paddy soils of Gilan province. *Journal of Sciences and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 4(3), 57-69. (In Persian with English abstract)
- 21- Kooh Soltani, S., Alesheikh, A.A., Ghermezcheshmeh, B., & Mehri, S. (2018). An evaluation of potential Oak decline forest of the Zagros using GIS, RS, FAHP methods. *Ecohydrology*, 5(2), 713-725. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.225917.448>
- 22- Kumari, P.P., & Aiyer, R.S. (1993) Soil test and crop response studies for potassium in Laterite/red loam soils of Kerala. *Journal of Potassium Research*, 9, 62-65.
- 23- Liu, L., & Bates, T.E. (1990) Evaluation of soil extractants for prediction of plant available potassium in Ontario soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 70, 607-615.
- 24- Malakouti, M.J., & Gheibi, M.N. (1999). Determination of critical levels of nutrients in soil, plant, and fruit for the quality and yield improvements in strategic crops of Iran. High Council for Appropriate Use of Pesticides and Chemical Fertilizers, Ministry of Agriculture, Karaj, Iran, pp. 92. (In Persian)
- 25- Malakouti, M.J., & Tabatabaei, S.J. (2001). *Innovative approach to balanced nutrition of fruit trees*. Tehran, Iran. Agricultural education Publication. (In Persian)
- 26- Maleki, A., Noorbakhsh, N., Bazgir, M., & Mahdavi, A. (2014). Determining and comparing the amount of macronutrients (N, P and K) in the leaves of Iranian oak species in two stands of seed-bearing and shoot-bearing western oak (case study: Dalab Strait, Ilam). Proceeding of The Second National Forest Science Student Conference, Karaj, Iran. (In Persian)
- 27- Mohammadzadeh, H., Mirzaei, J., Farashiani, M.A., & Naji, H. (2019). The effect of different intensities of drought on the uptake of elements in the wood of Persian oak (*Quercus brantii*). Second National Knowledge and Innovation Conference in Wood and Paper Industry" held in Taleqan. (In Persian)
- 28- Najafi-Ghiri, M., & Jafari, H.R. (2013). Effect of soil minerals on potassium release from soil fractions by different extractants. *Arid Land Research and Management*, 27(2), 111-127. <https://doi.org/10.1080/15324982.2012.719571>
- 29- Najafi-Ghiri, M., Abtahi, A., Owliaie, H., Hashemi, S.S., & Koohkan, H. (2011). Factors affecting potassium pools distribution in calcareous soils of southern Iran. *Arid Land Research and Management*, 25(4), 313-327. <https://doi.org/10.1080/15324982.2011.602177>
- 30- Najafi-Ghiri, M., Niazi, M., Khodabakhshi, S., Boostani, H.R., & Owliaie, H.R. (2019a). Mechanisms of potassium release from calcareous soils to different salt, organic and inorganic acid solutions. *Soil Research*, 57(3), 301-309. <https://doi.org/10.1071/SR18301>
- 31- Najafi-Ghiri, M., Rezabigi, S., Hosseini, S., Boostani, H.R., & Owliaie, H.R. (2019b). Potassium fixation of some calcareous soils after short term extraction with different solutions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(7), 897-910. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1537485>

- 32- Owliaie, H.R., Adhami, E., Faraji, H., & Fayyaz, P. (2011). Influence of oak (*Quercus brantii* Lindl.) on selected soil properties of oak forests in Yasouj Region. *Journal of Water and Soil Science*, 15(56), 193-207. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1390.15.56.15.5>
- 33- Owliaie, H.R., Heydarmah, S., Adhami E., & Najafi Ghiri, M. (2014). Kinetics of non-exchangeable potassium release in relation to clay mineralogy in some calcareous soils of Kohgilouye Province. *Journal of Water Soil Science*, 18(68), 99-110. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1393.18.68.10.5>
- 34- Ostakh, E., Soosani, J., Abdolkhani, A., & Naghavi, H. (2020). Impact of decline on the concentration of chemical elements in the wood of declined and healthy Brant's oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 27(4), 413- 424. (In Persian with English abstract)
- 35- Ozkan, C.O., Atalay, A.I., Kurt, O., & Kamalak, A. (2016). Effect of species on macro and micro mineral composition of oak leaves with respect to sheep requirements. *Livestock Research for Rural Development*. 28, 107. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1063719>
- 36- Panda, R., & Patra, S.K. (2018). Assessment of suitable extractants for predicting plant-available potassium in Indian coastal soils. *Communication Soil Science and Plant Analysis*, 49, 1157-1167. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1455845>
- 37- Pourhashemi, M., & Sadeghi, S.M.M. (2020). A review on ecological causes of oak decline phenomenon in forests of Iran. *Ecological Iran Forest*, 8(16), 148-164. (In Persian)
- 38- Pratt, P.F. (1965). Potassium. 1022-1030. In: C. A. Black. *Methods of Soil Analysis*, 215 part 2. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 39- Richards, L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils*. U. S. Salinity Laboratory Staff. USDA. Hand book No. 60. Washington, D C, USA.
- 40- Rowell, D.L. (1994). *Soil Science: Methods and applications*. Longman Scientific and Technical, UK.
- 41- Sadri, N., Owliaie, H.R., Adhami, E., & Najafi Ghiri, M. (2016). Investigation of different forms of potassium as a function of clay mineralogy and soil evolution in some soils of Fars Province. *Journal of Water and Soil*, 30(1), 172-185. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i1.38048>
- 42- Salih, N., & Anderson, F. (1999). Nutritional status of a Norway spruce stands in SW Sweden in response to compensatory fertilization. *Plant and Soil*, 209, 85-100.
- 43- Saykhul, A., Chatzistathis, T., Chatzissavvidis, C., Koundouras, S., Therios, I., & Dimassi, K. (2013). Potassium utilization efficiency of three olive cultivars grown in a hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 162, 55-62. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.036>
- 44- Shahbazi, K., Cheraghi, Ch., Marzi, M., & Hasheminasab Zavareh, K.S. (2022). The effect of extractant type and soil/extractant ratio on the extraction of soil available potassium. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(7), 1481-1497. (In Persian with English abstract)
- 45- Shakeri, S., Abtahi, A., Karimian, N.A., Baghernejad, M., & Owliaie, H. (2015). Kinetics of nonexchangeable potassium release in surface and subsurface horizons of predominant soil series in Kohgilouye-va-Boyerahmad Province. *Journal Water Soil Science*, 19(73), 301-319. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.301>
- 46- Shivaprakash, B.L., Gurumurthy, K.T., & Chidanandappa, H.M. (2008). Evaluation of suitable extractant for available potassium in rice soils of Tunga command area in Karnataka. *Mysore Journal of Agricultural Sciences*, 42, 264-267.
- 47- Simard, R.R., & Zizka, J. (1994). Evaluating plant available potassium with strontium citrate. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 25(9-10), 1779-1789.
- 48- Srinivasarao, S., Rupa, T.R., Subba, Rao A., & Bansal, S.K. (2001). Subsoil potassium availability in twenty-two benchmark soil series of India. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 32(5-6), 863-876.
- 49- Zarafshar, M., Matinzadeh, M., Negahdarsaber, M.R., Pourhashemi, M., Bordbar, S.K., & Ziaeiian, M.R. (2021). Soil characteristics and leaf nutrients of healthy and declined Brants oak (*Quercus brantii* Lindl.). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 29(2), 152-140. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2021.352613.1967>
- 50- Zarrabi, M., & Jalali, M. (2008). Evaluation of extractants and quantity-intensity relationship for estimation of available potassium in some calcareous soils of western Iran. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39(17-18), 2663-2677. <https://doi.org/10.1080/00103620802358797>

Evaluating Aquifer's Hydrodynamic Parameters Using Pumping Tests and Geoelectric Data (Case Study: Alluvial Aquifer in the Northeast of Gachsaran City)

A. Khedri¹, A. Saberinasr^{2*}, N. Kalantari³

1- Director of Kusar Dam, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Regional Water Authority, Yasuj, Iran

2 and 3- Assistant Professor and Full Professor in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

Received: 21-02-2024
Revised: 08-07-2024
Accepted: 20-07-2024
Available Online: 20-07-2024

How to cite this article:

Khedri, A., Saberinasr, A., & Kalantari, N. (2024). Evaluating aquifer's hydrodynamic parameters using pumping tests and geoelectric data (Case study: alluvial aquifer in the Northeast of Gachsaran City). *Journal of Water and Soil*, 38(4), 525-540. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86955.1389>

Introduction

The comprehension of the hydrogeological conditions of the aquifer and the determination of its hydraulic characteristics, such as hydraulic conductivity, transmissivity coefficient, and specific storage, are crucial for the management and preservation of groundwater resources. Various conventional methods, including empirical formulas, laboratory techniques (constant and falling head), tracer tests, field tests (Lugeon, Lefranc, slug, flowmeter, and pumping tests), and groundwater inverse modeling, are employed to establish these characteristics, particularly hydraulic conductivity. Empirical formulas are limited to ideal conditions, and in laboratory methods, the sample must be kept undisturbed. Due to the impracticality of measuring large-scale effective factors, the hydraulic conductivity determined through laboratory methods is also the only representative of the hydraulic conductivity at the sampling point. Tracer studies encounter numerous constraints, such as time, cost, porosity determination, and tracer dispersion in multilayered aquifers. It is also difficult to determine the average hydrodynamic properties of the heterogeneous aquifer based on the data obtained from a specific section of the Lefranc and Slug tests. Consequently, pumping tests are commonly selected for hydraulic parameter estimation. Although costly and time-intensive, these tests provide more precise coefficients. Geophysical methods have been greatly developed during the last two decades and have shown a significant correlation with the hydraulic parameters of the aquifer derived from borehole pumping tests or direct laboratory measurements. This approach minimizes uncertainties in numerical model calibration, improves data coverage, and reduces the time and cost of regional hydrogeological investigations. The conventional approach, known as the electrical resistivity method, is still widely used in global and local research projects for evaluating aquifer hydraulic characteristics (Ige *et al.*, 2018; Arétouyap *et al.*, 2019; Youssef, 2020; Ullah *et al.*, 2020; de Almeida *et al.*, 2021; Lekone *et al.*, 2023). Therefore, this study aims to use the integrated approach of the geophysical method and pumping test as a cost-effective and efficient alternative for estimating the hydraulic parameters of the alluvial aquifer in the northeast of Gachsaran city.

Material and Methods

The research area is an alluvial aquifer located 5 km to the northeast of Gachsaran, between coordinates 50-52 to 51-09 E longitude and 30-15 to 30-28 N latitude. Using 86 vertical electrical soundings, Archie's equations, and the IPI2win software, the hydraulic characteristics of the aquifer under investigation were estimated. Subsequently, these characteristics were then compared to the coefficients derived from the data of two pumping



©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.2024.86955.1389>

test wells, which were calculated using the Aquifer test software and obtained via the Cooper-Jacob and Neuman methods.

Results and discussion

The hydrodynamic coefficients of the aquifer were initially determined using the Cooper-Jacob method in this study. The hydraulic conductivity values for wells one and two are 4.9 m/day and 5.7 m/day, respectively. Correspondingly, the storage coefficient values for wells one and two are 0.015 and 0.021, respectively. Based on the Cooper-Jacob approach, it is deduced that if the storage coefficient values exceed 0.001, the aquifer is classified as unconfined. In this study, the storage coefficient values for both pumping wells suggest that the aquifer is unconfined. Since the vertical flow component and the delayed yield phenomenon should also be taken into account in unconfined aquifers, the Neuman analytical model has been used in the studied aquifer. The values of specific yield (S_y) for pumping wells one and two, which are related to delayed yield, are 0.05 and 0.04, respectively. These values were calculated by analyzing the first segment of the curve derived from the Neuman logarithmic drawdown-time plot. The storage coefficient values for pumping wells one and two, extracted from the second section of the curve, are 0.015 and 0.021, respectively. Furthermore, the transmissivity value for well number 1 was 323 m²/day, while for well number 2, it was 655.5 m²/day. The vertical electrical sounding (VES) data were subsequently initially analyzed and interpreted using the IPI2win software and the equalization curve method (partial curve matching technique). The coefficients denoted as m and n , indicative of the degree of cementation of the sediments, were determined based on the sedimentary composition prevalent in the area. Archie's equations were employed to calculate the formation factor and porosity parameters. The aquifer exhibits a porosity range of approximately 0.15 in the eastern and southeastern parts (near the outlet of the plain) and around 0.41 in the central, northern, and northwestern sections of the area (next to the Asmari Formation). The specific yield (S_y) of the aquifer was calculated using the provided formula:

$$S_y = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{sat}} \right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{unsat}} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

The minimum and maximum specific yield were estimated as 0.006 (in the eastern and southeastern regions) and 0.089 (in the western and northwestern regions of the plain), respectively, with an average value of 0.04. The transmissivity coefficients for the entire aquifer were then calculated based on the fitted relationship between hydraulic conductivity (K) and formation factor (F):

$$T = Kb = (K = -0.1x^2 + 2.05x - 4.5) \times b$$

The range of transmissivity coefficients varies from a minimum of 63 m²/day (in the western and northwestern sections of the plain) to a maximum of 608.9 m²/day (in the eastern and southeastern areas). The average transmissivity coefficient is calculated as 323.7 m²/day. To ensure the precision of the geoelectric method's coefficients, a comparative analysis was conducted with the hydrodynamic coefficients obtained from the two pumping test wells, as presented in the table below:

Well No.	K(m/d)		T(m ² /d)		Sy	
	PT*	VES*	PT	VES	PT	VES
1	4.9	3.6	323	237	0.05	0.05
2	5.7	5.5	655.5	632.5	0.04	0.03

*PT: Pumping Test; VES: Vertical Electrical Sounding

Conclusion

The evaluation and comparison of the hydrodynamic coefficients derived from the aforementioned methods indicate that the geoelectric method coefficients exhibit acceptable agreement with the pumping test coefficients. In other words, the analysis of the pumping test conducted using the Neuman technique in the unconfined aquifer revealed that well number two displayed a greater transmissivity coefficient, while well number one presented a higher specific yield. These findings are confirmed by the geoelectric approach. Consequently, such hybrid approaches, which include simultaneous analysis of geophysical methods (such as VES) and pumping tests will be a great alternative to multiple costly pumping tests for evaluating the hydrodynamic coefficients of an aquifer. Moreover, employing this hybrid technique enables the generation of dense hydrodynamic coefficients in an aquifer for use as inputs in the groundwater model.

Keywords: Gachsaran, Hydrodynamic coefficients, Pumping Test, Vertical Electrical Soundings

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۵۲۵-۵۴۰

ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از اطلاعات آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک (مطالعه موردی: آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران)

اکبر خدری^۱ - امیر صابری نصر^{۲*} - نصرالله کلانتری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

چکیده

پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان اهمیت ویژه‌ای در تمام بررسی‌های هیدروژئولوژیکی دارد و یکی از معضلات مهم در محاسبات هیدروژئولوژیکی و مدیریت آبخوان‌ها عدم دسترسی به داده‌های قابل اطمینان می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین و تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان‌ها وجود دارد که دقیق‌ترین آن‌ها استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ است، علاوه بر آن، داده‌های ژئوالکتریک نیز حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق از اطلاعات آزمون پمپاژ دو چاه اکتشافی و ۸۶ سونداژ قائم ژئوالکتریک به روش مقاومت ویژه جهت ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان آبرفتی شمال شرق شهر گچساران استفاده شده است. پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان همچون هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال و آبدهی ویژه با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ دو چاه اکتشافی به روش کوپر-ژاکوب و نیومن تعیین شد، سپس همین پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از داده‌های ژئوالکتریک (سونداژ الکتریک قائم) نیز محاسبه و با داده‌های آزمایش پمپاژ مقایسه شدند. پس از بررسی پارامترهای به‌دست‌آمده از آزمون پمپاژ چاه‌های شماره یک و دو به روش نیومن در آبخوان آزاد معلوم گردید که ضریب قابلیت انتقال برای چاه شماره دو (۶۶۵/۵ متر مربع بر روز) که در قسمت شرقی آبخوان قرار دارد مقدار بیشتری است و با روش ژئوالکتریک (۶۳۲/۵ متر مربع بر روز) همخوانی دارد، همچنین مقدار آبدهی ویژه در روش آزمون پمپاژ چاه شماره یک (۰/۰۵) مقدار بیشتری است که باز هم روش ژئوالکتریک (۰/۰۵) آن را تأیید می‌کند. تمامی نتایج نشان‌دهنده تخمین مطلوب پارامترهای هیدرودینامیکی توسط روش ژئوالکتریک است و روش آزمون پمپاژ نیز بر آن صحنه می‌گذارد؛ لذا از روش ژئوالکتریک می‌توان در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های حفاری‌های آینده در منطقه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آزمون پمپاژ، پارامترهای هیدرودینامیک، سونداژ قائم ژئوالکتریک، گچساران

مقدمه

شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان و تعیین پارامترهای هیدرولیکی آن، مانند هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال و ذخیره ویژه، بسیار مهم است. مدل‌سازی و نحوه انتقال آلاینده‌ها نیز به خصوصیات هیدرولیکی آبخوان وابسته است؛ به‌طوری‌که ممکن است تغییرات جزئی در خواص هیدرولیکی، رفتارهای انتقال مواد را به مقدار قابل‌توجهی تغییر دهد. تعیین این خصوصیات (به‌ویژه K) به‌وسیله تجزیه و تحلیل روش‌های مرسوم مختلفی، از جمله فرمول‌های تجربی (Lashkaripour et al., 2013)، روش‌های آزمایشگاهی (بار

به‌دلیل افزایش روزافزون جمعیت و متعاقب آن فعالیت‌های کشاورزی، نیاز به استفاده از منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان گسترش یافته است (Song et al., 2011). این مسئله لزوم توجه به این منابع و مدیریت بهینه آن‌ها را به‌ویژه در مناطق خشکی، مانند ایران، به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین پایدار آب، دوچندان می‌کند. به‌طور کلی، برای مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی شناخت

(Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86955.1389>

۱- مدیر سد کوثر، شرکت آب منطقه‌ای کهگیلویه و بویراحمد، یاسوج، ایران
۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار و استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

را برای تخمین مستقیم پارامترهای آبخوان از داده‌های ژئوفیزیکی، نظیر مقاومت ویژه الکتریکی باز کرد؛ زیرا هر دو ویژگی الکتریکی و هیدرولیکی اطلاعات ارزشمندی را در مورد هندسه فضای منافذ و ناهمگنی آبخوان می‌دهند. بنابراین، از همبستگی پارامترهای هیدرولیکی به‌دست‌آمده با استفاده از هر دو روش آزمون پمپاژ و همچنین تحلیل داده‌های مقاومت ویژه سطحی می‌توان داده‌های قابل اعتمادتری را از ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان به‌دست آورد. علاوه بر این، با این رویکرد، می‌توان عدم قطعیت‌ها را در کالیبراسیون مدل عددی کاهش داد، پوشش داده‌ها را بهبود بخشید و زمان و هزینه تحقیقات هیدروژئولوژیکی را در مقیاس منطقه‌ای کاهش داد. به همین دلیل، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان یک تکنیک مکمل مؤثر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که نیاز به بهینه‌سازی منابع ضروری است، مطرح می‌شود.

اگرچه سایر روش‌های ژئوفیزیکی کلاسیک نظیر پتانسیل‌خودزا، روش انکساری لرزه‌ای، رادارهای نفوذی به زمین^۱، تکنیک‌های الکترومغناطیسی حوزه زمان و فرکانس، پلاریزاسیون القایی و غیره در کمی‌سازی پارامترهای آبخوان و نقشه‌برداری زیر سطحی گسترش و پیشرفت قابل‌توجهی داشته‌است؛ با این وجود، استفاده وسیع از رویکرد مرسوم، یعنی روش مقاومت ویژه الکتریکی، در تخمین پارامترهای هیدرولیکی سفره‌های آب زیرزمینی در بسیاری از پژوهش‌ها در سطوح بین‌المللی و محلی ادامه دارد (Ige et al., 2018; Arétouyap et al., 2019; Youssef, 2020; Ullah et al., 2020; de Almeida et al., 2021; Lekone et al., 2023). برای مثال پردمو و هم‌کاران (Perdomo et al., 2014) روشی برای استخراج پارامترهای هیدرولیکی با ترکیب داده‌های هیدروژئولوژی کلاسیک با اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد دادند. آن‌ها نتایج مطالعه خود را با نتایج قبلی از سایر نویسندگان مقایسه کردند که همخوانی بالایی را آن‌ها نشان می‌داد. کازاکیس و هم‌کاران (Kazakis et al., 2016) از روش‌های ژئوالکتریکی و مقایسه آن با نتایج آزمون پمپاژ، برای تخمین تخلخل، هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال در یک آبخوان متخلخل استفاده کردند. بدین منظور، مقاومت الکتریکی آبخوان و همچنین هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در ۳۷ سایت و چاه اندازه‌گیری شد. ضرایب با استفاده از قانون آرچی^۲ محاسبه و همبستگی بالایی را با نتایج آزمون پمپاژ نشان داد. علاوه بر این، یک رابطه بین مقاومت الکتریکی و هدایت هیدرولیکی برای آبخوان مورد مطالعه ایجاد شد تا امکان برآورد این پارامترها در سایت‌های فاقد داده فراهم شود. عبدالرزاق و هم‌کاران (Abdulrazzaq et al., 2020) از تکنیک‌های سونداژ الکتریکی قائم^۳ و تصویربرداری مقاومت الکتریکی دوبعدی^۴ برای برآورد پارامترهای

ثابت و افتان (Hatami Golmakani et al., 2017)، آزمایش‌های ردیابی (Yeh et al., 2000; Crestani et al., 2015; Vu & Jardani, 2022)، آزمایش‌های صحرایی (آزمایش لوژان، لوفران، آزمایش اسلاگ، آزمایش‌های فلومتر و آزمون پمپاژ) (Calvache et al., 2019; Hasan et al., 2019; Falowo et al., 2019) و مدل‌سازی معکوس آب زیرزمینی (Vogeler et al., 2019; Minutti et al., 2020) صورت می‌گیرد. فرمول‌های تجربی تنها برای شرایط ایده‌آل، مثلاً اندازه یکسان ذرات محیط متخلخل ارائه شده‌اند و نسبت به سایر روش‌ها دقت پایین‌تری دارند. در روش‌های آزمایشگاهی نیز حفظ دست‌نخورده‌گی نمونه ضروری است. ضمن آن‌که هدایت هیدرولیکی تعیین شده با روش‌های آزمایشگاهی تنها معرف هدایت هیدرولیکی در نقطه نمونه‌برداری شده است. علاوه بر این، بسیاری از عوامل بزرگ‌مقیاس مؤثر در ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، در نمونه‌های آزمایشگاهی قابل برداشت و اندازه‌گیری نیست. مطالعات ردیابی نیز با محدودیت‌های فراوانی نظیر، زمان و هزینه مواجه است. علاوه بر این، در آبخوان‌های چندلایه، حرکت ردیاب در لایه با هدایت هیدرولیکی بالاتر ممکن است موجب خطا در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی معادل گردد. در این روش به پارامتر تخلخل نیز نیاز است که اندازه‌گیری آن نیز خود یک مشکل بزرگ‌تر به‌حساب می‌آید. در آزمایش‌های لوفران و اسلاگ نیز تعیین میانگین خواص هیدرودینامیکی سفره آبدار ناهمگن بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از یک مقطع خاص مشکل است؛ بنابراین پارامترهای هیدرولیکی مذکور، به‌ویژه هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال، معمولاً از طریق آزمون پمپاژ انجام شده بر روی گمانه‌های حفاری شده تخمین زده می‌شوند. اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی به این روش نیز اگرچه از دقت قابل‌قبول‌تری برخوردار است، ولی در واقعیت چنین آزمایش‌هایی پرهزینه و زمان‌بر هستند و تنها می‌توانند اطلاعات مکانی محدودی را ارائه دهند. ضمن آنکه، آنالیز تحلیلی اولیه ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان در پاسخ به پمپاژ/تزریق اغلب با فرض همگنی محیط انجام می‌گردد. این موضوع ممکن است برای استنباط ویژگی‌های ظاهری آبخوان کافی باشد؛ اما نمی‌تواند رفتار غیرماندگار آبخوان مورد آزمایش قرار گرفته را نشان دهد.

روش‌های ژئوفیزیکی در طول دو دهه گذشته توسعه زیادی یافته‌اند. در پژوهش‌هایی که در این مدت انجام شده است، ویژگی‌های الکتریکی آبخوان که از روش‌های ژئوفیزیکی به‌دست می‌آید، همبستگی قابل‌ملاحظه‌ای را با پارامترهای هیدرولیکی آبخوان حاصل از آزمایش‌های پمپاژ در گمانه‌ها یا از اندازه‌گیری‌های مستقیم آزمایشگاهی نشان داده است. این نتایج و مشاهدات، فضای تحقیقاتی

3- Vertical electrical sounding (VES)

4- Electrical resistivity imaging (ERI)

1- Ground-penetrating radar (GPR)

2- Archie's law

استفاده از ۸۶ سونداژ الکتریکی قائم و معادلات آرچی^۲، پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان مورد مطالعه تخمین زده شد و با نتایج داده‌های آزمایش پمپاژ مقایسه انجام گردید.

مواد و روش‌ها

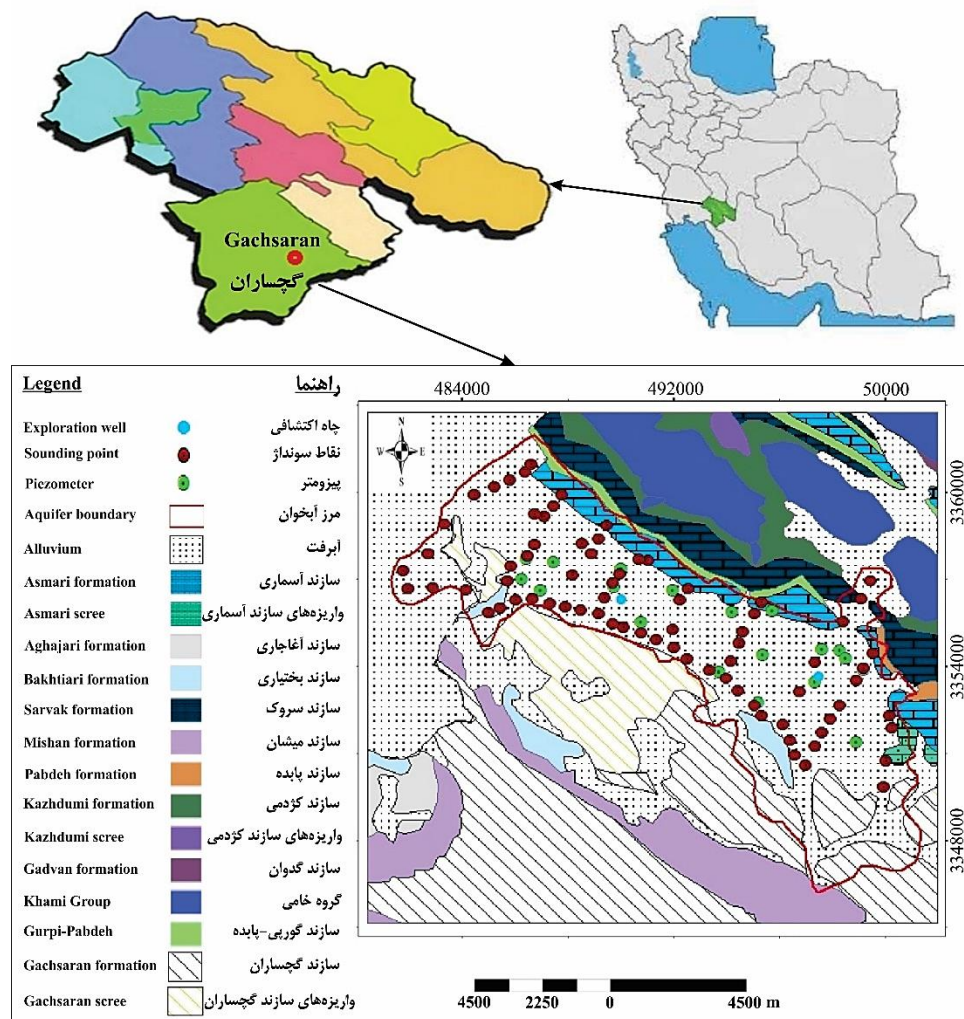
منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی (شکل ۱)، در جنوب استان کهگیلویه و بویراحمد در ۵ کیلومتری شمال شرق شهر گچساران بین مختصات ۵۲-۵۰ الی ۵۱-۰۹ طول شرقی و ۳۰-۲۸ الی ۳۰-۲۸ عرض شمالی و ارتفاع متوسط ۷۰۰ متر از سطح دریا واقع گردیده که از شمال به ارتفاعات کوه خامی، از جنوب به مسیل فصلی خربل (خروجی دشت) منتهی به رودخانه زهره، از شرق به دشت کوچک سریش و بیزرد و از غرب به محدوده مطالعاتی دوگنبدان و شهر گچساران محدود می‌شود. از لحاظ چینه‌شناسی حوضه آبریز محدوده مورد مطالعه از نهشته‌های کرتاسه تا کواترنری تشکیل شده‌اند که از قدیم به جدید شامل گروه خامی (فهلپیان، گدون، داریان)، کزدمی، ایلام-سروک، پابده-گورپی، آسماری، گچساران، میشان، بختیاری و آبرفت‌ها و رسوبات عهد حاضر می‌باشد (Darvishzadeh, 2003). بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، آبخوان شمال شرق شهر گچساران دارای اقلیم نیمه‌خشک و بر اساس طبقه‌بندی آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشک معتدل می‌باشد.

آبخوان مورد مطالعه دارای امتدادی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی است. با توجه به اطلاعات حاصل از پی‌زومترها جهت جریان آب زیرزمینی نیز در همین راستا است و نوع آبخوان از نوع آزاد می‌باشد. بخش عمده این آبخوان ناشی از فرسایش آهک‌ها و سازندهای کربناتی بالادست بوده که مواد سازنده آن در ابتدای محدوده (بخش ورودی) و امتداد مخروط‌افکنه‌ها اغلب، درشت و از نوع قلوه‌سنگ، گراول، ماسه و گاه‌آرس و در نواحی میانی سفره با دانه‌بندی متوسط و در بخش خروجی آبخوان به‌طور معمول ریزدانه و از جنس سیلت و رس می‌باشد. بر اساس مطالعات ژئوفیزیک صورت گرفته (اطلاعات ۸۶ سونداژ الکتریکی قائم) متوسط ضخامت سفره، حدود ۱۳۵ متر است. جنس سنگ کف این آبخوان، در اغلب بخش‌ها، سازند گچساران و در برخی نواحی دشت، آهک‌های نابرجای سازندهای آسماری و گنگلومرای بختیاری برآورد شده است. در شکل ۱ با استفاده از نقشه زمین‌شناسی پایه ورقه گچساران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ نقشه زمین‌شناسی حوضه و دشت مورد مطالعه تهیه شده و موقعیت پی‌زومترها، نقاط سونداژ الکتریکی و دو چاهی که بر روی آن‌ها آزمایش پمپاژ انجام شده نمایش داده شده است.

هیدرولیکی آبخوان در منطقه مزارع فدق^۱ در فروافتادگی بحرانجف، عراق استفاده کردند. آن‌ها پس از برآورد پارامترهای هیدرولیکی با روش‌های مذکور، در نهایت نقاط جدیدی برای حفاری چاه‌های جدید توصیه نمودند. حسن و همکاران (Hasan et al., 2021) از روش سونداژ الکتریکی قائم و مقایسه آن با روش آزمون پمپاژ در منطقه هویژو چین برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان موجود در سنگ هوازه استفاده کردند. روابط تجربی بین هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از آزمون پمپاژ (Kw) و مقاومت آبخوان (pa)، و دیگری بین ضریب قابلیت انتقال حاصل از آزمون پمپاژ (Tw) و مقاومت عرضی (Tr) به دست آوردند و از آن برای تخمین K و T برای همه نقاط سونداژ الکتریکی قائم که در آن‌ها آزمون پمپاژ انجام نشده بود، استفاده نمودند. از تحقیقات داخلی نیز می‌توان به مطالعه طاهری تیزرو و همکاران (Taheri-tizro et al., 2012) اشاره نمود. ایشان به مقایسه مشخصه‌های هیدرولیکی سفره‌های آب زیرزمینی برآورد شده با دو روش آزمون پمپاژ (افت پله‌ای) و سونداژ الکتریکی (۲۹ سونداژ) پرداختند. نتایج آزمون t-test در آن مطالعه نشان داد که ضریب قابلیت انتقال در دو روش ژئوالکتریک و افت پله‌ای، تفاوت معنی‌داری نداشته است. همچنین بین مقاومت عرضی اصلاح شده و ضریب قابلیت انتقال (T) لایه‌های آبدار یک رابطه همبستگی به دست آمد که حاکی از صحت آزمایش‌ها در محدوده مطالعاتی مذکور و همچنین مؤید مطالعات قبلی سینگال و نواس می‌باشد. قابلیت انتقال، فاکتور سازند و آبدی ویژه با استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی تخمین زده شدند (Schimschal, 1981; Urish, 1981; Huntley, 1986; George et al., 1988; Chen et al., 2001; Frohlich & Kelly, 1988; George et al., 2015). روش ژئوفیزیکی توانسته است با صرفه‌جویی در هزینه‌ها، زمان و قابلیت استفاده در لیتولوژی‌های متنوع کمک قابل‌توجهی در تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان در کنار روش آزمون پمپاژ داشته باشد و به‌عنوان روشی مکمل مورد استفاده قرار گیرد.

بنابراین هدف این مطالعه استفاده از رویکرد یکپارچه روش ژئوفیزیکی و آزمایشات پمپاژ، به‌عنوان یک روش مکمل مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران است. از آنجایی که در ایران، هزینه بالای حفاری گمانه‌ها، تنها منجر به حفاری چند چاه آزمایشی پمپاژ در یک دشت شده و گاهی اوقات فقط یک چاه مشاهده‌ای در هر آزمون پمپاژ حفر می‌شود؛ بنابراین، این موضوع منجر به کسب اطلاعات محدودی در زمینه توزیع پارامترهای هیدرولیکی در هر سیستم آبخوان شده است. علاوه بر این، آزمایش پمپاژ انجام شده با استفاده از یک چاه پمپاژ و یک چاه مشاهده‌ای، ناهمسانی و توزیع مکانی پارامترهای هیدرولیکی چاه پمپاژ را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، در این تحقیق با



شکل ۱- موقعیت نقاط آزمون پمپاژ (چاه‌های اکتشافی)، محل سونداژهای الکتریکی قائم (VES) و پیزومترها در منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی

Figure 1- The location of pumping test points (exploration wells), vertical electrical sounding, and piezometers in the study area on a geological map

پس از به‌دست آوردن منحنی افت-زمان در آزمون پمپاژ و منحنی شاخص معادله تاپس، می‌توان با قرار دادن دو منحنی بر روی یکدیگر و استخراج مختصات نقطه تطابق، با استفاده از معادله تیس، مقادیر S و T را به‌دست آورد. مدل تحلیلی دیگری که در واقع حالت ساده شده‌ای از مدل تحلیلی تیس با شرط $u \leq 0.01$ است، به شکل معادله (۴) می‌باشد (Jacob, 1944).

که در این رابطه نیز، t زمان از شروع پمپاژ (ثانیه)، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (متر)، s افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای (متر)، Q دبی پمپاژ (متر مکعب بر ثانیه)، S ضریب ذخیره و T ضریب قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد.

مدل‌ها و روش‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان محبوس با مشابه قرار دادن معادله جریان آب‌های زیرزمینی و جریان گرما، جریان شعاعی آب‌های زیرزمینی طبق معادله (۱) در مختصات قطبی به شکل معادله‌های (۲ و ۳) حل می‌شود (Theis, 1932).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (2)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (3)$$

در این معادلات، t زمان از شروع پمپاژ (ثانیه)، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (متر)، s افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای (متر)، Q دبی پمپاژ (متر مکعب بر ثانیه)، u و $W(u)$ تابع چاه، S ضریب ذخیره و T ضریب قابلیت انتقال آبخوان است.

مدل‌ها و روش‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد

نیومن^۱ وقوع پدیده زهکشی تأخیری را وابسته به مؤلفه قائم جریان در آبخوان آزاد معرفی نمود و با فرض وقوع زهکشی آبی در آبخوان آزاد، پاسخ آبخوان به پمپاژ را تابعی از نسبت ناهم‌سویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی (K_z/K_r)، فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (r) و ضخامت اشباع آبخوان (b) معرفی کرد (Neuman, 1972). از آنجایی که روش تحلیلی نیومن در قیاس با سایر مدل‌های تحلیلی ارائه شده، پرکاربردتر است، در نتیجه در این پژوهش مبنای ارزیابی قرار گرفته و از معادلات تحلیلی مدل مذکور استفاده شده است. نیومن معتقد بود که معادله (۲) باید به صورت زیر نوشته شود:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u_a, u_y, \eta) \quad (5)$$

$$u_a = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (6)$$

$$u_y = \frac{r^2 S_y}{4Tt} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{r^2 K_z}{b^2 K_r} \quad (8)$$

$$T = K_r b \quad (9)$$

در این روابط، K_r برابر با ضریب هدایت هیدرولیکی افقی، K_z ضریب هدایت هیدرولیکی قائم، S ضریب ذخیره، S_y آبدهی ویژه، b ضخامت ناحیه اشباع سفره، r فاصله افقی چاهک مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ و t مدت زمان طی شده از شروع پمپاژ است. پارامتر u_a متناظر با زمان‌های اولیه پمپاژ و پارامتر u_y متناظر با زمان‌های بلندمدت پمپاژ است و مقادیر عددی تابع $W(u_a, u_y, \eta)$ برحسب مقادیر مختلف u_a ، u_y و η در قالب منحنی‌های نمونه نیومن ارائه شده است (شکل ۲).

از روش انطباق بر منحنی‌های شاخص یا نمونه به‌صورت دو مرحله‌ای، به‌منظور تخمین مشخصه‌های اصلی هیدرودینامیک آبخوان آزاد (S ، T ، K ، S_y) بر اساس معادلات ارائه شده توسط نیومن (استفاده شده است؛ بدین‌صورت که اطلاعات یا داده‌های زمان‌های ابتدایی آزمون پمپاژ بر قسمت اول منحنی‌های شاخص و داده‌های زمان‌های بلندمدت پمپاژ بر قسمت انتهایی منحنی‌های شاخص نیومن انطباق می‌یابند و سپس با انتخاب نقطه تطابق، مشخصه‌های هیدرودینامیک آبخوان شامل K_r ، K_z ، S و S_y تخمین زده می‌شوند.

تئوری تحلیل داده‌های ژئوالکتریک در آبخوان آزاد

ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیک یک آبخوان با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک، به‌دلیل سهولت اجرا و کم‌هزینه بودن، کمک شایانی به مطالعات هیدروژئولوژیکی می‌کند. پارامترهایی مانند عمق،

جهت جریان آب زیرزمینی، ضخامت لایه آبدار و محدوده سفره آبدار را می‌توان مستقیماً از تفسیر نتایج ژئوالکتریک به‌دست آورد. از طرف دیگر با توجه به تشابه خصوصیات جریان آب زیرزمینی و جریان الکتریکی در محیط متخلخل (تشابه قانون دارسی و اهم) و ارتباط بین پارامترهای ژئوالکتریک و هیدروژئولوژی، می‌توان سایر پارامترهای هیدروژئولوژیکی (مثل S_y) را نیز تخمین زد. با داشتن مقاومت الکتریکی آب موجود در فضاها ρ_w و مقاومت الکتریکی کل در زون‌های اشباع (ρ_{sat}) و غیراشباع (ρ_{unsat}) آبخوان و با استفاده از معادله (۱۰)، می‌توان آبدهی ویژه سفره آبدار (S_y) را به‌دست آورد.

$$S_y = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{sat}} \right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{unsat}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (10)$$

که در این روابط کلیه مقادیر m و n برحسب اهمیت متر (Ωm) و پارامترهای m و n مربوط به درجه سیمانی شدن دانه‌های تشکیل دهنده سفره آبدار هستند، مقدار m برای هر نمونه متفاوت است و در بیشتر رسوبات آبرفتی سخت نشده متخلخل، از قانون اولیه آرچی پیروی می‌کند (Archie, 1942).

مقاومت الکتریکی آب موجود در فضاها ρ_w را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی (EC) برحسب میکروموس بر سانتی‌متر ($\mu mhos/cm$) در چاه‌های آب مجاور نقاط سونداژهای ژئوالکتریک و با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه کرد.

$$\rho_w = \frac{10^4}{EC} \quad (11)$$

میزان تخلخل لایه آبدار را می‌توان با ارزیابی فاکتور سازند (F) تخمین زد. برای اولین بار آرچی در سال ۱۹۴۲ فاکتور سازند را با استفاده از رابطه (۱۲) برای محیط‌های اشباع از آب شور و نسبتاً تمیز (مانند سنگ‌های کوارتزی و کربنات‌های فاقد رس) محاسبه کرد و سپس با استفاده از رابطه (۱۳) میزان تخلخل ($\emptyset$) را تخمین زد.

$$F = \frac{\rho_{sat}}{\rho_w} \quad (12)$$

$$F = a \emptyset^{-m} \quad (13)$$

در سفره‌های آبدار فاقد رس، فاکتور سازند تنها به تخلخل و پیچیدگی خلل و فرج محیط بستگی دارد که حاکی از میزان تخلخل آن است (Nakhaei & Lashkaripour, 2004).

نتایج و بحث

داده‌های آزمایش پمپاژ و سونداژهای ژئوالکتریک در محدوده مطالعاتی به‌وسیله نرم‌افزارهای IPI2win، aquifer test و روابط مربوط به هر دو روش تفسیر و تحلیل گردید و در نهایت ضرایب هیدرودینامیک هر دو روش استخراج و با همدیگر مقایسه شدند.

تحلیل آزمون پمپاژ در آبخوان محدوده مطالعاتی و استخراج ضرایب هیدرودینامیک

در محدوده مطالعاتی داده‌های آزمایش پمپاژ دو چاه اکتشافی موجود است (جدول ۱) که با استفاده از اطلاعات این دو چاه پمپاژ، تجزیه و تحلیل داده‌ها به وسیله روش کوپر-ژاکوب که مخصوص آبخوان‌های محبوس است انجام شده است و در نهایت به وسیله روش نیومن که مختص آبخوان‌های آزاد می‌باشد ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده است.

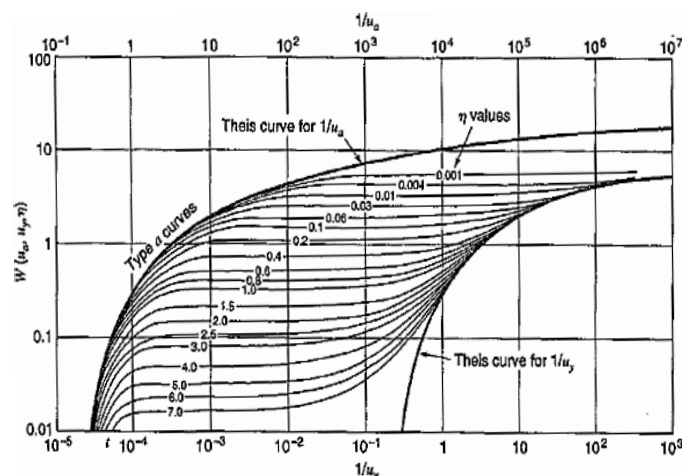
در روش کوپر ژاکوب داده‌های زمان - افت در محور نیمه لگاریتمی ترسیم و خطی که بر روی نقاط بهترین انطباق را داشته باشد تا جایی که محور افقی زمان را قطع کند ادامه می‌یابد، در این نقطه که مقدار افت صفر در نظر گرفته می‌شود می‌توان زمان شروع افت (t_0) را به دست آورد و در ادامه با استفاده از رابطه ۴ و نرم‌افزار aquifer test مقادیر ضریب ذخیره (S) و ضریب قابلیت انتقال (T) را محاسبه کرد (شکل ۳).

در جدول ۲ مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش ژاکوب آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر هدایت هیدرولیکی برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به ترتیب $4/9$ و $5/7$ و مقادیر ضریب ذخیره نیز به ترتیب برای چاه شماره یک و دو $0/15$ و

$0/21$ می‌باشد. طبق روابط کوپر-ژاکوب هرگاه مقادیر ضریب ذخیره بیشتر از $0/01$ باشد آبخوان از نوع آزاد است که در مطالعه حاضر مقادیر ضریب ذخیره برای هر دو چاه پمپاژ نشان‌دهنده این است که آبخوان از نوع آزاد می‌باشد.

از آنجایی که آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی از نوع آزاد می‌باشد، نقش پدیده زهکشی تأخیری و مؤلفه قائم جریان نیز باید در نظر گرفته شود و بنابراین، بر اساس مدل تحلیلی نیومن و با کمک روابط ۵ تا ۹ به وسیله نرم‌افزار Aquifer test آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴).

از مقایسه دو روش کوپر-ژاکوب و نیومن برای آبخوان آزاد شمال شرق گچساران می‌توان به این نتیجه رسید که روش نیومن که مختص آبخوان‌های آزاد است بهتر و مؤثرتر است. پس از ترسیم نمودار لگاریتمی افت-زمان نیومن، از قسمت اول منحنی مقادیر آبدی ویژه (Sy) برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به ترتیب $0/05$ و $0/04$ به دست آمده است که مربوط به آبدی تأخیری می‌باشد. از قسمت دوم منحنی مقادیر ضریب ذخیره برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به ترتیب $0/15$ و $0/21$ به دست می‌آید. در جدول ۳ مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش نیومن در چاه‌های پمپاژ آبخوان آورده شده است.



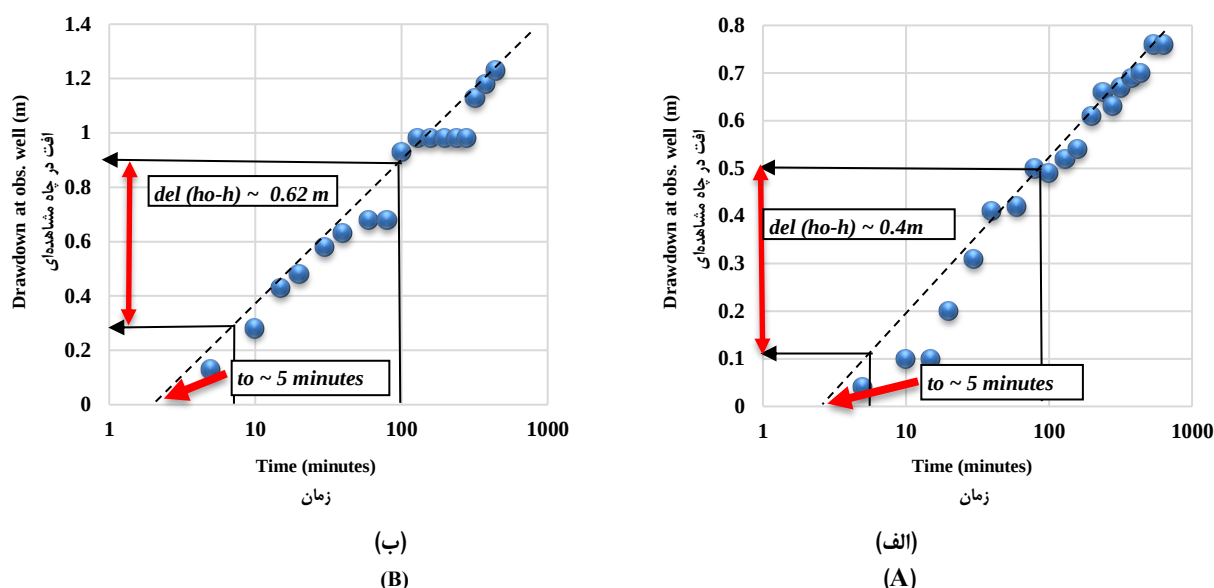
شکل ۲- منحنی نظری تابع چاه W (u_a, u_y, η) در برابر 1/u_a و 1/u_y برای آبخوان آزاد (Neuman, 1972)

Figure 2- Family of Neuman type curves: W(u_a, u_y, η) versus 1/u_a and 1/u_y for unconfined aquifer

جدول ۱- داده‌های چاه‌های پمپاژ در آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران

Table 1- The data of pumping wells in the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

شماره چاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	عمق چاه	ضخامت اشباع آبخوان	دبی پمپاژ	فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ	حداکثر افت
Well No.	Longitude [X (UTM)]	Latitude [Y (UTM)]	Well depth (m)	Aquifer saturated thickness [b (m)]	Discharge flow rate [Q (m ³ /d)]	Distance of the observation well from the pumping well [r (m)]	Max of drawdown (m)
1	490198	3356156	200	66	2678.4	20	1.23
2	496428	3353645	200	115	2376	20	0.76



شکل ۳- موقعیت داده‌های افت- زمان بر روی نمودار نیمه لگاریتمی ژاکوب و به‌دست آوردن t_0 و s برای چاه پمپاژ ۱ (الف) و چاه پمپاژ ۲ (ب)
Figure 3- The location of pumping test data on the Jacob time-drawdown semi-log plot and the determination of t_0 and s for pumping well 1 (a) and pumping well 2 (b)

جدول ۲- مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش ژاکوب در چاه‌های پمپاژ آبخوان ابرفتی شمال شرقی گچساران

Table 2- Computational values of hydrodynamic coefficients by Jacob's method in pumping wells of alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran city

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	دبی پمپاژ Discharge flow rate [Q (m ³ /d)]	زمان شروع افت Time intercept for zero drawdown [t ₀ (min)]	فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ Distance of the observation well from the pumping well [r (m)]	قابلیت انتقال Transmissivity T(m ² /day)	هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity K(m/day)	ضریب ذخیره Storage Coefficient S
1	490198	3356156	1.86	5	20	323	4.9	0.015
2	496428	3353645	1.65	5	20	655.5	5.7	0.021

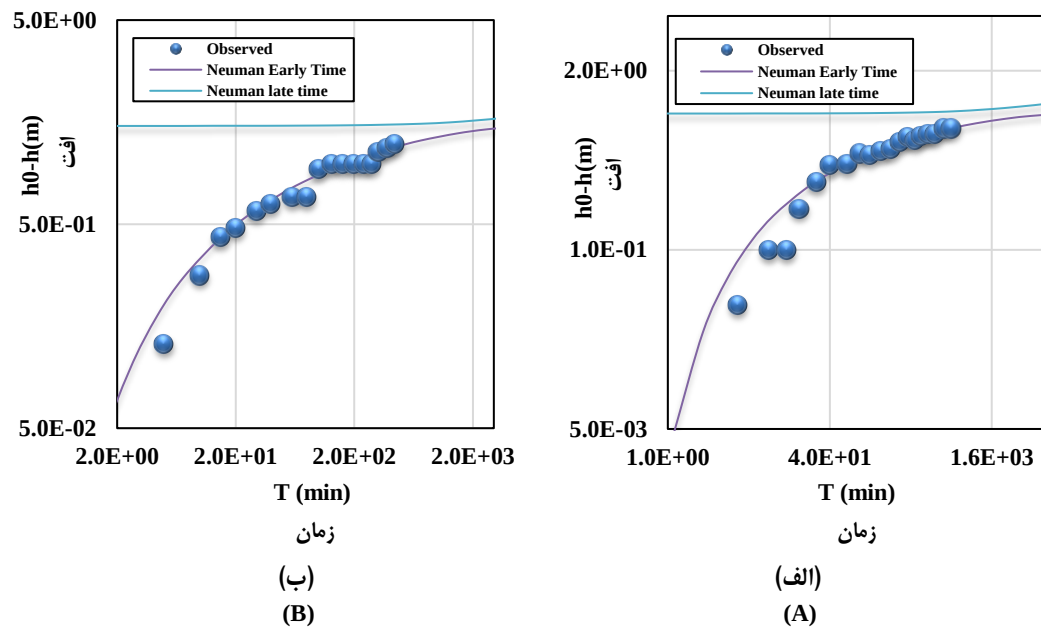
ذرات نسبت به هم، درجه سیمانی شدن و تراکم رسوبات بستگی دارد. از آنجایی که نهشته‌های رسوبی در آبخوان ابرفتی محدوده مورد مطالعه، از نوع رسوبات سخت نشده با جورشدگی نسبتاً ضعیف هستند؛ در نتیجه، در تحقیق حاضر مقادیر m و n به‌ترتیب برابر ۱/۵ و ۲ فرض شده است (Rostami & Hassani-Giv, 2011). با در دست داشتن مقادیر m و n و استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳، می‌توان فاکتور سازند (F) و مقادیر تخلخل را محاسبه و برای نقاط مختلف آبخوان درون‌یابی کرد (جدول ۴). کمینه و بیشینه مقدار تخلخل در آبخوان مورد مطالعه به‌ترتیب حدود ۰/۱۵ در ناحیه شرقی و جنوب شرقی آن (محل خروجی دشت) و حدود ۰/۴۱ در بخش میانی، شمالی و

تحلیل داده‌های ژئوالکتریک آبخوان و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی

از نرم‌افزار IPI2win (Bobachev, 2002) و روش یکسان‌سازی منحنی جزئی معمولی برای تحلیل و تفسیر اولیه اطلاعات سونداژ الکتریکی قائم (VES) استفاده شد؛ به‌طوری‌که مقاومت و ضخامت تخمینی لایه بدست آمد. بنابراین، کمی کردن نتایج سونداژ عمقی ژئوالکتریک با استفاده از مقاومت لایه مربوطه و ویژگی‌های آب منفذی امکان‌پذیر بود.

کمیت تخلخل (θ) در مطالعات هیدروژئولوژی اهمیت بسیاری دارد و میزان آن در مواد رسوبی به شکل، اندازه و وضعیت قرارگیری

شمال غرب منطقه (در مجاورت با سازند آسماری) می‌باشد. مقدار متو سط تخلخل در این آبخوان، به‌طور تقریبی ۲۶ در صد تخمین زده می‌شود (شکل ۵).



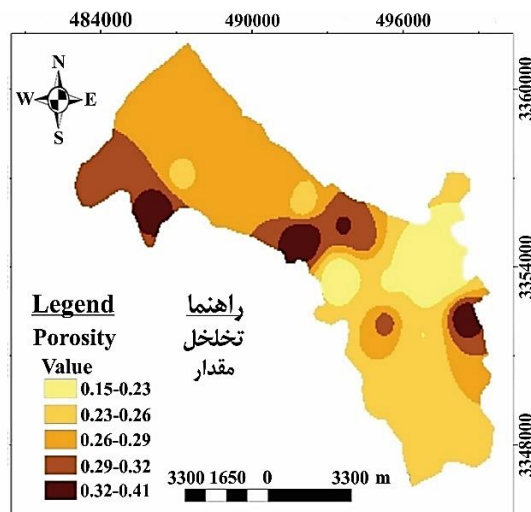
شکل ۴- موقعیت نقاط زمان-افت در نمودار لگاریتمی نیومن، برای چاه‌های پمپاژ ۱ (الف) و ۲ (ب)

Figure 4- the location of pumping test data on the Neuman time-drawdown log-log plot for pumping well 1 (a) and pumping well 2 (b)

جدول ۳- مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش نیومن در چاه‌های پمپاژ آبخوان ابرفتی شمال شرق گچساران

Table 3- Computational values of hydrodynamic coefficients by Neuman's method in pumping wells of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	دبی پمپاژ Discharge flow rate [Q (m ³ /d)]	η	r (m)	b (m)	T (m ² /day)	K (m/day)	S	S_y
1	490198	3356156	1.86	5	20	66	323	4.9	0.01 5	0.05
2	496428	3353645	1.65	5	20	115	655.5	5.7	0.02 1	0.04



شکل ۵- نقشه میزان تخلخل آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 5- Porosity map of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer

گردید (Ahmadi, 2008). رابطه تجربی بین هدایت هیدرولیکی (K) و فاکتور سازند (F) با استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌ای با ضریب همبستگی برابر ۰/۸۵ به دست آمد (شکل ۷).

$$Y = -0.1x^2 + 2.05x - 4.5 \quad (14)$$

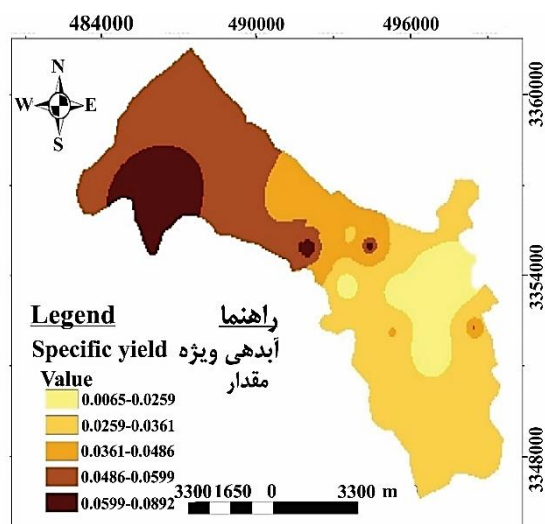
به منظور تخمین مقدار ضریب قابلیت انتقال، از هدایت هیدرولیکی (K) به دست آمده از معادله ۱۴ در موقعیت چاه‌ها (شکل ۸)، ضخامت آبخوان (b) به دست آمده از مطالعات ژئوالکتریک و همچنین عمق چاه‌های اکتشافی که تا سنگ کف آبخوان حفاری شده‌اند استفاده می‌شود (شکل ۹). بنابراین بر اساس معادله ۱۵ مقدار ضریب قابلیت انتقال در موقعیت چاه‌ها به دست می‌آید و برای کل آبخوان درونیابی می‌گردد (شکل ۱۰).

$$T = Kb = (K = -0.1x^2 + 2.05x - 4.5) \times b \quad (15)$$

در معادله بالا، K هدایت هیدرولیکی افقی، T ضریب قابلیت انتقال آبخوان و b ضخامت اشباع آبخوان می‌باشد.

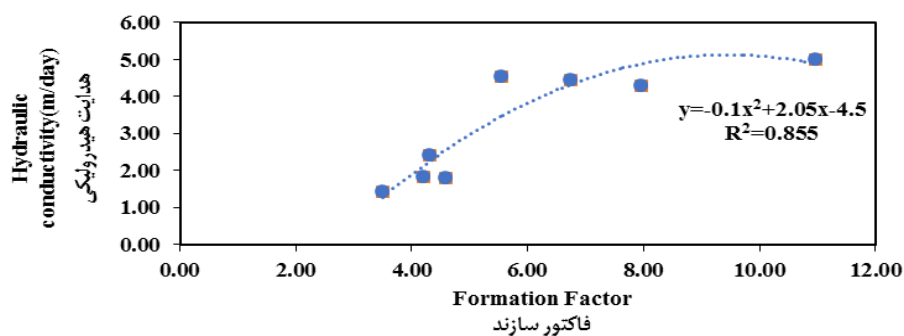
برای تخمین مقادیر آبدهی ویژه (sy)، داده‌های ژئوالکتریک حاصل از ۸۶ سونداژ قائم ژئوالکتریکی (آرایه شلومبرژه بر اساس ۴ فاصله الکترودهای جریان ۱۰۰، ۲۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ متری) با استفاده از نرم‌افزار IPI2win تحلیل و سپس با توجه به عمق سطح ایستابی سفره آبدار، مقاومت در دو زون اشباع (psat) و غیراشباع (punsat) آبخوان به دست آمد. در ادامه مقادیر مقاومت الکتریکی کل در زون‌های اشباع و غیراشباع آبخوان برای محل چاه‌هایی که مقدار هدایت الکتریکی آب آن‌ها در دسترس است استخراج و با استفاده از رابطه (۱۰)، آبدهی ویژه به دست آمد (جدول ۴). حداقل و حداکثر آبدهی ویژه به ترتیب ۰/۰۰۶ (در نواحی شرق و جنوب شرقی) و ۰/۰۸۹ (در نواحی غرب و شمال غربی دشت) و متوسط آن حدود ۰/۰۴ تخمین زده شد (شکل ۶).

برای به دست آوردن ضریب قابلیت انتقال در محل چاه‌ها نمودار هدایت هیدرولیکی به دست آمده از دو روش اجرای مدل و آزمون پمپاژ اصلاحی در مقابل فاکتور سازند که از معادله ۹ استخراج شده ترسیم



شکل ۶- نقشه آبدهی ویژه آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 6- Specific yield map of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer

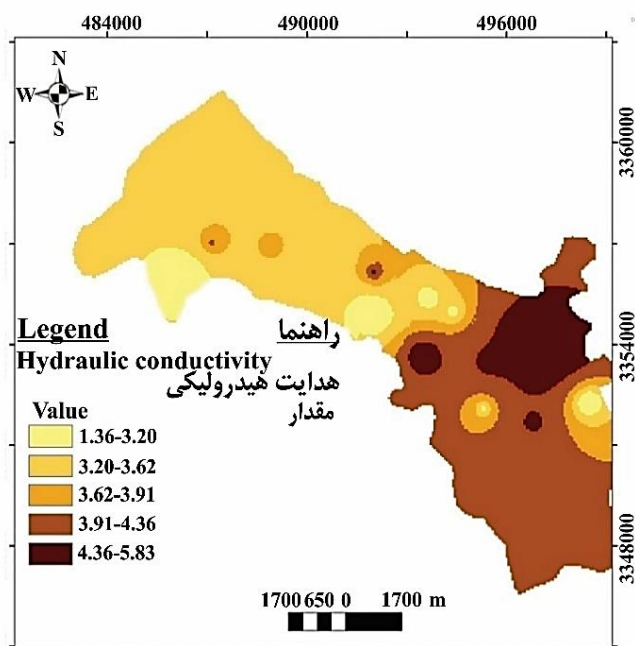


شکل ۷- نمودار هدایت هیدرولیکی در مقابل فاکتور سازند

Figure 7- Plot of hydraulic conductivity versus formation factor

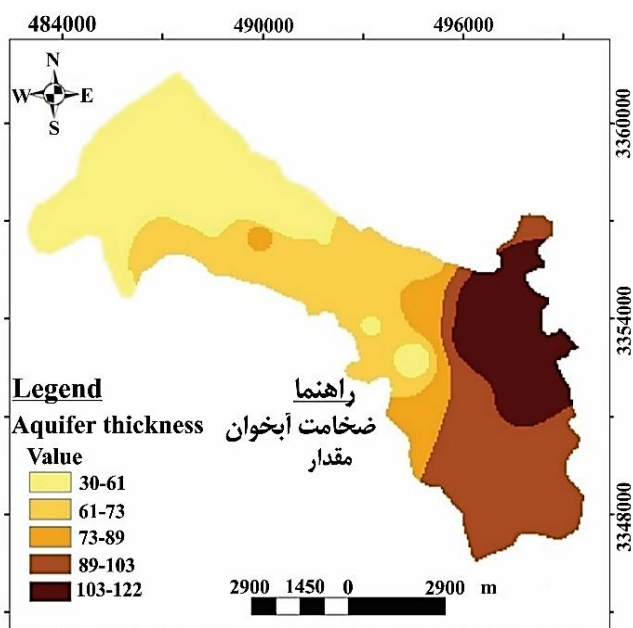
شده است. لازم به ذکر است که نقشه‌های هم قابلیت انتقال دشت به طور معمول ثابت نیستند و با گذشت زمان و تغییر تراز سطح ایستابی (تغییر ضخامت آبخوان) تغییر می‌نمایند؛ بنابراین، در صورت تغییرات فاحش سطح ایستابی باید به روزرسانی گردند.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد حداقل و حداکثر ضریب قابلیت انتقال به ترتیب ۶۳ متر مربع بر روز (در نواحی غرب و شمال غربی دشت) و ۶۰۸/۹ متر مربع بر روز (در نواحی شرق و جنوب شرقی) و متوسط آن حدود ۳۲۳/۷ متر مربع بر روز تخمین زده



شکل ۸- نقشه هدایت هیدرولیکی (K، متر بر روز) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 8- Hydraulic conductivity (m/day) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City



شکل ۹- نقشه ضخامت اشباع (b(متر)) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

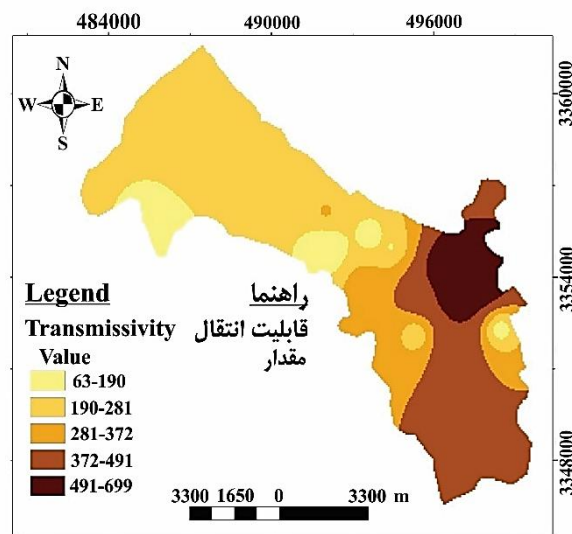
Figure 9- Saturated thickness (b(m)) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

ضریب قابلیت آبخوان (T) و هدایت هیدرولیکی (K) که از روش آزمایش پمپاژ استخراج گردیده است به مقادیر عددی روش ژئوالکتریک بسیار نزدیک می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که روش ژئوالکتریک قادر به تخمین قابل قبولی از پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان (ضرایب هیدرودینامیک) می‌باشد.

مقایسه نتایج به دست آمده از طریق روش ژئوالکتریک و

آزمون پمپاژ

در جدول ۵ ضرایب هیدرودینامیک به دست آمده از هر دو روش آزمایش پمپاژ و روش ژئوالکتریک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر عددی آبدهی ویژه (Sy)،



شکل ۱۰- نقشه ضریب قابلیت انتقال (بر حسب متر مربع بر روز) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 10- Transmissivity coefficient (m^2/day) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

جدول ۴- آبدهی ویژه، فاکتور سازند، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ضریب قابلیت انتقال دشت به روش ژئوالکتریک

Table 4- the values of specific yield, formation factor, porosity, hydraulic conductivity, and transmissivity in the aquifer obtained by the geoelectric method

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	هدایت الکتریکی Electrical conductivity E_{cw} ($\mu mhos/cm$)	ρ_{sat}	ρ_{unsat}	ρ_w	F	Sy	Φ	K (m/day)	T (m^2/day)
W1	487140	3357030	857	68.9	140.4	11.67	5.9	0.076	0.05	1.8	115.75
W2	486290	3356030	1130	33.9	61.3	8.85	3.8	0.091	0.02	4.11	265.35
W3	488910	3356910	420	132.1	200	23.81	5.54	0.05	0.02	3.8	228.44
W4	491200	3356500	428	121.9	160.9	23.36	5.21	0.036	0.03	3.5	211.11
W5	492000	3356160	572	116.3	180.4	17.48	6.65	0.045	0.01	4.7	289.62
W6	493650	3355370	406	100	118.7	24.63	4.06	0.027	0.04	1	62.63
W7	493501	3353713	1220	90	93	8.2	10.98	0.002	0.03	5.6	358.28
W8	494400	3354980	438	100	180	22.83	4.38	0.081	0.03	2.2	144.98
W9	498460	3352280	795	43.9	59.6	12.58	3.49	0.054	0.06	2.5	188.52
W10	496550	3354320	631	150	194.6	15.85	9.46	0.021	0.04	2.8	222.5
W11	495472	3353505	906	77.7	83.6	11.04	7.03	0.008	0.04	4.9	470.32
W12	496801	3351690	1606	42	44	6.23	6.74	0.005	0.02	5.9	699.07
W13	497010	3353350	837	95	100	11.95	7.95	0.005	0.01	4.7	490.06
W14	497810	3353870	1120	100.3	110.4	8.93	11.23	0.007	0.04	5.4	620.6
W15	492006	3354906	508	61.9	100	19.69	3.14	0.088	0.02	5.9	661.25
W16	495300	3352100	1047	43.9	59.6	9.55	4.59	0.043	0.02	1.4	152.21

جدول ۵- مقایسه نتایج به دست آمده از طریق روش آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک

Table 5- A Comparison between the results obtained through pumping test and geoelectric methods

شماره چاه Well No.	K(m/d)		T(m^2/d)		Sy	
	PT*	VES*	PT	VES	PT	VES
1	4.9	3.6	323	237	0.05	0.05
2	5.7	5.5	655.5	632.5	0.04	0.03

*PT: Pumping Test, VES: Vertical Electrical Sounding

نتيجه گيري

يكي از قابل اعتمادترين روش ها براي اندازه گيري ضرايب هيدروديناميك آبخوان، آزمائش پمپاژ است. مزيت اين روش دقت بالاي آن و عيب اين روش هزينه بالاي آن است؛ با اين حال روش هاي ژئوفيزيكي تكنيكي مؤثر براي ارزيابي و کاهش تعداد آزمائش هاي پمپاژ مي باشد. ژئوفيزيك توانسته است با صرفه جويي در هزينه ها و زمان و قابليت استفاده در ليتولوژي هاي متنوع كمك قابل توجه اي در تخمين پارامترهاي هيدروديناميكي آبخوان داشته باشد. در اين تحقيق ابتدا ضرايب هيدروديناميك سفره آبدار با دو روش تحليلي آزمائش پمپاژ، عبارتند از كوپر- ژاكوب و نيومن، محاسبه شد و پس از ارزيابي و مقايسه نتايج، روش نيومن، به دليل اينكه مختص آبخوان هاي آزاد است و علاوه بر ضريب ذخيره، مقادير آبدهي ويژه (S_y) را نيز به ما مي دهد بهتر و مناسب تر تشخيص داده شد. مقادير آبدهي ويژه (S_y) به روش نيومن براي چاه پمپاژ شماره يك و دو به ترتيب 0.05 و 0.03 و مقادير ضريب ذخيره نيز براي چاه پمپاژ شماره يك و دو به ترتيب 0.15 و 0.21 به دست مي آيد. در گام بعد، پس از تحليل داده هاي ژئوالكتريك آبخوان با نرم افزار IPI2win و استخراج ضرايب هيدروديناميك سفره آبدار با روابط آرچي، حداقل و حداكثر آبدهي ويژه (S_y) به ترتيب 0.06 (در نواحي شرق و جنوب شرقي) و 0.09 (در نواحي غرب و شمال غربي دشت) و متوسط آن حدود 0.04 تخمين زده شد. حداقل و حداكثر ضريب قابليت انتقال نيز به ترتيب 63 (در نواحي غرب و شمال غربي دشت) و $608/9$ (در نواحي شرق و جنوب شرقي) و متوسط آن حدود $323/7$ متر مربع بر روز به دست آمد. ارزيابي و مقايسه نتايج هر دو روش حاكي از اين است كه ضرايب حاصل از روش ژئوالكتريك توسط آزمون پمپاژ تايد مي شود. به عبارت ديگر، از نتايج به دست آمده از آزمون پمپاژ چاه هاي شماره يك و دو به روش نيومن در آبخوان آزاد معلوم گرديد كه ضريب قابليت انتقال براي چاه شماره دو كه در قسمت شرقي آبخوان قرار دارد مقدار بيشترى است كه با نتايج روش ژئوالكتريك همخواني دارد و همچنين

مقدار آبدهي ويژه در روش آزمون پمپاژ چاه شماره يك مقدار بيشترى است كه باز هم روش ژئوالكتريك آن را تايد مي كند.

چنين رويكردهاي تركيبى شامل تجزيه و تحليل همزمان روش هاي ژئوفيزيكي (مانند VES) و آزمائش پمپاژ جايگزين عالي براي آزمائش هاي متعدد و پرهزينه پمپاژ براي ارزيابي ضرايب هيدروديناميكي يك آبخوان خواهد بود. علاوه بر اين، به كارگيري اين تكنيك تركيبى امكان توليد ضرايب هيدروديناميكي متراكم را در يك آبخوان براي استفاده به عنوان ورودى در مدل هاي آب زيرزميني فراهم مي كند.

در نهايت بايد اشاره گردد كه اگرچه رويكردهاي ژئوفيزيكي به عنوان روش هايي غيرمخرب (عدم نياز به حفاري)، سريع، سازگار با محيط زيست، و با هزينه هاي كمتر از آزمائش پمپاژ براي بدست آوردن حجم زيادي از اطلاعات زيرسطحي، در چند دهه اخير مورد اقبال هيدرولوژيست ها براي تخمين پارامترهاي هيدروليكي آبخوان قرار گرفته اند، با اين حال نتايج بدست آمده از آنها نيز داراي عدم قطعيت هايي مي باشند. از مهمترين منابع عدم قطعيت مي توان به خطاي روش هاي حل وارون در مدل هاي ژئوفيزيكي، سطح صحت داده هاي ميداني، عدم قطعيت هاي زمين شناسي به دليل برداشت غيرمستقيم اطلاعات كه در برخي مناطق نياز به حفر گمانه وجود دارد، مفروضات مورد استفاده در روابط پتروفيزيكي كه متغير هاي اندازه گيري شده را به پارامترهاي ژئوالكتروهيدروليكي مرتبط مي كنند (نظير برآورد فاكتر سازند) اشاره نمود. لازم به ذكر است كه بهبود در روش هاي استخراج اطلاعات از داده هاي ژئوفيزيكي، استفاده از روش هاي مكمل (نظير IP و ...) و توسعه الگوريتم هاي حل وارون، اگرچه منجر به کاهش شديد عدم قطعيت هاي معمول مرتبط با تبديل عادي اطلاعات ژئوفيزيك به خواص هيدرولوژيكي و ساير استنتاج هاي مرتبط شده است، اما عدم قطعيت هاي مرتبط با فاكتر سازند (استخراج شده براي محيط هاي كاملاً اشباع و فاقد رس) همچنان به قوت خود باقي است.

References

1. Abdulrazzaq, Z.T., Al-Ansari, N., Ahmed Aziz, N., Agbasi, O.E., & Etuk, S.E. (2020). Estimation of main aquifer parameters using geoelectric measurements to select the suitable wells locations in Bahr Al-Najaf depression, Iraq. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100437>
2. Ahmadi, S. (2008). *Investigating and forecasting the fluctuations of the Imamzadeh Jafar plain aquifer in Gachsaran city with a perspective on the effects of artificial recharge and using the MODFLOW model*. Master Thesis in Hydrogeology, Science Faculty, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran. Iran. (In Persian with English abstract)
3. Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, 146(01), 54-62. <https://doi.org/10.2118/942054-G>
4. Arétouyap, Z., Bisso D., Méli'I, J.L., Nouck, F.N., Njoya, A., & Asfahani, J. (2019). Hydraulic parameters evaluation of the Pan-African aquifer by applying an alternative geoelectrical approach based on vertical electrical soundings. *Geofísica Internacional*, 58(2), 113-126. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2018.58.2.1964>
5. Bobachev, C. (2002). *IPI2Win: A windows software for an automatic interpretation of resistivity sounding data*. PhD Thesis, Moscow State University, Russia.
6. Calvache, M.L., Sánchez-Úbeda, J.P., Duque, C., López-Chicano, M., & de la Torre, B. (2016). Evaluation of analytical methods to study aquifer properties with pumping tests in coastal aquifers with numerical modelling (Motril-Salobreña Aquifer). *Water Resources Management*, 30, 559-575. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1177-6>
7. Chen, J., Hubbard, S., & Rubin, Y. (2001). Estimating the hydraulic conductivity at the South Oyster Site from geophysical tomographic data using Bayesian techniques based on the normal linear regression model. *Water Resources Research*, 37(6), 1603-1613. <https://doi.org/10.1029/2000WR900392>
8. Crestani, E., Camporese, M., & Salandin, P. (2015). Assessment of hydraulic conductivity distributions through assimilation of travel time data from ERT-monitored tracer tests, *Advances in Water Resources*, 84, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.022>
9. Darvishzadeh, A. (2003). *Geology of Iran*. 5th Edition, 902P, Amirkabir Publication, Tehran. (In Persian)
10. de Almeida, A., Maciel, D.F., Sousa, K.F., Nascimento, C.T.C., & Koide, S. (2021). Vertical electrical sounding (VES) for estimation of hydraulic parameters in the Porous aquifer. *Water*, 13(2), 170(1-15). <https://doi.org/10.3390/w13020170>
11. Falowo, O.O., Daramola, A.S., & Ojo, O.O. (2019). Aquifers hydraulic parameters measurement and analysis by pumping test. *American Journal of Water Resources*, 7(4), 146-154. <https://doi.org/10.12691/ajwr-7-4-3>
12. Frohlich, R.K., & Kelly, W.E. (1988). Estimates of specific yield with the geoelectric resistivity method in glacial aquifers. *Journal of Hydrology*, 97(1-2), 33-44. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90064-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90064-9)
13. George, N.J., Ibuot, J.C., & Obiora, D.N. (2015). Geoelectrohydraulic parameters of shallow sandy aquifer in Itu, Akwa Ibom State (Nigeria) using geoelectric and hydrogeological measurements. *Journal of African Earth Sciences*, 110, 52-63. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.06.006>
14. Hasan, M., Shang, Y., Jin, W., & Akhter, G. (2019). Assessment of aquifer vulnerability using integrated geophysical approach in weathered terrains of South China. *Open Geosciences*, 11, 1129-1150. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0087>
15. Hasan, M., Shang, Y., Jin, W., & Akhter, G. (2021). Estimation of hydraulic parameters in a hard rock aquifer using integrated surface geoelectrical method and pumping test data in southeast Guangdong, China. *Geosciences Journal*, 25, 223-242. <https://doi.org/10.1007/s12303-020-0018-7>
16. Hatami Golmakani, P., Sheikh, V.B., & Hosseinalizadeh M. (2017). The effect of measurement methods on saturated hydraulic conductivity in eastern loess lands of Golestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 6(4), 87-102. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/ejsms.2017.10322.1614>
17. Huntley, D. (1986). Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. *Groundwater*, 24(4), 466-474. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1986.tb01025.x>
18. Ige, O., Obasaju, D., Baiyegunhi, C., Ogunsanwo, O., & Baiyegunhi, T. (2018). Evaluation of aquifer hydraulic characteristics using geoelectrical sounding, pumping and laboratory tests: A case study of Lokoja and Patti Formations, Southern Bida Basin, Nigeria. *Open Geosciences*, 10(1), 807-820. <https://doi.org/10.1515/geo-2018-0063>
19. Jacob, C.E. (1944). *Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions*. US Geological Survey open-file report. 1945, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA. Partial penetration of pumping well, adjustments for: US Geol. Survey open-file report. 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well: Am. Soc. Civil Eng. Trans. 1944;112:1047-70.

20. Kazakis, N., & Vargemezis, G. (2016). Voudouris K.S., Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of The Total Environment*, 550, 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>
21. Lashkaripour, Gh., Yazdanpanah, F., & Ansari, Kh. (2013). *Investigating the relationship between permeability coefficient (k) and gradation and proposing the empirical formula*. In 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment, 6 November 2013, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
22. Lekone, O.S., Tafesse, N.T., Ranganai, R.T., Laletsang, K., & Masaka, T.L. (2023). Estimation of Aquifer Hydraulic Parameters Using Geo-electric Method in the Dukwi Wellfields, North-eastern Botswana, PREPRINT (Version 1) available at *Research Square*, 1-27. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3052755/v1>
23. Minutti, C., Illman W.A., & Gomez S. (2020). A New Inverse Modeling Approach for Hydraulic Conductivity Estimation Based on Gaussian Mixtures. *Water Resources Research*, 56(9), 1-21. <https://doi.org/10.1029/2019WR026531>
24. Nakhaei, M., & Lashkaripour, Gh. (2004). Estimation of Porosity and Specific yield of Shooru Aquifer by Resistivity method. *Journal of Science* (Tarbiat Moalem University), 3(1), 191-202. (In Persian)
25. Neuman, S.P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, 8(4), 1031-1045. <https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031>
26. Perdomo, S., Ainchil, J.E., & Kruse, E. (2014). Hydraulic parameters estimation from well logging resistivity and geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 105, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.02.020>
27. Rostami, A., Hassani-Giv, M. (2011). Investigating the relationship between cementation and porosity as determined by core analysis and comparing it to Shell and Borai's experimental relationships in one of the dolomite reservoirs in southwest Iran. *Scientific Journal of Oil and Gas Exploration and Production*, 82, 61-65. (In Persian)
28. Schimschal, U. (1981). The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the brantley damsite, New Mexico. *Geos exploration*, 19(2), 115-125. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(81\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90024-7)
29. Song, X.M., Kong, F.Z., & Zhan, S. (2011). Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin city of China. *Water Resources Management*, 25, 857-873. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9730-9>
30. Taheri-tizro, A.T., Voudouris, K., & Basami, Y. (2012). Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method—a case study in western Iran. *Journal of Hydrology*, 454, 160-172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.009>
31. Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 16(2), 519-524. <https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519>
32. Ullah, F., Su, L.J., Ullah, H., & Asghar, A. (2020). Estimation of hydraulic parameters of an unconfined aquifer by using geoelectrical and pumping test data: a case study of the Mandi Bahauddin District, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 484. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05488-3>
33. Urish, D.W. (1981). Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. *Water Resources Research*, 17(5), 1401-1408. <https://doi.org/10.1029/WR017i005p01401>
34. Vogeler, I., Carrick, S., Cichota, R., & Lilburne, L. (2019). Estimation of soil subsurface hydraulic conductivity based on inverse modelling and soil morphology. *Journal of Hydrology*, 574, 373-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.002>
35. Vu, M.T., & Jardani, A. (2022). Mapping of hydraulic transmissivity field from inversion of tracer test data using convolutional neural networks. CNN-2T, *Journal of Hydrology*, 606, 127443, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127443>
36. Yeh, Y.J., Lee, C.H., & Chen, S.T. (2000). A tracer method to determine hydraulic conductivity and effective porosity of saturated clays under low gradients. *Groundwater*, 38, 522-529. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00244.x>
37. Youssef, M.A.S. (2020). Geoelectrical analysis for evaluating the aquifer hydraulic characteristics in Ain El-Soukhna area, West Gulf of Suez, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 9(1), 85-98. <https://doi.org/10.1080/20909977.2020.1713583>

Contents

Evaluation and Comparison of Satellite Rainfall Products in Mountainous Areas with Lack of Meteorological Data of Lorestan Province	429
M. Fallahi Khoshhi, A.R. Karbalaee Doree, Z. Hedjazizadeh, P. Hamezadeh	
Investigating the Effect of Tillage and Fertilization on the Yield and Yield Components of Safflower (<i>Carthamus tinctorius</i>) under Rainfed Conditions	445
D. Parmah, H.R. Chaghazardi, F. Mondany, A. Beheshti Ale Agha, D. Kahrizi	
The Effect of Clay Minerals and Exchangeable Cations on Organic Nitrogen Mineralization	463
F. Rakhsh, A. Golchin, A. Beheshti Ale Agha	
Digital Land Suitability Assessment for Irrigated Cultivation of Some Agricultural Crops Using Machine Learning Approaches (Case Study: Qazvin-Abyek)	479
F. Jannati, F. Sarmadian	
Release of Zinc, Manganese and Magnesium from Mg-Zn-Mn-Al-LDH: Effect of Malic Acid and Divalent to Trivalent Cation Ratios in Mineral Structure	495
Z. Movahedi Rad, M. Hamidpour	
Evaluation of Potassium Status in the Soils of Oak Forests of Kohgilouye and Boyerahamad Province	511
Z. Barati, H.R. Owliaie, E. Adhami, M. Najafi-Ghiri	
Evaluating Aquifer's Hydrodynamic Parameters Using Pumping Tests and Geoelectric Data (Case Study: Alluvial Aquifer in the Northeast of Gachsaran City)	525
A. Khedri, A. Saberinasr, N. Kalantari	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 38

No. 4

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).



Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

Vol. 38 No. 4

2024

ISSN:2008-4757

Contents

- Evaluation and Comparison of Satellite Rainfall Products in Mountainous Areas with Lack of Meteorological Data of Lorestan Province 429**
M. Fallahi Khoshhi, A.R. Karbalaee Doree, Z. Hedjazizadeh, P. Hamezadeh
- Investigating the Effect of Tillage and Fertilization on the Yield and Yield Components of Safflower (*Carthamus tinctorius*) under Rainfed Conditions 445**
D. Parmah, H.R. Chaghazardi, F. Mondany, A. Beheshti Ale Agha, D. Kahrizi
- The Effect of Clay Minerals and Exchangeable Cations on Organic Nitrogen Mineralization 463**
F. Rakhsh, A. Golchin, A. Beheshti Ale Agha
- Digital Land Suitability Assessment for Irrigated Cultivation of Some Agricultural Crops Using Machine Learning Approaches (Case Study: Qazvin-Abyek) 479**
F. Jannati, F. Sarmadian
- Release of Zinc, Manganese and Magnesium from Mg-Zn-Mn-Al-LDH: Effect of Malic Acid and Divalent to Trivalent Cation Ratios in Mineral Structure 495**
Z. Movahedi Rad, M. Hamidpour
- Evaluation of Potassium Status in the Soils of Oak Forests of Kohgilouye and Boyerahamad Province 511**
Z. Barati, H.R. Owliaie, E. Adhami, M. Najafi-Ghiri
- Evaluating Aquifer's Hydrodynamic Parameters Using Pumping Tests and Geoelectric Data (Case Study: Alluvial Aquifer in the Northeast of Gachsaran City) 525**
A. Khedri, A. Saberinasr, N. Kalantari