

عنوان مقالات

- ۳۵۵ ..... ارزیابی کارآیی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط تنش آبی ..... سعید شیخی سوغانلو - محمد موسوی بایگی - بنیامین ترابی - محمود رانینی
- ۳۶۹ ..... مدیریت و شبیه‌سازی مخزن چندمنظوره سد لتیان و ارزیابی عملکرد آن بر اساس سیاست بهره‌برداری در مقیاس زمانی روزانه ..... محمد بابایی - محمد تقی سناری
- ۳۸۵ ..... تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارهای شخم تحت شدت‌های مختلف باران ..... علی رضا واعظی - رعنا بیگدلی
- ۳۹۹ ..... اثر رهاسازی اراضی کشاورزی بر برخی خصوصیات بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک ..... مهرانگیز السادات ساداتی - علی بهشتی آل آقا - فردین حامدی
- ۴۱۷ ..... رابطه بین شیب دامنه و سنگ بستر با برخی از ویژگی‌های خاک ..... مهدی جعفریان - علی گلکاریان - حجت امامی
- ۴۳۳ ..... تأثیر نانو ذرات آهن مغناطیسی در توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیوم در یک خاک آلوده ..... سودابه نیکخونانی گل تپه - سرویس صادقی - مجتبی نورآئین - سید سیامک زواره
- ۴۴۵ ..... تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه ..... سیدحمیدرضا صادقی - مهین کله هوئی - علی نوری - نسترن نادری مرنگلو - معصومه هواسی - آراسته پای‌فشرده - مهدی خیرپرست - سحر مصطفایی یونجالی - زینب پیروزیانیا - معصومه حمزه‌بی‌بالانی
- ۴۵۹ ..... منشأیابی و ارزیابی آلودگی خاک‌های مرکزی استان خوزستان به برخی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی ..... نسیم صحرائی - احمد لندی - سعید حاجی - ادواردو پاسولی
- ۴۷۵ ..... بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) ..... نسترن ترابی نژاد - آذر زرین - عباسعلی داداشی رودباری
- ۴۸۹ ..... ارزیابی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس پایگاه داده WaPOR فانو در دشت قزوین ..... محدثه السادات فخار - عباس کاویانی

Contents

- Evaluating the SSM Model Efficiency in Simulating the Wheat Growth under Water Stress Conditions ..... 353  
S. Shiuikhy Soqanloo, M. Mousavi Baygi, B. Torabi, M. Raeini Sarjaz
- Management and Simulation of the Latian Multi-purpose Reservoir Dam and Its Performance Evaluation Based on the Operation Policy on Daily Time Scale ..... 367  
M. Babaei, M.T. Sattari
- The Effect of Raindrop Impact on Runoff and Soil Loss from Rills under Different Rainfall Intensities ..... 383  
A.R. Vaezi, R. Bigdeli
- The Effect of Land Abandonment on Biological, Physical and Chemical Properties of Soils ..... 397  
M.S. Sadati, A. Beheshti Ale Agha, F. Hamedei
- The Relationship between the Slope Hill and Bedrock with Some Soil Properties ..... 415  
M. Jafarian, A. Golkarian, H. Emami
- The Mutual Effect of Cadmium and Magnetic Iron Nanoparticles in the Distribution of Chemical Forms of Cadmium in a Contaminated Soil ..... 431  
S. Nikkhosani Gol Tapeh, S. Sadeghi, M. Nooraien, S. Zavareh
- Spatial Soil Erosion Risk at the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran ..... 443  
S.H.R. Sadeghi, M. Kalehhouie, A. Noori, N. Naderi Marangalo, M. Havasi, A. Payfeshoordeh, M. Khairparast, S. Mostafaei Younjali, Z. Pirooznia, M. Hamzeh Bibalani
- Assessment of Pollution in the Central Soils of Khuzestan Province with Potentially Toxic Elements (PTEs) and their Origins ..... 457  
N. Sahraei, A. Landi, S. Hojati, E. Pasolli
- Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) ..... 473  
N. Torabinezhad- A. Zarrin- A.A. Dadashi-Roudbari
- Evaluation of Evapotranspiration Rate and Water Productivity Based on FAO WaPOR Database in Qazvin Plain ..... 487  
M.S. Fakhar, A. Kaviani

# آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 37 شماره 3 مرداد - شهریور سال 1402

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول: رضا ولیزاده (استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

سر دبیر: امیر فتوت (استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

اوستان، شاهین	استاد- علوم خاک (دانشگاه تبریز)
بذرافشان، جواد	دانشیار- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)
تقوایان، صالح	استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، امریکا)
خراسانی، رضا	دانشیار- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
خرمالی، فرهاد	استاد- علوم خاک (دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان)
علیزاده، امین	استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)
فتوت، امیر	استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
قدیری، حسین	استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)
لکزیان، امیر	استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)
لیاقت، عبدالمجید	استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)
مساعدی، ابوالفضل	استاد- آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)
موسوی بایگی، محمد	استاد- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: [jswa3@um.ac.ir](mailto:jswa3@um.ac.ir)

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

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

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## مندرجات

- 355 ارزیابی کارآیی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط تنش آبی  
سعید شیوخی سوغانلو - محمد موسوی بایگی - بنیامین ترابی - محمود رائینی
- 369 مدیریت و شبیه‌سازی مخزن چندمنظوره سد لتیان و ارزیابی عملکرد آن بر اساس سیاست بهره‌برداری در مقیاس زمانی روزانه  
محمد بابایی - محمد تقی ستاری
- 385 تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارهای شخم تحت شدت‌های مختلف باران  
علی رضا واعظی - رعنا بیگدلی
- 399 اثر رهاسازی اراضی کشاورزی بر برخی خصوصیات بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک  
مهرانگیز السادات ساداتی - علی بهشتی آل آقا - فردین حامدی
- 417 رابطه بین شیب دامنه و سنگ بستر با برخی از ویژگی‌های خاک  
مهدی جعفریان - علی گلکاریان - حجت امامی
- 433 تأثیر نانو ذرات آهن مغناطیسی در توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیوم در یک خاک آلوده  
سودابه نیکخو ثانی گل تپه - سیروس صادقی - مجتبی نورآئین - سید سیامک زواره
- 445 تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه  
سیدحمیدرضا صادقی - مهین کله هوئی - علی نوری - نسترن نادری مرنگلو - معصومه هواسی - آراسته پای فشرده - مهدی خیرپرست - سحر مصطفایی یونجالی - زینب پیروزیان - معصومه حمزه‌بی‌بالانی
- 459 منشأیابی و ارزیابی آلودگی خاک‌های مرکزی استان خوزستان به برخی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی  
نسیم صحرائی - احمد لندی - سعید حجتی - ادواردو پاسولی
- 475 بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)  
نسترن ترابی نژاد - آذر زرین - عباسعلی داداشی رودباری
- 489 ارزیابی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس پایگاه داده WaPOR فائو در دشت قزوین  
محدثه السادات فخار - عباس کاویانی





## Evaluating the SSM Model Efficiency in Simulating the Wheat Growth under Water Stress Conditions

S. Shiukhy Soqanloo<sup>1\*</sup>, M. Mousavi Baygi<sup>2</sup>, B. Torabi<sup>3</sup>, M. Raeini Sarjaz<sup>4</sup>

Received: 01-01-2023

Revised: 18-01-2023

Accepted: 03-06-2023

Available Online: 03-06-2023

### How to cite this article:

Shiukhy Soqanloo, S., Mousavi Baygi, M., Torabi, B., & Raeini Sarjaz, M. (2023). Evaluating the SSM model efficiency in simulating the wheat growth under water stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 353-366. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237>

### Introduction

Wheat (*Triticum aestivum* L.) has become very important as a valuable strategic product with high energy level. The importance of investigating environmental stresses and their role in predicting and evaluating the growth and crops yield is essential. A wide range of plant response to stress is extended to morphological, physiological and biochemical responses. Considering the rapid advancement in computer model development, plant growth models have emerged as a valuable tool to predict changes in production yield. These growth simulation models effectively incorporate the intricate influences of various factors, such as climate, soil characteristics, and management practices on crop yield. By doing so, they offer a cost-effective and time-efficient alternative to traditional field research methods.

### Material and Methods

This research was conducted in the research farm of Varamin province, which has a silty loam soil texture. The latitude and longitude of the region are 35° 32' N and 51° 64' E, respectively. Its height above sea level is 21 meters. According to Demarten classification, Varamin has a temperate humid climate. The long-term mean temperature of Varamin is 11.18 ° C and the total long-term rainfall is 780 mm. In this study, in order to simulate irrigated wheat cv. Mehregan growth under drought stress, an experimental based on completely randomized blocks (CRBD) including: non-stress as control (NS), water stress at booting stage (WSB), water stress at flowering stage (WSF), water stress at milking stage (WSM) and water stress at doughing stage (WSD) with three replications during growth season 2019-2020 was carried out in Varamin, Iran. Crop growth simulation was done using SSM-wheat model. This model simulates growth and yield on a daily basis as a function of weather conditions, soil characteristics and crop management (cultivar, planting date, plant density, irrigation regime).

### Results and Discussion

Based on the results, the simulation of the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan under water stress condition using SSM-wheat model showed that there was no difference between observed and simulated values. Summary, the values of day to termination of seed growth (TSG) were observed under non- stress, stress in the booting stage, flowering, milking and doughing of the grains, 222, 219, 219, 221, 221 days, respectively and simulation values with 224, 221, 220, 221, respectively. However, with their simulation values, there were slight differences with 224, 221, 220, 221, respectively. Acceptable values of RMSE (11.7 g.m<sup>-2</sup>) and CV (3.5)

1 and 4- Assistant Professor and Professor in Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Mazandaran, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [Saeid.Shiukhy@gmail.com](mailto:Saeid.Shiukhy@gmail.com))

2- Professor in Agrometeorology, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor, Agronomy Department, Gorgan University of Agriculture and Natural Resources

DOI: [10.22067/jsw.2023.80355.1237](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80355.1237)

indexes showed the high ability of the SSM model in simulating the grain yield of irrigated wheat cv. Mehregan under water stress conditions. Grain yield values were observed in non-stress conditions of 5783, water stress in booting, flowering, milking and doughing of the grain stages in 5423, 5160, 5006 and 5100 kg. h<sup>-1</sup>, respectively. While the simulated values were 5630, 5220, 4920, 4680 and 4880 kg. h<sup>-1</sup>, respectively. Based on the findings, observed and simulated values of leaf area index (LAI) were observed under water stress condition in the booting, flowering, milking and doughing of the grain stages (4.3 and 4.47), (4.33) and 4.46), (4.4 and 4.57) and (4.4 and 4.58) cm<sup>-2</sup>, respectively. Evaluation of the 1000-grain weight of irrigated wheat cv. Mehregan under the water stress showed that the SSM model was highly accurate. RMSE (4.6 g.m<sup>-2</sup>) and CV (1.8) values indicate the ability of the SSM model to simulate the 1000-grain weight of irrigated wheat cv. Mehregan. Also, the simulated values of the harvest index were 34.7 % in non-stress conditions, which decreased by 6 % compared to the observed value. Harvest index values were observed under water stress conditions in the in the booting, flowering, milking and doughing of the grain stages in 30.2, 29.3, 29.9 and 29.5 %, respectively. Compared to its observed values, it was reduced by 3, 3.5, 5, and 5.5 %, respectively.

## Conclusion

Based on the findings, the slight difference between the observed and simulated values demonstrates the SSM model's capability to accurately capture water stress impacts on the phenological stages, grain yield, and yield components of irrigated wheat cv. Mehregan during critical growth stages, including booting, flowering, milking, and doughing. The results indicate that the SSM model is effective in simulating wheat growth under water stress conditions, showcasing its potential as a valuable tool for modeling irrigated wheat growth. The model's ability to account for water stress and its effects on various growth parameters makes it a reliable and efficient tool for predicting crop performance in water-limited environments.

**Keywords:** Crop model, Flowering, Grain yield, Simulation, Wheat

## مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۳۴۶-۳۵۳

## ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم تحت شرایط تنش آبی

سعید شیوخ سوغانلو<sup>۱\*</sup> - محمد موسوی بایگی<sup>۲</sup> - بنیامین ترابی<sup>۳</sup> - محمود رائینی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳

## چکیده

ارزیابی کارایی مدل SSM، در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط تنش آبی، با انجام آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (CRBD) در ۳ تکرار با پنج تیمار آزمایشی شامل: [شرایط بدون تنش (NS)، تنش در مرحله آبستنی (WSB)، تنش در مرحله گلدهی (WSF)]، تنش در مرحله شیرگی شدن (WSM) و تنش در مرحله خمیری شدن دانه (WSD)]، در ورامین صورت گرفت. شبیه‌سازی رشد و نمو با بهره‌گیری از مدل گیاهی SSM-Wheat انجام شد. بر پایه یافته‌ها، میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وقوع مراحل فنولوژیکی گندم در شرایط بروز تنش تفاوت چندانی مشاهده نشد. به‌اختصار، مقادیر مشاهده شده روز تا پایان پر شدن دانه در شرایط بدون تنش، تنش در مراحل آبستنی، گلدهی، شیرگی شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ۲۲۲، ۲۱۹، ۲۱۹، ۲۲۱، ۲۲۱ روز، مشاهده شد که با مقادیر شبیه‌سازی شده آنها به ترتیب ۲۲۴، ۲۲۱، ۲۲۰، ۲۲۱، ۲۲۱ اختلاف بسیار کمی داشت. همچنین تفاوت اندک در مقادیر مشاهده شده عملکرد دانه به ترتیب (۵۷۸۳/۶، ۵۴۲۳، ۵۱۶۰، ۵۰۰۶ و ۵۱۰۰ کیلو گرم در هکتار) و مقادیر شبیه‌سازی شده آنها به ترتیب (۵۶۳۰/۴، ۵۲۲۰، ۴۹۲۰، ۴۶۸۰ و ۴۸۸۰ کیلو گرم در هکتار)، نشان از کارایی مطلوب مدل SSM در درک بروز تنش آبی داشت.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، عملکرد دانه، گلدهی، گندم، مدل گیاهی

## مقدمه

۲۲/۳۶ درصد از کشت دیم بدست آمده است (Shiukhy-Soqanloo *et al.*, 2021a).

اهمیت بررسی تنش‌های محیطی و نقش آنها در پیش‌بینی و ارزیابی رشد و عملکرد محصولات زراعی ضروری می‌باشد. تنش‌های غیر زیستی محدودیتی قابل توجهی برای تولید محصول و امنیت غذایی در سرتاسر جهان محسوب می‌شوند. و این وضعیت به دلیل تغییرات شدید و سریع آب و هوای جهانی تشدید شده است (Wei *et al.*, 2018). تنش آبی را بدون شک می‌توان عاملی بسیار حائز اهمیت، که تأثیر زیادی بر رشد و بهره‌وری محصولات گیاهی دارد، قلمداد نمود.

گندم (*Triticum aestivum* L.) یکی از مهم‌ترین و پرمصرف‌ترین گیاهان زراعی شناخته شده در جهان می‌باشد (Baygi *et al.*, 2016). گندم به‌عنوان یک محصول استراتژیک با ارزش و دارای سطح انرژی بالا، اهمیت بسیار زیادی پیدا کرده است (Shiukhy-Soqanloo *et al.*, 2021b). سطح زیرکشت گندم کشور حدود ۴۱/۶ میلیون هکتار برآورد شده است که ۴۲/۳۷ درصد آن آبی و ۵۷/۶۳ درصد به صورت دیم بوده است. میزان تولید گندم کشور حدود ۴۴/۱۳ میلیون تن برآورد شده است که ۷۷/۶۴ درصد آن سهم کشت آبی و

۱ و ۴- به‌ترتیب استادیار و استاد هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، مازندران، ایران (\*- نویسنده مسئول: Email: Saeid.Shiukhy@gmail.com)

۲- استاد هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، خراسان رضوی، ایران

۳- دانشیار، گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران

شود (Soltani and Sinclair, 2012). مدل‌های شبیه‌سازی رشد با در نظر گرفتن اثرات پیچیده عواملی مانند آب و هوا، خصوصیات خاک و فاکتورهای مدیریتی بر عملکرد گیاه سبب کاهش هزینه‌ها و زمان در مقایسه با تحقیقات مزرعه‌ای می‌شوند (Delghandi et al., 2014). تا کنون مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز گیاهی برای شبیه‌سازی مراحل فنولوژیکی و رشد و نمو گیاهان انجام شده است که می‌توان به، پولنس و همکاران (Pullens et al., 2019) با ترکیب مدل پایه BRASNAP-PH با مدل Agriclim؛ پیرتوجا و همکاران (Pirttioja et al., 2019) با استفاده از مدل IRSs؛ بارلو و همکاران (Barlow et al., 2015) با بهره‌گیری از مدل APSIM-Nwheat؛ کلانکی و همکاران (Kalanaki et al., 2018) با استفاده از مدل DSSAT-CERES Maize؛ سلطانی و همکاران (Soltani and Sinclair, 2011) با به‌کارگیری مدل SSM، اشاره کرد. در مجموع، با توجه به شرایط اقلیمی بسیار خشک منطقه، وجود محدودیت در استفاده از منابع آب و توزیع نامناسب بارندگی‌ها و بویژه توقف بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان در منطقه ورامین، که کشاورزان را با مشکل جدی مواجه ساخته است. هدف از این پژوهش بر مبنای ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان تحت تنش آبی بنا نهاده شد.

## مواد و روش‌ها

### محل اجرای آزمایش

روستای خاوه واقع در شهرستان ورامین دارای طول و عرض جغرافیایی به ترتیب ۵۱/۶۴ درجه شرقی و ۳۵/۳۲ درجه شمالی است. شرایط آب و هوایی محل آزمایش براساس طبقه‌بندی اقلیمی در سیستم دوماتن، خشک سرد، با میانگین دمای سالانه بلند مدت ۱۷/۳ درجه سلسیوس، میانگین سالانه بارندگی بلند مدت ۲۱۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۱۹۰/۸ متر بالاتر از سطح دریا می‌باشد.

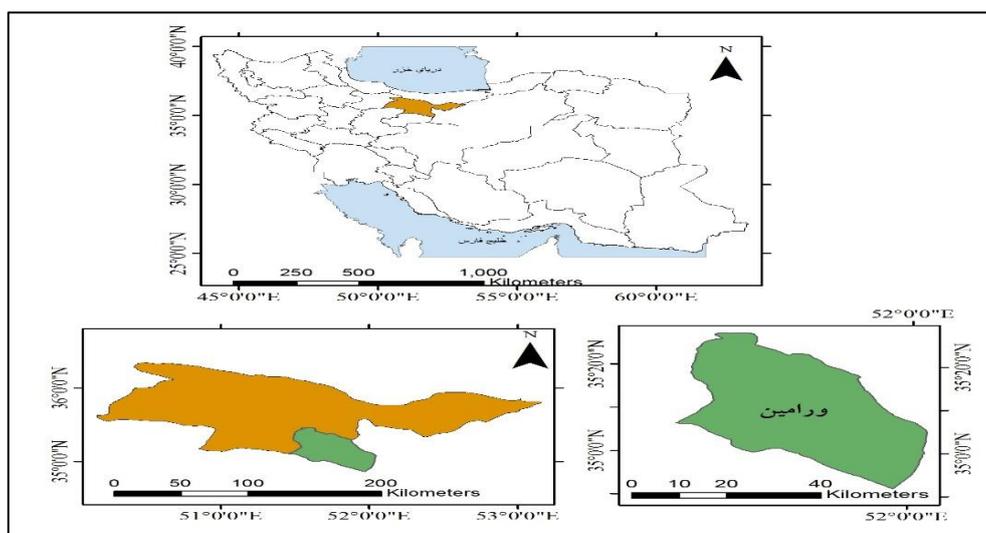
بافت غالب در لایه سطحی لوم-رسی-شنی و در محدوده‌ی ۱۰۰-۳۰ سانتی‌متری لوم رسی می‌باشد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی در جدول ۱ ارایه گردید.

درک مداخلات فیزیولوژیکی، بیوشیمیایی و محیطی مربوط به این تنش به‌منظور مدیریت بهتر، بسیار مهم و حیاتی است. طیف وسیعی از پاسخ گیاهان به این تنش، به پاسخ‌های مورفولوژی، فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی تعمیم داده می‌شود (Fahad et al., 2017).

زالی و همکاران (Zali et al., 2020)، با توجه به اینکه گستره‌ی کلانی از مناطق ایران دارای اقلیم اقلیم خشک و نیمه‌خشک بوده، تنش آبی را عامل مهم محدود کننده رشد و نمو گیاهان زراعی بیان کرده و آن را به‌عنوان یکی از جدی‌ترین تهدیدها برای تولید، بویژه گیاهان زراعی دانه‌ای در ایران به‌شمار آوردند. محمودی و افکاری (Mahmoudi et al., 2020)، اظهار داشتند که توزیع نامناسب بارندگی‌ها و توقف بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گیاه، باعث می‌شود که در مراحل رشد رویشی و زایشی، گیاه تحت تأثیر تنش میانی و انتهایی دوره رشد قرار گیرد. بر پایه نتایج ما و همکاران (Ma et al., 2020)، پاسخ گیاهان به شرایط تنش بسیار پیچیده است و به عوامل دیگری مانند گونه و ژنوتیپ، سن و اندازه گیاه، میزان رشد و همچنین شدت و مدت تنش بستگی دارد.

کمبود آب در طی مراحل مختلف رشد می‌تواند مقادیر اجزای عملکرد را تغییر دهد. کمبود آب در طی مراحل مختلف رشد می‌تواند مقادیر اجزای عملکرد از جمله؛ تعداد گیاهان در واحد سطح، تعداد سنبله‌ها و دانه‌ها در بوته و غیره را تغییر دهد. به عبارت دیگر، کمبود آب در مراحل مختلف رشد گیاه می‌تواند اثرات متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و ریخت‌شناسی داشته باشد (Gonzalez et al., 2010). مهربان و همکاران (Mehraban et al., 2019)، با بررسی تأثیر تنش آبی بر عملکرد و اجزای عملکرد بیان کردند که تنش آبی در طول مراحل مختلف پدیده‌شناسی گندم، باعث تغییراتی در مقادیر ارتفاع گیاه، دوره‌ی پر شدن دانه، تعداد دانه در سنبله، وزن هزار دانه و عملکرد نهایی دانه نسبت به شرایط بدون تنش آبی گردید. نتایج سعیدی و عبدولی (Saeidi and Abdoli, 2015) نیز حاکی از کاهش عملکرد دانه، زیست توده، وزن هزار دانه و شاخص برداشت در شرایط کمبود آب بویژه در مرحله پس از گلدهی بود.

امروزه با توجه به سرعت گسترش مدل‌های کامپیوتری بویژه در بخش کشاورزی می‌توان از مدل‌های رشد گیاهی به‌عنوان ابزاری مناسب، به‌منظور دستیابی به درک صحیح از نحوه تغییرات عملکرد تولید، بر اساس تغییرات نهاده‌ها و عوامل محیطی استفاده کرد (Paknejad et al., 2017). مدل‌های رشد گیاهی مبتنی بر فرآیند در بسیاری از مطالعات، برای برآورد عملکرد محصول استفاده می‌شوند (Saeidi et al., 2010). تعیین راهکارهای بهینه به‌زراعی و به‌نژادی مبتنی بر تحقیقات و آزمایش‌های مزرعه‌ای می‌باشد. لذا صرف هزینه و انرژی زیاد به‌همراه زمان بر بودن آنها، سبب بروز مشکلات فراوانی می‌



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

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی گندم آبی رقم مهرگان در طول فصل رشد و نمو  
Table 1- Some physico-chemical characteristics of the experimental soil of irrigated wheat cv. Mehregan during the growing season.

مشخصات Characteristics	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	آهن Fe (mg.kg <sup>-1</sup> )	روی Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	پتاسیم K (mg.kg <sup>-1</sup> )	فسفر P (mg.kg <sup>-1</sup> )	ازت N (%)	کربن آلی O.C (%)	pH	هدایت الکتریکی EC (dS.m <sup>-1</sup> )
ایستگاه ورامین Varamin station	26	48	26	7.23	1.79	508.7	13.28	0.90	0.94	8.1	2.1

### نحوه انجام آزمایش

به منظور ارزیابی کارایی مدل SSM در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان در شرایط تنش آبی، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی (CRBD) در ۳ تکرار با پنج تیمار آزمایشی شامل: [بدون تنش (شاهد)<sup>۱</sup> (NS)، تنش در مرحله آبتنی<sup>۲</sup> (WSB)، تنش در مرحله گلدهی<sup>۳</sup> (WSF)، تنش در مرحله شیرگی شدن<sup>۴</sup> (WSM) و تنش در مرحله خمیری شدن<sup>۵</sup> (WSD)]، در شهرستان ورامین انجام شد. ابعاد هر کرت ۱۲ متر مربع (۶ متر طول یا عرض ۲ متر)، شامل ۶ ردیف کاشت با فواصل ۲۵ سانتی‌متر و فاصله تکرارها ۲ متر در نظر گرفته شد. بذرها با روشی مربوط به هر کرت در شیارهای تعبیه شده به صورت دستی قرار گرفته و روی آن‌ها با ۳ سانتی‌متر خاک پوشانده شد. از بذر رقم مهرگان برای کشت در تاریخ ۱۰ مهر سال ۱۳۹۸ استفاده شد. همچنین روش آبیاری سطحی بوده و از تانسومتر برای پایش رطوبت خاک استفاده شد. بدین ترتیب آبیاری زمانی که رطوبت خاک به ۷۰ درصد می‌رسید (SWC=70)، انجام شد (Shiukhy-Soqanloo et al., 2015).

برای اعمال تنش، آبیاری کرت‌ها بدین صورت انجام شد که با وارد شدن گیاه در هر یک از مراحل فنولوژیکی مد نظر، آبیاری قطع و با سپری شدن آن مرحله دوباره کرت‌های مورد نظر تا پایان دوره رشد و نمو، آبیاری شدند. لازم به ذکر است که در تمامی دوره‌های آبیاری میزان آب آبیاری برای تمامی تیمارهای آزمایش یکسان بود و تنها تفاوت میان تیمارها در تعداد دوره‌های آبیاری بود. در زمان وقوع بارندگی با استفاده از سرپناه بارش از ورود آب به کرت‌های تحت تنش جلوگیری شد. همچنین بر اساس نتایج آزمون خاک و توصیه اداره ترویج و آموزش کشاورزی شهرستان ورامین، کوددهی انجام نشد.

### اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد

شاخص سطح برگ با استفاده از نرم افزار Image J و برای یک سطح معین ۴۰۰ سانتی‌متر مربع حاصل از یک کوادرات (۲۰×۲۰) محاسبه شد. در این روش ابتدا نمونه‌ها (برگ‌ها) بر روی یک صفحه کاغذی سفید رنگ قرار گرفته و عکس‌برداری انجام شد. سپس در

5- Water stress on Doughing stage

6- Rain Shelter

1- Non-water stress

2- Water stress on booting stage

3- Water stress on Flowering stage

4- Water stress on Milking stage

شده روز تا وقوع هر یک از مراحل فنولوژیکی وجود نداشت (جدول ۲). بر پایه یافته‌ها، مدل رشد و نمو گیاهی SSM اثرات بروز تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم را درک و با دقت بسیار خوبی شبیه سازی نمود.

به طور مثال، در بروز تنش آبی در مرحله گلدهی میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تعداد روز تا گلدهی، تفاوتی چندانی قابل توجهی مشاهده نشد. به طوری که در شرایط بدون تنش مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۸۱ و ۱۸۴ روز بود، که اختلاف چندانی نداشتند. در شرایط بروز تنش هم اختلاف بسیار ناچیزی میان مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مشاهده شد، به طوری که در شرایط بروز تنش در مراحل روز تا آستنی، شروع پر شدن و پایان پر شدن دانه به ترتیب (۱۶۴ و ۱۶۵)، (۱۹۴ و ۱۹۶) و (۲۲۱ و ۲۲۳) بود. به اختصار، مقادیر نمایه ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE = 4.4 \text{ day}$ ) و آماره ضریب تغییرات ( $CV = 2.4$ ) در صفات روز تا گلدهی و ( $RMSE = 1.4 \text{ day}$ ) و ( $CV = 1.5$ ) در روز تا پایان پر شدن دانه، موید بسیار خوب و قابل پذیرشی از توانایی مدل SSM در شبیه‌سازی آنها بود (شکل ۲-الف و ۲-ب).

### عملکرد و اجزای عملکرد

ارزیابی شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی رقم مهرگان در طول دوره‌ی رشد و نمو در شرایط بروز تنش آبی با استفاده از مدل SSM، بیانگر آن بود که مدل علاوه بر شبیه‌سازی قابل قبول مراحل فنولوژیکی، توانایی لازم برای شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم آبی رقم مهرگان را نیز داشت. مقادیر قابل قبول نمایه ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE = 11.7 \text{ g.m}^2$ ) و آماره ضریب تغییرات ( $CV = 3.5$ ) نیز نشان از توانایی بالای مدل SSM در شبیه‌سازی عملکرد گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی داشت (شکل ۳).

بر پایه یافته‌ها، مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در شرایط بدون تنش ۵۷۸۳/۶ و ۵۶۳۰/۴ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین مقادیر مشاهده شده در شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی آستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ۵۴۲۳/۲، ۵۱۶۰، ۵۰۰۶/۵ و ۵۱۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود مقادیر شبیه‌سازی شده عملکرد دانه به ترتیب با ۵۲۲۰، ۴۹۲۰، ۴۶۸۰ و ۴۸۸۰ کیلوگرم در هکتار اختلاف بسیار اندکی را نشان دادند (شکل ۴).

محیط نرم افزار با استفاده از درجه‌بندی خط‌کش برحسب سانتی‌متر اقدام به تنظیمات مقیاس<sup>۱</sup> شد. سپس مساحت هر برگ با مرزبندی پیرامون برگ محاسبه شد. ارتفاع گیاه با اندازه‌گیری ارتفاع ۱۰ ساقه که به طور تصادفی انتخاب و کف‌بر شدند، با اندازه‌گیری طول گیاه از سطح خاک تا انتهای سنبله به دست آمد. برای اندازه‌گیری وزن هزار دانه و تعداد دانه در سنبله، تعداد ۲۰ سنبله از کوادرات ( $20 \times 20$ ) انتخاب و به ترتیب توزین و شمارش شدند. برای اندازه‌گیری زیست توده، مساحت ۱ متر مربع از مرکز هر کرت انتخاب و ساقه‌ها از سطح خاک کف‌بر شده و در آون با دمای ۷۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت قرار داده شدند. پس از توزین نمونه عملکرد زیست توده محاسبه شد. در نهایت شاخص برداشت از تقسیم مقادیر عملکرد دانه بر زیست توده (بر حسب درصد) محاسبه شد.

### مدل شبیه‌سازی رشد و نمو گیاهی SSM

برای شبیه‌سازی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان از مدل SSM- Wheat استفاده شد (Soltani and Sinclair, 2011). این مدل رشد و نمو و عملکرد را به صورت روزانه به عنوان تابعی از شرایط آب و هوایی (با استفاده از پارامترهای دمای بیشینه، کمینه، بارندگی و تابش خورشیدی)، خصوصیات خاک و مدیریت زراعی (رقم، تاریخ کاشت، تراکم بوته، رژیم آبیاری) شبیه‌سازی می‌کند. این مدل توانایی شبیه سازی مراحل فنولوژیکی، گسترش و پیری برگ، تاثیر خشکی هوا، شوری و  $CO_2$  بر تولید ماده خشک، توزیع ماده خشک، تاثیر دماهای آستانه (دماهای بالا و پایین) بر سطح برگ، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد (Soltani and Sinclair, 2012). در این پژوهش با بهره‌گیری از نمایه ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> و ضریب تغییرات<sup>۳</sup> ارزیابی تفاوت داده‌های مشاهده شده و داده‌های شبیه‌سازی شده صورت گرفت.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - S_i)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

که  $O_i$  و  $S_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشند.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (2)$$

که  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب انحراف معیار و میانگین جامعه را نشان می‌دهند.

### نتایج و بحث

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی وقوع مراحل فنولوژیکی گندم آبی مهرگان تحت شرایط تنش آبی با استفاده از مدل SSM، نشان داد تفاوت چندانی قابل ملاحظه‌ای بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی

3- Coefficient Variation (CV)

1- Set scale

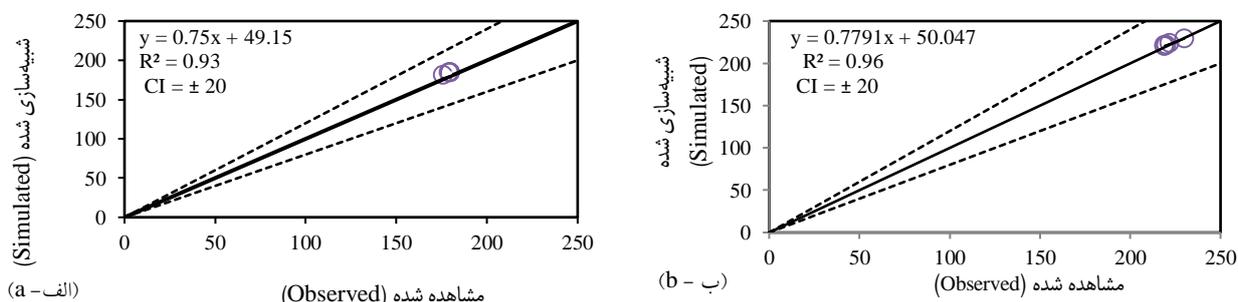
2- Root Mean Squared Error (RMSE)

جدول ۲- مقایسه مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده مراحل فنولوژیکی تحت تنش آبی

Table 2- Comparison of observed and simulated values of phenological stages under water stress

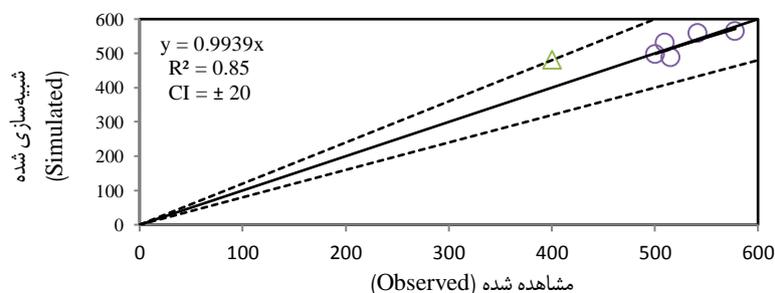
مراحل فنولوژیک Phenologic st.	بدون تنش Non-Stress		مرحله آبستنی Booting st.		مرحله گلدهی Flowering st.		مرحله شیری شدن دانه Milking st.		مرحله شیری شدن دانه Doughing st.	
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.
	سبز شدن Emergence	5	4	5	4	5	4	5	4	5
پنجه‌زنی Tillering	17	16	17	16	17	16	17	16	17	16
ساقه‌دهی Stem elongation	120	118	120	118	120	118	120	118	120	118
آبستنی Booting	166	164	164	165	164	166	164	166	164	166
خوشه‌دهی Heading	170	169	166	168	169	170	169	170	169	170
گلدهی Flowering	184	181	176	181	181	184	181	184	181	184
شروع پر شدن دانه BSG	196	194	186	188	192	194	196	194	196	194
پایان پر شدن دانه TSG	224	222	219	221	219	220	221	221	221	221
رسیدگی Maturity	231	230	230	229	230	229	230	229	230	229

اعداد در هر ستون بر حسب روز پس از کاشت (DAP) می‌باشند  
The numbers in each column are days after planting



شکل ۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تعداد روز تا گلدهی (الف) و پایان پر شدن دانه (ب) تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 2- Comparison of the observed and simulated values of days to flowering (a) and the termination of seed growth (b) under water stress at during the growth season using SSM model



شکل ۳- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM  
Figure 3- Comparison of the observed and simulated values of grain yield under water stress during the growth season using SSM model

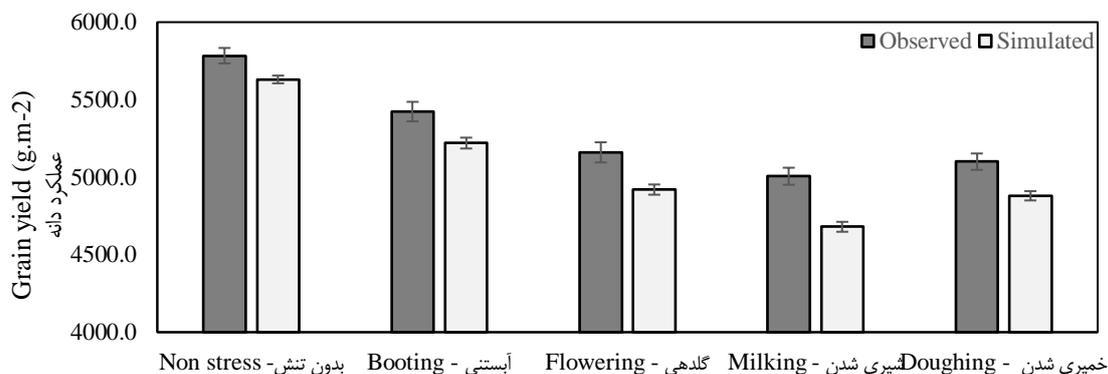
شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی، همخوانی داشت.

### تولید ماده خشک

بررسی مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده میزان تولید ماده خشک حاکی از آن بود که اختلاف بسیار اندکی میان آنها مشاهده شد و این اختلاف اندک، گویای درک مدل SSM از بروز تنش آبی و توانایی بالایی این مدل در شبیه‌سازی میزان تولید ماده خشک گندم آبی مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی مختلف مورد بررسی بود. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا (RMSE= 11.4g.m<sup>2</sup>) و ضریب تغییرات (CV= 1.7) موید برتری مدل SSM در شبیه‌سازی تولید ماده خشک در گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۵).

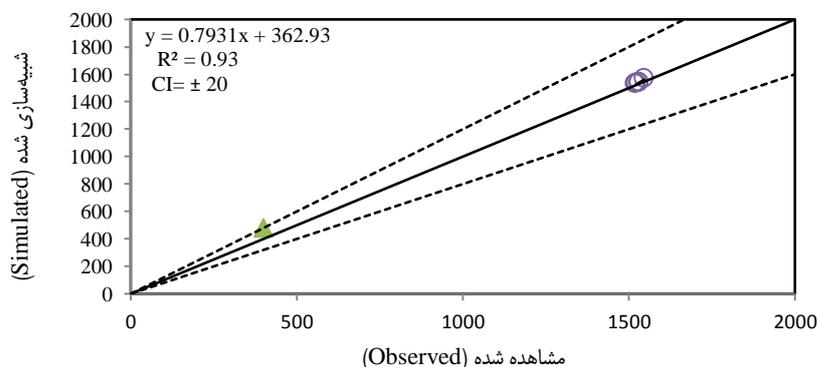
مکاری و همکاران (Mokari et al., 2020)، بیان کردند که وجود طول روز کافی و مناسب و دمای مطلوب در طول سپری کردن مراحل فنولوژیکی بویژه گلدهی و پر شدن دانه‌ها، منجر به افزایش عملکرد خواهد شد.

نتایج عبداللهی (Abdollahi, 2015)، نیز نشان داد که در طول مرحله پر شدن دانه‌ها تنش آبی و دمای بالا بر روی عملکرد دانه تاثیر منفی بر جای گذاشت. کشت با تاخیر و وجود دماهای پایین در مراحل اولیه رشد و نمو گیاه در مناطق دارای زمستان‌های بسیار سرد، بدلیل عدم استقرار و رشد کافی گیاه برای روبرو شدن با سرمای پاییزه و همچنین وجود دماهای بالا در مناطق گرم و خشک در مراحل انتهایی رشد و نمو بویژه دوره‌ی پر شدن دانه‌ها، عملکرد گیاه دچار کاهش خواهد شد (Mokari et al., 2020). همسنجی یافته‌های این پژوهش با نتایج مهربان و همکاران (Mehraban et al., 2019) و گونزالز و همکاران (Gonzalez et al., 2010) مبنی بر کاهش عملکرد گندم در



شکل ۴- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه در شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم آبی رقم مهرگان

Figure 4- Comparison of the observed and simulated values of grain yield under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



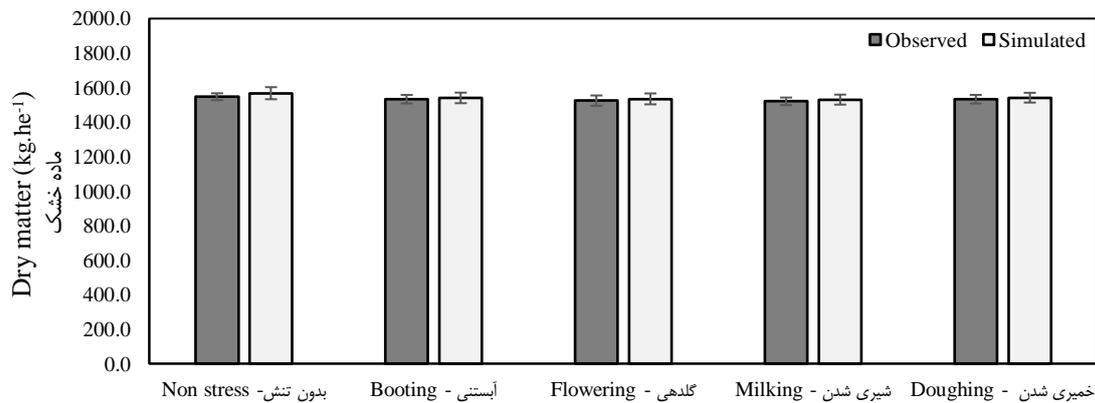
شکل ۵- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ماده خشک کل تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 5- Comparison of the observed and simulated values of total dry matter under water stress during the growth season using SSM model

### شاخص سطح برگ

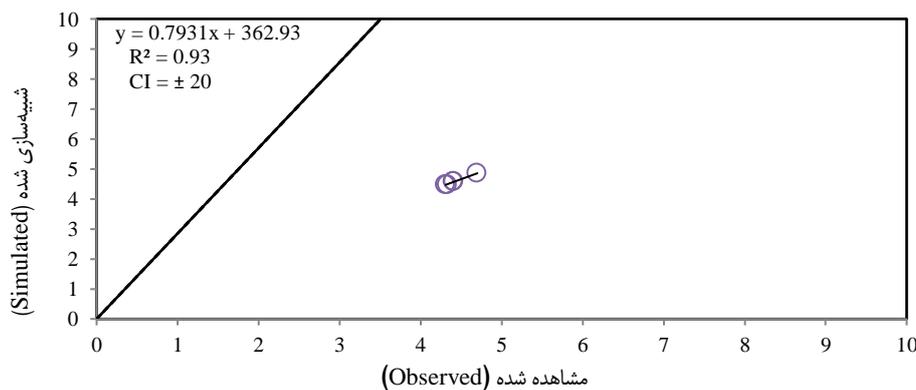
نتایج ارزیابی شبیه‌سازی شاخص سطح برگ نشان‌دهنده دقت خوب مدل SSM در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت. تفاوت بسیار ناچیز میزان سطح برگ میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و همچنین مقادیر قابل قبول نمایه ریشه مربعات خطا ( $RMSE=1.4 \text{ cm}^2$ ) و ضریب تغییرات ( $CV=3.3$ ) نیز بیانگر تشخیص مدل SSM در بروز تنش آبی در طول دوره‌ی رشد و نمو گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۷).

بر اساس نتایج بدست آمده مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی شده تولید ماده خشک در شرایط بدون تنش آبی به ترتیب ۱۵۴۷ و ۱۷۰۱/۷ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد. این در حالی بود که مقادیر مشاهده شده تولید ماده خشک در شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیرگی شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب برابر با ۱۵۳۲/۶، ۱۵۲۴/۳، ۱۵۲۰/۳ و ۱۵۳۲/۶ کیلوگرم در هکتار بود که با مقادیر شبیه‌سازی شده در این مراحل به ترتیب با ۱۶۰۹/۲، ۱۶۰۰/۵، ۱۵۶۲/۹ و ۱۶۸۵/۹ کیلوگرم در هکتار تفاوت بسیار اندکی نشان داد (شکل ۶).



شکل ۶- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده ماده خشک کل در شرایط تنش آبی در مراحل مختلف فنولوژیکی گندم آبی رقم مهرگان

Figure 6- Comparison of the observed and simulated values of total dry matter under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



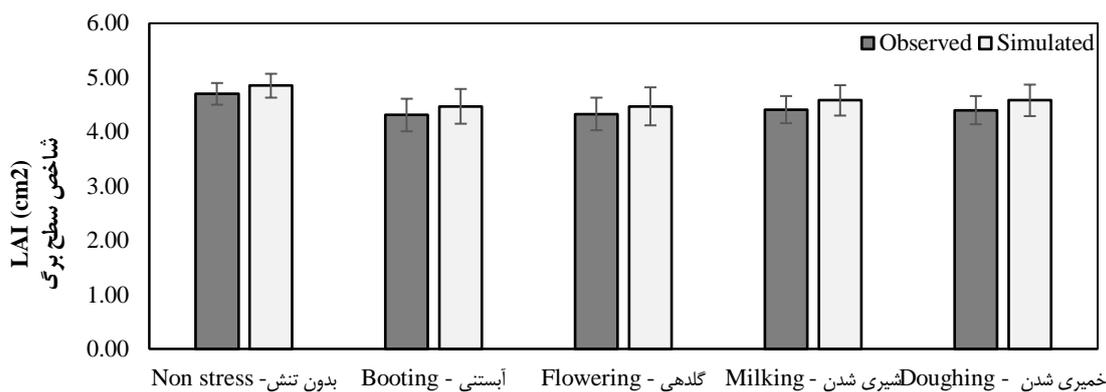
شکل ۷- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM  
Figure 7- Comparison of the observed and simulated values of LAI under water stress during the growth season using SSM model

تیمارها بیان کردند. امیری ده‌احمدی (Amiri Deh-ahmadi *et al.*, 2010)، نشان دادند که وجود تنش در مرحله گلدهی و غلاف‌دهی بر تولید سطح برگ اثراتی جبران‌ناپذیری در پی خواهد داشت و روند پیری در گیاه را تسریع می‌دهد. که با نتایج این پژوهش مبنی بر بالاتر بودن شاخص سطح برگ در شرایط بدون تنش آبی در مقایسه با دیگر تیمارها، همخوانی داشت.

#### وزن هزار دانه

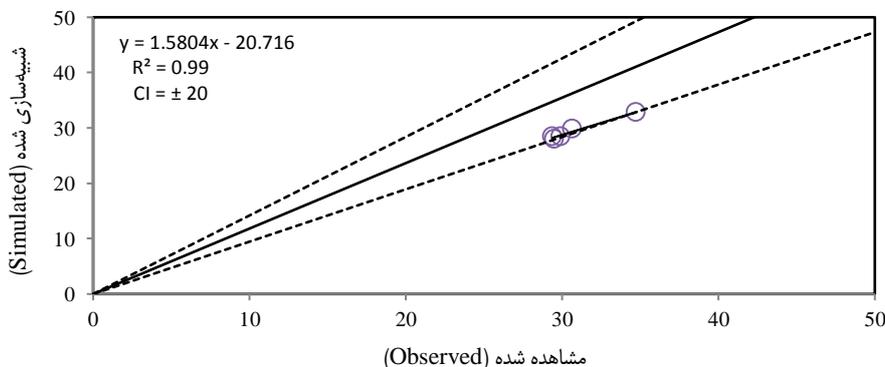
ارزیابی شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم آبی رقم مهرگان تحت تنش آبی نشان داد که مدل SSM با دقت بسیار بالا و قابل اطمینان توانایی شبیه‌سازی آن را داشت. به طوری که از اختلاف بسیار ناچیز میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده می‌توان چشم‌پوشی کرد. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا ( $RMSE= 4.6\text{ g}$ ) و ضریب تغییرات ( $CV= 1.8$ ) دال بر توانایی بسیار خوب مدل SSM در شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی بود (شکل ۹).

در شرایط بدون تنش، مقدار مشاهده شده شاخص سطح برگ  $4/7$  سانتی‌متر مربع بود و مقدار شبیه‌سازی شده آن  $4/85$  سانتی‌متر مربع مشاهده شد، که نشان از دقت خوب مدل SSM در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ داشت. همچنین یافته‌ها حاکی از آن بود که مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ در شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب  $(4/3)$  و  $(4/47)$ ،  $(4/3)$  و  $(4/46)$ ،  $(4/4)$  و  $(4/57)$  و  $(4/4)$  و  $(4/58)$  بود. همانطور که در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده تفاوت چندانی وجود ندارد و مدل توانسته است با دقت قابل قبولی شاخص سطح برگ را شبیه‌سازی نماید (شکل ۸). در تمامی تیمارهای آزمایشی بدلیل اینکه تا پیش از آغاز مرحله آبستنی گیاه بصورت مشابه و یکسان آبیاری شد، روند رشد سطح برگ روندی افزایشی نشان داد. انتظار می‌رود که با افزایش سن گیاه و ریزش برگ ها، روند رشد سطح برگ کاهش یابد. نه‌بندانی (Nah-Bandani *et al.*, 2017)، دلیل کاهش سطح برگ نخود در شرایط تنش از آغاز مرحله گلدهی را، طولانی‌تر بودن دوره‌ی تنش آبی نسبت به دیگر



شکل ۸- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص سطح برگ در طول فصل رشد و نمو

Figure 8- Comparison of the observed and simulated values of LAI under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



شکل ۹- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

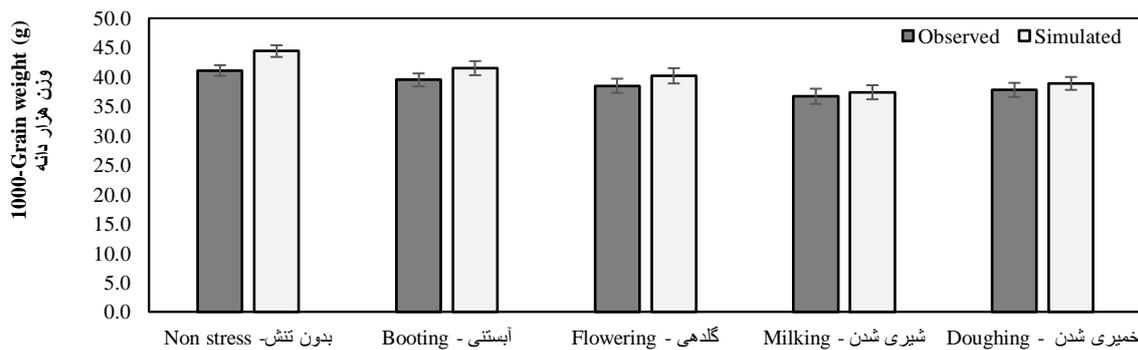
Figure 9- Comparison of observed and simulated 1000-Grain weight values under water stress during growth season using SSM model

کمتر تحت تأثیر تنش آبی قرار می‌گیرند. بنابراین، کاهش وزن و عملکرد دانه در اثر کمبود آب پس از گلدهی، ممکن است بیشتر نبود منبع جذب کننده فتو-آسیمیلات‌ها برای پر شدن دانه را نشان دهد.

#### شاخص برداشت

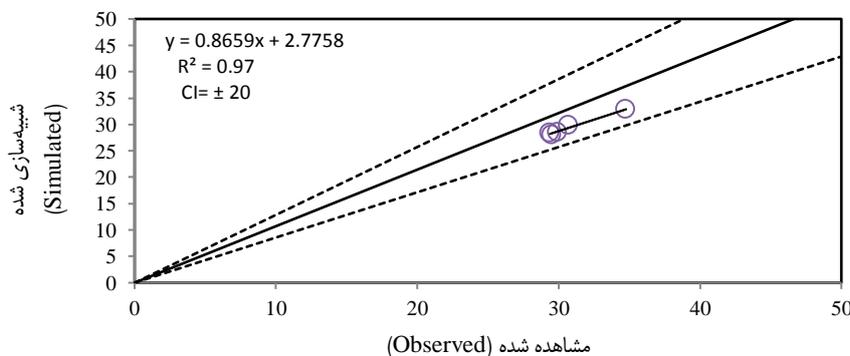
بررسی مقادیر شبیه‌سازی شده مقدار شاخص برداشت در مقایسه با مقادیر شبیه‌سازی شده دچار کاهش شد اما همانند سایر اجزای عملکرد مورد بررسی، مدل SSM به خوبی و با دقت قابل پذیرش، توانایی شبیه‌سازی میزان شاخص برداشت در این شرایط را نشان داد. مقادیر نمایه ریشه مربعات خطا ( $RMSE = 1.2$ ) و ضریب تغییرات ( $CV = 4.1$ ) موید برتری مدل SSM در شبیه‌سازی تولید ماده خشک در گندم آبی رقم مهرگان بود (شکل ۱۱).

بر اساس یافته‌های حاصل از شبیه‌سازی وزن هزار دانه گندم در شرایط بروز تنش آبی، مقادیر شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه در بروز تنش در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و پر شدن دانه به ترتیب ۴۱/۵، ۴۰/۲، ۳۷/۴ و ۳۸/۹ گرم بود و اختلاف بسیار اندکی با مقادیر مشاهده شده به ترتیب با ۳۹/۵، ۳۸/۵، ۳۶/۷ و ۳۷/۸ نشان داد. همچنین در شرایط بدون تنش نیز میان مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده شده وزن هزار دانه به ترتیب با ۴۴/۴ و ۴۱/۱ گرم، نیز تفاوت قابل توجهی مشاهده نشد (شکل ۱۰). وزن دانه به‌عنوان جزئی کلیدی در عملکرد نهایی دانه به‌شمار می‌رود که در زمان رخداد تنش‌های محیطی بویژه تنش آبی، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. سعیدی و همکاران (Saeidi et al., 2010)، اظهار داشتند که کاهش قابل توجه در عملکرد دانه به دلیل تنش آبی پس از گلدهی ممکن است در نتیجه کاهش تولید مواد فتو-آسیمیلات، افت توانایی جذب فتوآسیمیلات‌ها و مدت زمان پر شدن دانه باشد. سعیدی و عبدولی (Saeidi and Abdoli, 2015) گزارش کردند که احتمالاً فرآیندهای اولیه رشد دانه (تقسیم سلول)



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وزن هزار دانه در طول فصل رشد و نمو

Figure 10- Comparison of the observed and simulated values of 1000-grain weight under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan



شکل ۱۱- شبیه‌سازی مقادیر شاخص برداشت تحت تنش آبی در طول فصل رشد و نمو با استفاده از مدل SSM

Figure 11- Simulation of harvest index values under water stress during the growth season using SSM model

بارش‌ها پیش از کامل شدن رشد و نمو گندم، سبب شده است که، مشکلات بسیار قابل توجهی را برای کشاورزان بوجود آید. بر پایه یافته های این پژوهش، تفاوت اندک میان مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در وقوع مراحل فنولوژیکی، عملکرد دانه و اجزای عملکرد گندم آبی رقم مهرگان تحت شرایط بروز تنش آبی در مراحل آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه، گویای درک مدل SSM از بروز تنش آبی بود و مدل دقت و توانایی بالایی در شبیه‌سازی آنها داشت. همچنین مقادیر قابل قبول نمایه‌های ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب تغییرات موید خوبی در بهره‌گیری از این مدل در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط بروز تنش آبی بود. لذا بر پایه نتایج، می‌توان مدل شبیه‌ساز SSM را در شبیه‌سازی رشد و نمو گندم در شرایط بروز تنش آبی را کارآمد دانست و در نهایت برای مدلسازی رشد و نمو گندم آبی از آن بهره گرفت.

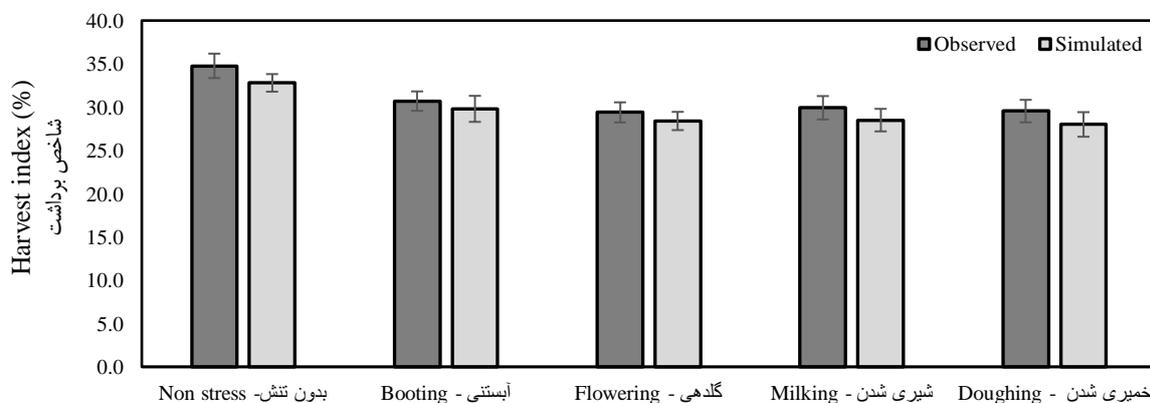
### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از حمایت و زحمات اداره آموزش و ترویج کشاورزی روستای خاوه واقع در شهرستان ورامین، کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

بر پایه یافته‌ها، مقادیر شبیه‌سازی شده شاخص برداشت در شرایط بدون تنش ۳۴/۷ درصد بود، که نسبت به مقدار مشاهده شده آن، ۶ درصد کاهش نشان داد. همچنین مقادیر مشاهده شده شاخص برداشت در شرایط بروز تنش آبی در مراحل فنولوژیکی آبستنی، گلدهی، شیری شدن و خمیری شدن دانه به ترتیب ۳۰/۶، ۲۹/۳، ۲۹/۹ و ۲۹/۵ درصد مشاهده شد، که نسبت به مقادیر مشاهده شده آن به ترتیب با کاهش ۳، ۳/۵ و ۵/۵ درصدی مواجه شد (شکل ۱۲). فرآورده‌های فتوسنتزی که پیش از گرده‌افشانی در اندام‌های هوایی گیاه ویژه برگ‌ها ذخیره شده‌اند، در نهایت به دانه‌ها انتقال داده می‌شوند. مقدار شاخص برداشت نشان دهنده میزان سرعت انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی به دانه می‌باشد. افزایش در مقدار شاخص برداشت باعث افزایش سهم دانه‌ها از کل ماده خشک می‌شود. در شرایط وجود خشکی روند انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی بدلیل کاهش تعرق گیاه کند شده و شاخص برداشت نیز دچار کاهش خواهد شد. نتایج حلیم و همکاران (Halim et al., 2017) نیز کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش را تایید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه گستره کلانی از کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشد و همچنین توزیع نامناسب بارندگی‌ها و توقف



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده شاخص برداشت در طول فصل رشد و نمو

Figure 12- Comparison of the observed and simulated values of harvest index under water stress at the phenological stages of irrigated wheat cv. Mehregan

### منابع

1. Abdollahi, A. (2015). Investigation of the effect of sowing date and density on grain yield and yield components of bread wheat in rainfed conditions. *Iranian Journal of Rainfed Agriculture*, 4(2), 99-114. (In Persian with English abstract)
2. Amiri Deh-ahmadi, R., Parsa, M., & Gnajali, A. (2010). The effect of drought stress at different phenological stages on morphological characteristics and yield components of chickpea (*Cicer arietinum* L.) in greenhouse conditions.

- Iranian Journal of Crop Research*, 8(2), 157-166. (In Persian). <https://doi.org/10.22067/GSC.V8I1.7406>
3. Barlow, K.M., Christy, B.P., O'leary, G.J., Riffkin P.A., & Nuttall, J.G. (2015). Simulating the impact of extreme heat and frost events on wheat crop production. A review. *Field Crops Research*, 171, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.11.010>
  4. Baygi, Z., Safizadeh, S., Shirani Rad, A.M., Valadabadi S.A., & Jafarinejad. A. (2016). Seed yield and yield component of some spring wheat varieties as affected by different sowing dates in Neishabour. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(4), 905-922. (In Persian with English abstract)
  5. Delghandi, M., Andarzian, B., Broomandnasab, S., Massah Bovani, A., & Javaheri., E. (2014). Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-wheat to simulate growth and development, yield and phenology stages of wheat under water deficit condition (Case study: Ahvaz region). *Journal of Water and Soil*, 28(1), 82-91. (In Persian with English abstract)
  6. Fahad, Sh., Bajwa, A., Nazir, U., Anjum, Sh. A., Farooq, A., Zohaib, A., Sadia, Sh., Nasim, W., Adkins, S., Shah Saud, Sh., Ihsan, M.Z., Alharby, H., Wu, Ch., Wang, D., & Huang, J. (2017). Crop production under drought and heat stress. *Plant Responses and Management Options*, 8: 1147-1161. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
  7. Francia, E., Tondelli, A., Rizza, F., Badeck, F.W., Thomas, W.T.B., van Eeuwijk Romagosa, I., Stanca, A. M., & Pecchioni, N. (2013). Determinants of barley grain yield in drought-prone Mediterranean environments. *Italian Journal of Agronomy*, 8(1), 1-8. <https://doi.org/10.4081/ija.2013.e1>
  8. Gonzalez, A., Bermejo, V., & Gimeno, B.S. (2010). Effect of different physiological traits on grain yield in barley grown under irrigated and terminal water deficit conditions. *Journal of Agricultural Science*, 48, 1-10. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000031>
  9. Halim, Gh., Yahya, A., & Shakeri, A. (2017). Evaluation of yield, yield components and stress tolerance indices in bread wheat cultivars in conditions of cessation of irrigation after flowering. *Journal of Production and Processing of Crops and Horticulture*, 3(4): 121-134. (In Persian). <https://doi.org/10.22077/ESCS.2019.2822.1733>
  10. Kalanaki, M., Karandish, F., & Saberali, S. F. (2018). Effect of integrated management of irrigation and planting date on maize water use efficiency by using the DSSAT model. *Journal of Water Research in Agriculture (Soil and Water Sciences)*, 31(4), 509-522. (In Persian with English abstract)
  11. Ma, Y., Celeste Dias, M., & Freitas, H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Frontiers in Chemistry*, 11, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.591911>
  12. Mahmoudi, H., & Afkari, A. (2020). Physiological traits of wheat in drought stress conditions. *Scientific Journal of Crop Physiology*, 12(46), 131-156.
  13. Mehraban, A., Tobe, A., Gholipour, A., Amiri, E., Ghafari, A., & Rostaii, M. (2019). The effects of drought stress on yield, yield components, and yield stability at different growth stages in bread wheat cultivar (*Triticum aestivum* L.). *Polish Journal Environmental Studies*, 28(2), 739-746. <https://doi.org/10.15244/pjoes/85350>
  14. Mokari, M., Abedinpour, M., & Dehghan, H. (2020). The effect of drought stress and sowing date on grain yield and water use efficiency in autumn wheat in Kashmar region. *Journal of Water Research in Agriculture*, 34(2), 167-189. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2020.122256>
  15. Nah-Bandani, A.R., Soltani, A., & Darvishirad, P. (2017). The effect of end-of-season drought stress on water consumption, growth and yield of chickpeas. *Scientific Journal of Plant Ecophysiology*, 7(23), 17-27. (In Persian).
  16. Paknejad, F., Moayeri Pour, Sh., Aghayari, F., & Ilkaei, M.N. (2017). Simulation of maize yield with different levels of nitrogen by using DSSAT model. *Journal of Crop Ecophysiology*, 11(3), 503-518. (In Persian with English abstract)
  17. Pirttioja, N., Palosuo, T., Fronzek, S., Raisanen, J., Rotter R.P., & Carter, R.T. (2019). Using impact response surfaces to analyse the likelihood of impacts on crop yield under probabilistic climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.006>
  18. Pullens, J.W.M., Sharif, B., Trnka, M., Balek, J., Semenov, M.A., & Olesen, J.E. (2019). Risk factors for European winter oilseed rape production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 273, 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.023>
  19. Saeidi, M., & Abdoli, M. (2015). Effect of Drought Stress during Grain Filling on Yield and Its Components, Gas Exchange Variables, and Some Physiological Traits of Wheat Cultivars. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 17, 885-898.
  20. Saeidi, M., Moradi, F., Ahmadi, A., Spehri, R., Najafian, G., & Shabani, A. (2010). The effects of terminal water stress on physiological characteristics and sink source relations in two bread wheat (*Triticum aestivum* L.) Cultivars. *Iranian Journal of Crop Science*, 12, 392-408. (In Persian with English abstract)
  21. Shiukhy-Soqanloo, S., Mousavi-Baygi, M., Torabi, B., & Raeini-Sarjaz, M. (2021). Evaluation of climate change effects on irrigated wheat CV. Mehregan yield under drought stress condition (Case study: Varamin). *Journal of Agricultural Meteorology*, 9(2), 15-28. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22125/agmj.2021.297373.1121>
  22. Shiukhy-Soqanloo, S., Raeini, M., & Chalavi, V. (2015). Colored plastic mulch microclimates affect strawberry fruit yield and quality. *International Journal of Biometeorology*, 59(8), 1061-1066. <https://doi.org/10.1007/s00484-014->

0919-0

23. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2011). A simple model for chickpea development, growth and yield. *Field Crop Research*, 124, 252-260. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(99\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(99)00017-9)
24. Soltani, A., & Sinclair, T.R. (2012). *Modeling physiology of crop development, growth and yield*. CAB International, Wallingford, UK.
25. Wei, Y., Jin, J., Jiang, Sh., Ning Sh., & Liu, L. (2018). Quantitative response of soybean development and yield to drought stress during different growth stages in the Huaibei plain, China. *Agronomy*, 9, 1-16. <https://doi.org/10.3390/agronomy8070097>
26. Zali, H., Hasanloo, T., Sofalian, O., & Asghari, A. (2020). Evaluation of drought stress effect on seed oil yield and fatty acid composition in canola (*Brassica napus* L.) cultivars. *Environmental Stresses on Crop Sciences*, 3(13), 735-747. <https://doi.org/10.22077/ESCS.2020.2205.1552>



## Management and Simulation of the Latian Multi-purpose Reservoir Dam and Its Performance Evaluation Based on the Operation Policy on Daily Time Scale

M. Babaei<sup>1</sup>, M.T. Sattari<sup>2\*</sup>

Received: 08-02-2023

Revised: 06-04-2023

Accepted: 09-05-2023

Available Online: 10-05-2023

### How to cite this article:

Babaei, M., & Sattari, M. (2023). Management and simulation of the Latian multi-purpose reservoir Dam and its performance evaluation based on the operation policy on daily time scale. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 367-382. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81012.1252>

### Introduction

Development of reservoirs helps to meet food and energy needs by supplying water for agriculture and hydropower plants. Efficient management of water resources is important and vital to overcome the problems of water leakage and meet agricultural, industrial and drinking needs. Each of these requirements creates limitations in the way the reservoir is operated, which requires accurate information on the changes in the reservoir storage and other influential components during the operation period. In order to manage and plan water resources at country scale, using reservoir simulation models as a suitable tool in simulating processes related to dams, such as the operation of water reservoirs, will be very effective. Reservoir simulation models such as the HEC-ResSim model provide the opportunity to simulate the natural and hydrological processes related to the water resources system and the relationships between the supply and demand sectors by implementing a schematic structure of a real reservoir. Two scenarios of water savings of 20 and 30 percent were used in the current investigation. Additionally, using this method, the objectives of water resource management can be assessed.

### Materials and Methods

In the present study, the use of the Latian reservoir in real conditions was simulated using the HEC-ResSim model. The simulation was carried out according to the river's inflow from 1968 to 2018, downstream water needs, energy production capacity by turbines, physical characteristics and reservoir building. The implementation of the HEC-ResSim model is summarized in three steps. The Watershed Setup module is used to introduce the general outline of the watershed. In this module, the shape and geographical location of the basin and related elements such as rivers, reservoirs, hydrometric stations and other projects in it should be specified. The Reservoir Network module is used to introduce the desired reservoir network and to enter the physical characteristics and how to use them. The Simulation module is designed to introduce the simulation period and display the model outputs. In this module, the simulation time and period and the operation pattern should be determined.

### Results and Discussion

According to the results obtained from the reservoir simulation model, the average storage capacity of Latian dam for the simulation period was estimated to be 41 million cubic meters, which shows a significant drop of 49% compared to the normal level (83 million cubic meters). Additionally, for the same period, it was estimated that the average discharge was equivalent to 5.4 cubic meters per second and the average inflow to the reservoir of the Latian dam was equal to 5.7 cubic meters per second. This is in contrast to the period's average demand, which for the area downstream of the Latian Dam is 12.1 cubic meters. The findings indicate that the reservoir of the dam frequently, and particularly at the conclusion of the simulation period, is unable to satisfy the needs of the

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

(\*- Corresponding Author Email: [mtsattar@tabrizu.ac.ir](mailto:mtsattar@tabrizu.ac.ir))

DOI: [10.22067/JSW.2023.81012.1252](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81012.1252)

downstream. Additionally, according to the findings of the current study, the Latian dam power plant's (Kalan) average annual hydro-electric energy production was projected to be 68,000 MWh, and the results show that in accordance with the policy of operating the Latian dam in the majority of the years, the Kalan power plant is able to supply the electricity required in the study area. According to the results, the average reservoir volume of Latian dam for the entire period in the first and second scenario was estimated to be 49 and 63 million cubic meters, respectively. Also, by applying the first and second water saving scenarios, the Latian dam reservoir will be able to generate 66,000 and 63,000 MWh of energy annually.

## Conclusion

In this study, the functioning and operation of the Latian dam reservoir was used by applying the Hec-ResSim reservoir simulation model. After entering data such as the elevation and length of the dam, surface-volume-elevation curve, evaporation from the surface of the reservoir, elevation and uncontrolled outlet coefficient, dam storage areas, rule curve, were simulated by the model. In the present study, the values of inactive volume and conservation volume of Latian Dam were estimated as 28 and 83 million cubic meters, respectively. The average water release of Latian dam for the first and second 25 years of operation was equal to 6.1 and 3.7 cubic meters per second, respectively, which met 50 and 32% of the downstream demand on average. The results indicate that the success rate of Latian dam in supplying drinking, industry and downstream environment for the period of operation is 42%. Also, 16 years out of 50 years of operation, Kalan hydropower plant has fully met 100% of the needs. On average, the large power plant is able to provide 80% of the energy needs of the study area for the entire simulation period.

**Keywords:** Energy production, HEC-ResSim model, Reservoir operation, Reservoir storage changes, Water saving

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۳۸۲-۳۶۷

## مدیریت و شبیه‌سازی مخزن چندمنظوره سد لتیان و ارزیابی عملکرد آن براساس سیاست بهره‌برداری در مقیاس زمانی روزانه

محمد بابایی<sup>۱</sup> - محمد تقی ستاری<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

### چکیده

توسعه مخازن به برآورده شدن نیازهای غذایی و انرژی با تامین آب برای کشاورزی و نیروگاه‌های آبی، کمک می‌کند. مدیریت کارآمد مخزن چندمنظوره مستلزم اطلاع دقیق از تغییرات ذخیره مخزن و سایر مولفه‌های تاثیرگذار در بیان مخزن در طول دوره بهره‌برداری است. شبیه‌سازی مخازن چندمنظوره فرآیندی پویا در راستای ارزیابی مستمر رفتار و عملکرد مخزن در شرایط مختلف پرآبی و کم آبی از یک سو و سیاست‌های بهره‌برداری از سوی دیگر است. در این مطالعه سیاست بهره‌برداری از مخزن چندمنظوره سد لتیان در شرایط واقعی با استفاده از مدل HEC-ResSim شبیه‌سازی و ارزیابی گردید. شبیه‌سازی با توجه به دبی ورودی رودخانه از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸، نیازهای آبی پایین‌دست، ظرفیت تولید انرژی توربین‌ها، ویژگی‌های فیزیکی و بدنه مخزن انجام گردید. مطابق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید که افت محسوس ۴۹ درصدی را نسبت به تراز نرمال ۸۳ میلیون متر مکعبی مخزن نشان می‌دهد. براساس داده‌های تاریخی متوسط جریان ورودی به مخزن سد لتیان معادل ۵/۷ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد و متوسط رهاسازی برای کل دوره شبیه‌سازی معادل ۵/۴ متر مکعب بر ثانیه برآورد شد. این درحالی است که متوسط نیاز پایین دست سد لتیان برای کل دوره ۱۲/۱ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. براین اساس مخزن سد در اکثر مواقع بخصوص در اواخر دوره شبیه‌سازی قادر به تامین نیازهای پایین‌دست نمی‌باشد. همچنین متوسط سالانه تولید انرژی برق - آبی نیروگاه سد لتیان (کلان) معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات-ساعت برآورد گردید که با توجه به سیاست بهره‌برداری از سد لتیان در اکثر سال‌ها نیروگاه کلان قادر به تامین برق مورد نیاز محدوده مطالعاتی می‌باشد. در مطالعه حاضر به منظور مدیریت نتیجه‌محور در راستای حل مشکل کمبود مخزن، از اعمال دو سناریو صرفه‌جویی در مصرف آب به ترتیب به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده گردید. طبق نتایج به دست آمده متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره در سناریو اول و دوم به ترتیب معادل ۴۹ و ۶۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید. همچنین مخزن سد لتیان طبق این دو سناریو قادر خواهد بود که به ترتیب سالانه معادل ۶۶۰۰۰ و ۶۳۰۰۰ مگاوات-ساعت تولید انرژی برق - آبی داشته باشد. طبق نتایج با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف خانگی تهران، علاوه بر اینکه به جهت تامین انرژی در حد قابل قبول، نیازی به رهاسازی بیشتر آب به نیروگاه کلان، به منظور تولید انرژی لازم نخواهد بود. همچنین کمبود آب در سد لتیان به میزان مناسبی به‌خصوص در سناریو دوم رفع می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییرات ذخیره مخزن، تولید انرژی برق - آبی، شبیه‌سازی و بهره‌برداری مخزن، صرفه‌جویی در مصرف آب، HEC-ResSim مدل

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [mtsattar@tabrizu.ac.ir](mailto:mtsattar@tabrizu.ac.ir))

## مقدمه

محدودی برای نشان دادن رفتار واقعی مخازن دارند، زیرا اپراتورها اغلب به صورت دستی و بر اساس ترکیبی از دانش محلی از سیستم، منحنی های فرمان و شرایط آب و هوایی تصمیم می‌گیرند (Munir et al., 2022; Uysal et al., 2014; Zhao et al., 2016; Yoon et al., 2016). مطالعات بسیاری در زمینه بکارگیری این مدل‌ها برای تخصیص منابع آب انجام گرفته است که در ادامه به برخی مطالعات استفاده شده از مدل HEC-ResSim که در این پژوهش از آن بهره گرفته، اشاره می‌شود.

بابازاده و همکاران (Babazadeh et al., 2007) عملکرد مخزن سد جیرفت در تأمین آب مورد نیاز با استفاده از مدل Hec-ResSim را مورد بررسی قرار دادند. ایشان نتیجه گرفتند که این مدل به خوبی قادر به شبیه‌سازی رفتار سیستم می‌باشد. در این راستا، سد جیرفت بر اساس سناریوهای مختلف در شرایط حاضر، با توجه به رسوب دوره‌های مختلف، گسترش پروژه و افزایش بهره‌وری شبیه‌سازی شد. مدل کمبود جدی و شکست قابل توجهی را در ۲۵ درصد از دوره زمانی بهره‌برداری نشان داد. اما نتایج نشان داد که با افزایش بهره‌وری آبیاری از ۳۰ درصد کنونی به ۵۰ درصد، شکست در سیستم ۱۲ درصد کاهش و انعطاف پذیری به ۱۷ درصد افزایش می‌یابد.

مودینی و همکاران (Modini et al., 2010) از مدل Hec-ResSim به منظور شبیه‌سازی سیلاب رودخانه کلمبیا تا سال ۲۰۲۴ استفاده کردند. نتایج نشان داد که این نرم‌افزار به خوبی قادر به شبیه‌سازی تغییرات ظرفیت ذخیره مخزن می‌باشد و می‌تواند در مطالعات ارزیابی کنترل سیلاب بعد و قبل از ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گیرد.

کوچرانه و همکاران (Cochrane et al., 2010) در مطالعه‌ای چگونگی توسعه چندین سد و بهره‌برداری از آن‌ها در انشعابات سی‌سان<sup>۱</sup> و سرپک<sup>۲</sup> که می‌تواند در جریان شاخه اصلی مکونگ (واقع در کشور ویتنام) تأثیر بگذارد را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه، بهره‌برداری از سد در امتداد انشعابات سی‌سان و پرپک با HEC-HMS (مدل‌سازی سیستم هیدرولوژیکی) و HEC-ResSim (شبیه‌سازی مخزن) مدل شدند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که مدیریت هماهنگ سدها تحت یک مجموعه وسیع‌تری از قوانین بهره‌برداری می‌تواند راه‌حلی برای به حداکثر رساندن بازدهی کل اقتصادی پایین دست داشته باشد. ایشان به این نتیجه رسیدند که این مدل برای شبیه‌سازی سیستم تک مخزنی و چند منظوره قابل اجزاست و ابزاری مؤثر و قدرتمند برای تصمیم‌گیری در زمان واقعی و به منظور استفاده در مطالعات برنامه‌ریزی بسیار کاربردی است.

به علت تغییر اقلیم، خشکسالی‌های پی‌درپی و افزایش جمعیت به‌ناچار میزان بهره‌برداری از مخازن آب فزونی یافته است. در این میان اطلاع از وضعیت مخازن آبی در دشت‌های مختلف می‌تواند در مدیریت مناسب منابع آب منطقه کمک کند. بررسی مستندات موجود در خصوص سدهای کشور و تغییر ظرفیت ذخیره مخازن در طول سال‌های اخیر نشان می‌دهد که سدهای کشور به لحاظ حجم ذخیره مخزن در برخی از سال‌ها دچار کمبود آب می‌شوند. بنابراین برای کاهش اثرات سوء آن باید راهکار مناسبی را جستجو کرد. مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن آب سدها که از مهمترین منابع تأمین آب و انرژی می‌باشند، با اهدافی از قبیل تأمین نیاز آبی پایین‌دست، تولید انرژی، مدیریت سیلاب و ملاحظات زیست‌محیطی که عمدتاً غیرهمسو هستند، سر و کار دارد. مخازن سدهای چندمنظوره ممکن است به‌منظور پاسخگویی به چندین هدف از اهداف فوق احداث و بهره‌برداری شوند. مهمترین مسئله در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سدها، تعیین میزان ذخیره و رهاسازی از مخزن در هر یک از گام‌های دوره بهره‌برداری جهت تأمین نیازها می‌باشد (Bazzi et al., 2021; Oli et al. 2019; Saab et al. 2022; Sattari et al. 2013).

مدل‌های مرسوم مهندسی سیستم‌ها که در مخازن به کار گرفته شده‌اند، مدل‌های شبیه‌سازی، بهینه‌سازی و ترکیب بهینه‌سازی و شبیه‌سازی می‌باشند (Hatamkhani et al., 2021). هدف مدل‌های شبیه‌سازی، بهبود بخشیدن به طرح‌ها و سیاست‌های بهره‌برداری است. این مدل‌ها با توجه به مقدار متغیرهایی که توسط کاربر مشخص می‌شود، به پیش‌بینی رفتار سیستم می‌پردازند. اعتبار روش‌های شبیه‌سازی در توانایی آنها برای حل مدل‌هایی از تحلیل سیستم‌های منابع آب است که دارای روابط و قیدهای غیرخطی هستند در حالی که روش‌های بهینه‌سازی به ندرت توانایی رسیدگی به آن‌ها را دارند (Saab et al., 2022). مدل‌های ریاضی این فرصت را فراهم می‌کنند که با پیاده‌سازی ساختار شماتیکی از یک حوضه واقعی، فرآیندهای طبیعی و هیدرولوژیکی مرتبط با سیستم منابع آب و روابط حاکم بین بخش‌های عرضه و تقاضا شبیه‌سازی گردد و نحوه حصول به اهداف مدیریت منابع آب را با این رویکرد می‌توان ارزیابی نمود. همچنین در سال‌های اخیر مدل‌ها و بسته‌های نرم‌افزاری متعددی در راستای شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب توسعه یافته‌اند. از مدل‌های مطرح در شبیه‌سازی مخازن می‌توان به مدل‌های MIKE، MADISM، AQUQTOOL، RIBASIM، WEAP، BASIN و HEC-ResSim اشاره کرد. اکثر مدل‌های هیدرولوژیکی قابلیت‌های

1- Se San

2- Sre Pok

می‌یابد. طبق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی مخزن سد تاربالا بطور کل میانگین تولید انرژی سالانه ۶/۵ درصد کاهش می‌یابد. چندل و همکاران (Chandel et al., 2022) در مطالعه‌ای با هدف مدیریت ارتفاع مخزن و مدیریت حجم ذخیره سازی مخزن از مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim استفاده کردند. در این مطالعه از داده‌های تغییرات ارتفاع سطح آب و دبی روزانه ورودی به مخزن از سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۴ به عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های هندسی و هیدرولیکی از سد و مخزن در فرآیند شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. همچنین در این مطالعه ارتفاع سطح آب برای حجم مرده مخزن معادل ۳۸۵/۴ متر در نظر گرفته شد. به طوری که ارتفاع سطح آب برای حجم مفید مخزن در حالت بیشینه و کمینه به ترتیب معادل ۳۸۹/۹۷ و ۴۲۱/۳۸ متر اعمال گردید. همچنین ارتفاع مخزن به منظور کنترل سیلاب معادل ۴۳۴/۳۴ متر قرار داده شد. در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل، ضریب تعیین برای مولفه‌های موردنظر مانند ارتفاع مخزن و ذخیره‌سازی مخزن از طریق نمودار رگرسیون برآورد گردید که نتایج حاکی از دقت ۹۵ درصدی مدل می‌باشد. همچنین، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای هر دو مولفه شبیه‌سازی شده محاسبه شد و در محدوده قابل قبولی برآورد گردید.

با توجه به قابلیت‌های مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim و با توجه به نیازهای موجود پایین دست سد لتیان و ضرورت مدیریت صحیح منابع آب نحوه بهره‌برداری از مخزن سد لتیان با استفاده از مدل HEC-ResSim شبیه‌سازی و عملکرد مخزن این سد مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین ضمن شبیه‌سازی منابع و مصارف آب در پایین دست سد لتیان، به بررسی تغییرات ظرفیت ذخیره مخزن، تغییرات ارتفاع سطح آب، تغییرات تولید انرژی و رهاسازی آب پرداخته می‌شود. از طرفی اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف آب و تغییر مولفه‌های مخزن سد لتیان تحت سناریوهای صرفه‌جویی و مقایسه آن با شرایط واقعی از جمله اهداف پژوهش حاضر می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز جاجرود تا محل سد لتیان بین طول‌های جغرافیایی ۲۳° ۵۱' تا ۵۱° ۵۱' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۴۵' ۳۵° تا ۵۰' ۳۶° شمالی واقع شده است. همچنین در پایین دست سد لتیان شهرستان جاجرود واقع شده است که طولی در حدود ۲۲ کیلومتر را شامل می‌شود. تراز ارتفاعی کف رودخانه در بالادست ۱۵۰۶ متر و در پایین دست ۱۲۵۹ متر نسبت به سطح آب‌های آزاد می‌باشد. مطالعات سد لتیان در سال ۱۳۳۸ آغاز گردید و در سال ۱۳۴۲ عملیات احداث آن شروع و در سال ۱۳۴۶ به بهره‌برداری رسید. این سد بر روی رودخانه جاجرود با سطح حوضه آبریزی به مساحت ۶۹۸۰۰ کیلومتر مربع و با

عمادی و خادمی (Emadi and Khademi, 2011) برای سد مخزنی درودزن با استفاده از مدل ابدهی چهار سیاست بهره‌برداری با هدف تامین صددرصد نیاز شرب و صنعت و ۸۰، ۷۰، ۶۰ و ۵۰ درصد نیاز کشاورزی تعریف و مجموع مربعات کمبود مربوط به هر یک از آن‌ها را محاسبه کردند. ایشان نتیجه گرفتند فقط سیاست‌های اول و دوم به ترتیب با مجموع مربعات کمبود ۰/۲، ۹۰۵/۳۱، ۲۰۳۶/۳۱ که کمتر از مجموع مربعات کمبود در مدل SOP می‌باشند، قابل پذیرش هستند. در سیاست‌های اول و دوم به ترتیب ۷۳/۲۶ و ۳۹/۸۴ درصد بهبود در بهره‌برداری نسبت به مدل SOP مشاهده شده است. سیاست‌های سوم و چهارم با مجموع مربعات کمبود بیشتری نسبت به مدل SOP غیر قابل اجرا می‌باشند.

در مطالعه‌ای، مدل HEC-ResSim برای شبیه‌سازی مخزن به منظور بررسی تأثیر تغییرات آب و هوا بر تولید برق در مخزن مانگلا پاکستان استفاده شد. از آنجایی که مخزن مانگلا در سال ۲۰۰۹ به میزان ۱۲ متر افزایش یافته بود، این مدل برای دو سناریو تنظیم شد، پیش از بالا رفتن و پس از بالا رفتن. بر اساس شبیه‌سازی‌ها، به این نتیجه رسیدند که در آینده افزایش تولید سالانه نیروگاه‌های آبی برای سناریوی پیش از بالا رفتن ۱۳ تا ۱۵/۳ درصد و برای سناریوی پس از بالا رفتن ۱۶/۶ تا ۲۰/۴ درصد افزایش خواهد داشت (Mahmood, 2013).

تقیان (Taghian, 2016) به منظور تعیین ظرفیت بهینه مخزن سد برای تامین نیازهای مختلف از یک مدل شبیه‌سازی مجهز به فرآیند برنامه‌ریزی خطی شبکه جریان استفاده کرد. با پیاده‌سازی این مدل در سیستم منابع آب رودخانه خمین، مطابق نتایج به دست آمده ظرفیت بهینه سد مخزنی نیشهر معادل ۴/۶ میلیون متر مکعب برآورد گردید که در این حالت قادر به حفظ اعتمادپذیری ۸۵ درصد در تامین نیازها است. نتایج حاکی از حساسیت ابعاد حجم مخزن نسبت به انتخاب اعتمادپذیری دارد که میزان این حساسیت ناشی از شدت و طول دوره های کمبود آب است.

در مطالعه دیگری مونیبر و همکاران (Munir et al., 2022) به منظور بررسی و پیش‌بینی ظرفیت ذخیره مخزن سد تاربالا از مدل شبیه سازی HEC-ResSim استفاده کردند. همچنین این مطالعه را با در نظر گرفتن تأثیر رسوب بر بهره‌برداری و کاهش ظرفیت ذخیره مخزن سد تاربالا انجام دادند. پس از واسنجی و اعتبارسنجی، این مدل برای پیش‌بینی اثرات بهره‌برداری مخزن در آینده به صورت ۵ ساله از سال ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ برای تعیین ظرفیت ذخیره‌سازی، رهاسازی‌های آبیاری و تولید انرژی استفاده شد. مطابق با نتایج به دست آمده پیش‌بینی گردید که با کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی مخزن به دلیل رسوب‌گذاری، رهاسازی آبیاری از April تا September به میزان ۷ درصد افزایش و از October تا March به میزان ۵۰ درصد کاهش یابد همچنین تولید برق به ترتیب به میزان ۴ درصد افزایش و به میزان ۳۷ درصد کاهش

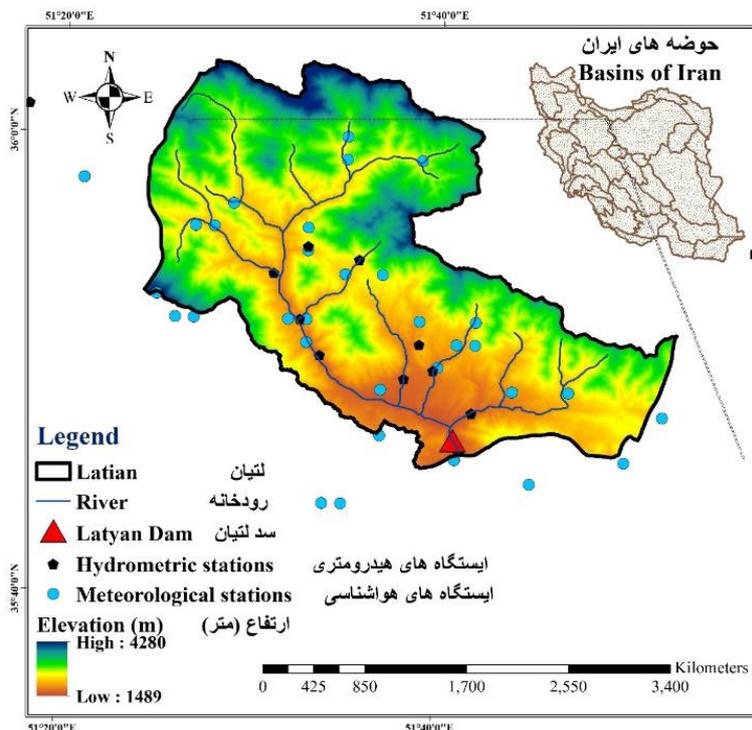
برای کمک به کارشناسان آب در پیش‌بینی رفتار مخزن با تغییرات بهره‌برداری خاص ایجاد شده است، استفاده گردید. مدل HEC-ResSim قادر به شبیه‌سازی عملکرد مخزن و الگوهای مختلف بهره‌برداری از آن می‌باشد. همچنین یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی بهره‌برداری مخزن و فرآیندهای مختلف در کاربردهای برق آبی و آبیاری است. از خروجی‌های این مدل می‌توان در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، تخصیص منابع آبی، طراحی مخازن سدها، بررسی مسائل زیست محیطی، برنامه‌ریزی توان تولید انرژی برق-آبی، کنترل سیلاب و ... استفاده نمود.

**شکل ۲** نشان‌دهنده مدل مفهومی مورد استفاده در پژوهش حاضر می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌شود اجرای مدل HEC-ResSim در سه مرحله خلاصه می‌شود. مدول Watershed Setup به منظور معرفی شمای کلی حوضه به کار می‌رود. در این مدول می‌بایست شکل و موقعیت جغرافیایی حوضه و عناصر وابسته از قبیل رودخانه‌ها، مخازن، ایستگاه‌های اندازه‌گیری و سایر پروژه‌های موجود در آن مشخص گردد. مدول Reservoir Network به منظور معرفی شبکه مخازن مورد نظر و ورود مشخصات فیزیکی و نحوه بهره‌برداری از آن‌ها به کار می‌رود. مدول Simulation به منظور معرفی دوره شبیه‌سازی و نمایش خروجی‌های مدل طراحی گردیده است. در این مدول می‌بایست زمان و دوره شبیه‌سازی و الگوی بهره‌برداری موردنظر تعیین گردد.

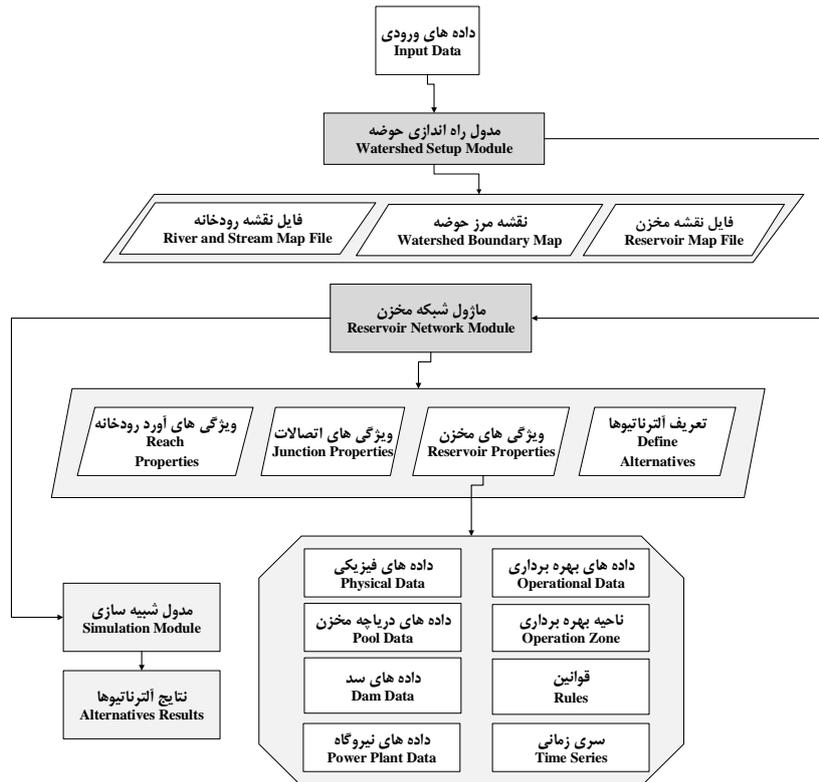
متوسط جریان آب سالانه به میزان ۳۵۰ میلیون متر مکعب در استان تهران و در فاصله ۳۵ کیلومتری شمال شرقی تهران و ۵ کیلومتری بخش جاجرود قرار دارد. نیروگاه کلان در فاصله ۲۰ کیلومتری در منطقه کلان، بالادست سد لتیان احداث گردیده است (IWRMC, 2013). طبق گزارشات شرکت مدیریت منابع آب ایران (IWRMC, 2015) از جمله اهداف احداث سد لتیان می‌توان به تأمین آب شرب تهران به میزان ۲۹۰ میلیون متر مکعب از طریق تونل ۹/۵ کیلومتری به تصفیه خانه تهرانپارس، تأمین آب زراعی دشت ورامین به میزان متوسط ۱۶۰ میلیون متر مکعب و تولید متوسط سالانه ۷۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق - آبی جهت شبکه سراسری اشاره کرد. طبق برنامه اولیه احداث سد، یک سوم حجم قابل تنظیم سالانه سد (۸۰ میلیون متر مکعب در سال) به تهران و بقیه به دشت ورامین اختصاص داده شده بود. اما به دلیل افزایش بی‌رویه نیاز تهران ناگزیر سالانه از سهمیه ورامین کاسته و به سهمیه تهران افزوده شد به نحوی که در سنوات اخیر میزان آب انتقالی به تهران به بیش از سه برابر سهمیه اولیه رسیده است. در شکل ۱ موقعیت سد لتیان در حوضه آبریز جاجرود مشاهده می‌گردد.

#### مدل شبیه‌سازی HEC-ResSim

در این پژوهش از مدل HEC-ResSim که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژی (HEC)، مهندسين ارتش ایالات متحده (USACOE)



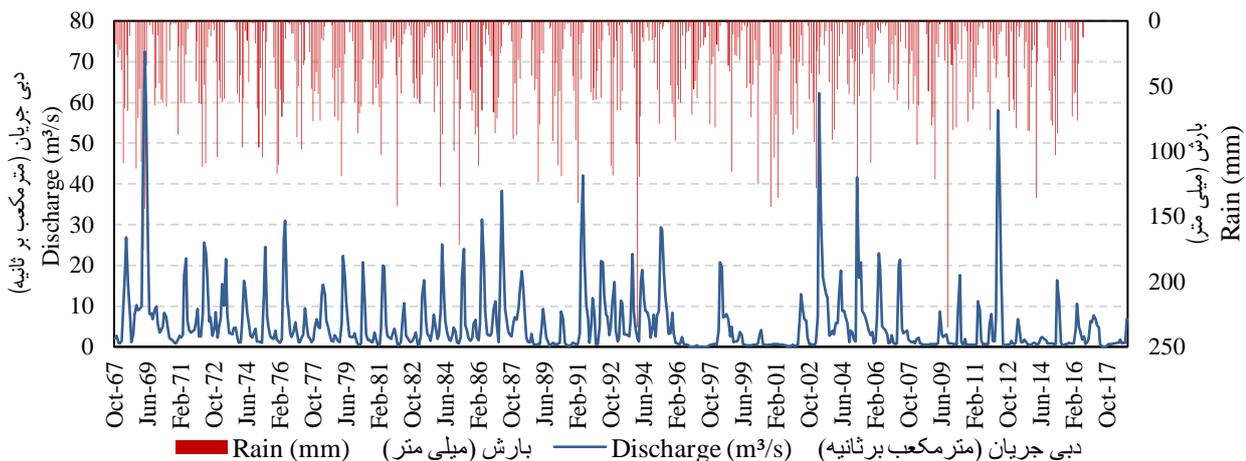
شکل ۱ - نقشه موقعیت سد لتیان  
Figure 1- Location of Latyan Dam



شکل ۲- مراحل شبیه‌سازی مدل HEC-ResSim  
Figure 2- Flow chart for the HEC-ResSim Simulation

و در ۴ ماه میلادی July، August، September و October معادل ماه‌های تیر، مرداد، شهریور و مهر کمتر از ۸ درصد از کل جریان سالانه مورد انتظار است. طبق بررسی داده‌های بارندگی ایستگاه هواشناسی لتیان متوسط بارندگی ماهانه برای کل دوره آماری ۳۴/۹ میلی‌متر و بیشترین میزان بارندگی نیز برابر ۲۳۵ میلی‌متر محاسبه گردید.

در شکل ۳ تغییرات توام دبی و بارندگی به صورت ماهانه برای ایستگاه هیدرومتری و هواشناسی لتیان قرار داده شده است. بررسی درصد آورد ماهانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه جاجرود گویای آن است که در ۳ ماه میلادی March، April، May معادل ماه‌های اسفند، فروردین و اردیبهشت تقریباً ۶۳ درصد از کل جریان سالانه رخ می‌دهد



شکل ۳- روند تغییرات دبی مشاهداتی و بارندگی برای دوره شبیه‌سازی از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸

Figure 3- The trend of changes in observed discharge and rainfall for the simulation period from 1968 to 2018

سرریز شده از سد بیش از چهل درصد متوسط سالانه ورودی به مخزن می‌باشد) سهم نسبتاً کمی از آورد سالانه رودخانه را می‌توان کنترل نمود و بخش قابل توجهی از آن سالانه بصورت سرریزهای غیر قابل تنظیم به پائین دست منتقل می‌گردد. اما با گذشت زمان با کاهش میزان ورودی به مخزن سد لتیان، میزان حجم ذخیره‌سازی شده در مخزن نیز کاهش یافته و در بسیاری از سال‌ها علاوه بر اینکه ظرفیت ذخیره مخزن تکمیل نمی‌شود از طرفی سرریز هم از سد اتفاق نمی‌افتد.

#### داده‌های تحقیق

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در مطالعه حاضر از متوسط گیری مقادیر ایستگاه‌های هواشناسی داخل حوضه استخراج شده است. همچنین با توجه به اینکه ایستگاه هیدرومتری لتیان روی رودخانه جاجرود، تنها ایستگاهی بود که داده‌های کامل برای کل دوره شبیه سازی در آن ثبت شده بود. بنابراین از داده‌های این ایستگاه به عنوان ورودی به مخزن استفاده گردید. همچنین سایر اطلاعات ورودی از جمله مشخصات مخزن و نیروگاه در جدول‌های ۱، ۲ و ۳ و در شکل-های ۴ و ۵ سایر داده‌های ورودی مورد نیاز مدل شبیه‌سازی ارائه گردیده است. در جدول ۱ مشخصات هندسی سازه سد لتیان نشان شده است. این مشخصات شامل ارتفاع سد، طول سد، عمق آب در پایین دست سد، ضریب سرریز و طول سرریز می‌باشد (IWRMC, 2015). همچنین در جدول‌های ۲ و ۳ به ترتیب مشخصات نواحی ذخیره سد لتیان و مشخصات ظرفیت تولیدی و منحنی فرمان نیروگاه کلان ارائه شده است. طبق جدول ۲ ارتفاع ۵۸ متر به عنوان حجم مرده سد، ارتفاع ۸۰ متر به عنوان کنترل سیلاب و بین آن‌ها به عنوان حجم مفید مخزن در نظر گرفته می‌شود (IWRMC, 2015).

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - E_t - O_t \quad (1)$$

معادله حاکم مدل HEC-ResSim را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

که در آن  $S_{t+1}$  ذخیره در روز  $t+1$ ،  $S_t$  ذخیره در روز  $t$ ،  $I_t$  ورودی به مخزن،  $E_t$  تبخیر از دریاچه سد و  $O_t$  خروجی از مخزن می‌باشد. حداکثر افزایش سطح مخزن به ظرفیت تخلیه سرریز در ارتفاعات مختلف مخزن بستگی دارد. میزان جریان خروجی از سرریز سد در مدل شبیه‌سازی با معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$Q = C. B. a. \sqrt{2}. g. Do \quad (2)$$

که در آن  $Q$  دبی ( $m^3/s$ )،  $C$  ضریب سرریز،  $B$  عرض سرریز،  $a$  درجه سرریز،  $g$  شتاب و  $Do$  عمق آب روی سرریز است. همچنین از رابطه (۳) برای تعیین میزان رهاسازی از تونل برق به منظور تولید برق استفاده می‌شود (Munir et al., 2022).

$$Q = 0.102 \times \left( \frac{E_n}{\eta \times h \times t} \right) \quad (3)$$

که در آن  $E_n$  تولید انرژی ( $MWh$ )،  $\eta$  بازده،  $h$  ارتفاع ( $m$ )،  $t$  زمان ( $h$ ) و  $Q$  آزادسازی مخزن ( $m^3/s$ ) است. در نهایت ذخیره‌سازی پس از خروجی از طریق نشت، تبخیر و تعرق و رهاسازی از سرریزها، تونل‌های برق و آبیاری، توسط مدل HEC-ResSim از معادله زیر برآورد می‌گردد.

$$S_2 = S_1 - E_{VAP} + (INFLOW - OUTFLOW). CQS \quad (4)$$

که در آن  $E_{VAP}$  تبخیر در طول بازه زمانی،  $OUTFLOW$  مجموع خروجی از طریق رهاسازی و نشت،  $CQS$  تخلیه حجم مفید مخزن است (Munir et al., 2022).

به علت ظرفیت تنظیم محدود سد لتیان (متوسط سالانه میزان آب

جدول ۱- مشخصات هندسی سازه سد لتیان

Table 1- Geometrical characteristics of the Latian Dam structure

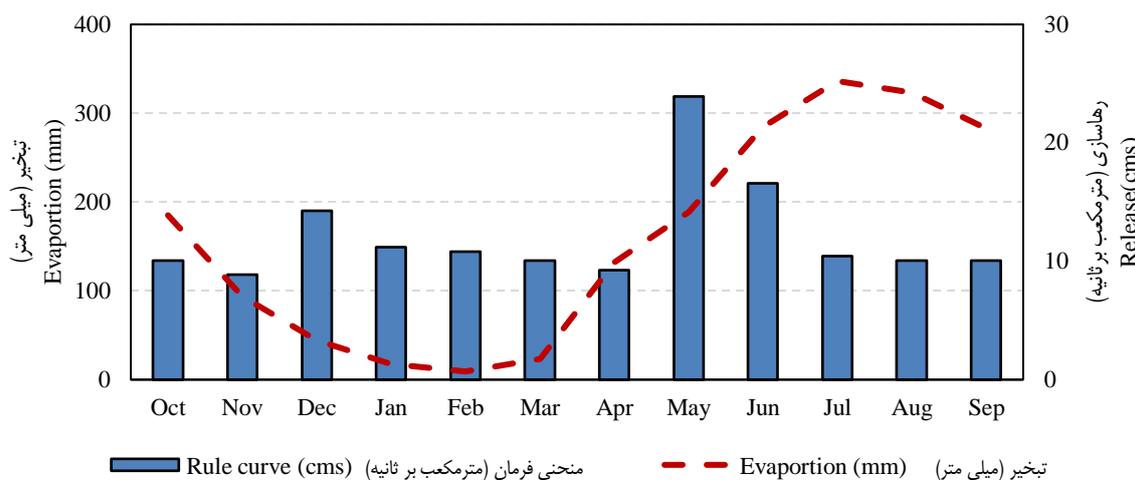
ارتفاع از بستر رودخانه (متر)	80
Elevation at top of Dam (m)	
طول تاج سد (متر)	450
Length at top of Dam (m)	
ارتفاع آب در پایین دست سد (متر)	21
Tailwater Elevation (m)	
ارتفاع خروجی (متر)	70
Outlet Elevation (m)	
ضریب سرریز	0.67
Weir Coef.	
طول (متر)	140
Length (m)	

جدول ۲- مشخصات نواحی ذخیره سد  
Table 2- Characteristics of Reservoir storage Zones

ناحیه‌های سد Reservoir Zones			
حجم مرده (ذخیره رسوب) Inactive (Sediment Storage)	حجم مفید (تامین آب) Conservation (Water Supply)	کنترل سیلاب Flood Control	
58	تاریخ Date	ارتفاع (متر) Top Elevation(m)	80
-	Jan	62	-
-	Apr	70	-
-	Sep	70	-
-	Dec	62	-

جدول ۳- مشخصات ظرفیت تولیدی و منحنی فرمان نیروگاه کلان  
Table 3- Specifications of production capacity and rule curve of Kalan power plant

خروجی کنترل شده Controlled Outlet		نیروگاه Power Plant		
ارتفاع (متر) Elevation (m)	حداکثر ظرفیت (مترمکعب بر ثانیه) Max Capacity (cms)	ظرفیت نیروگاه (مگاوات) Power Plant Capacity (MW)	تاثیر توان (درصد) Power Pl. Eff. (%)	عامل اضافه بار Overload Factor
58	50	45	65	1.1
62	135	-	-	-
65	180	-	-	-
68	210	-	-	-
70	250	-	-	-



شکل ۴- منحنی فرمان سد و متوسط تبخیر از تشریح ایستگاه هواشناسی برای کل دوره زمانی ۵۰ سال

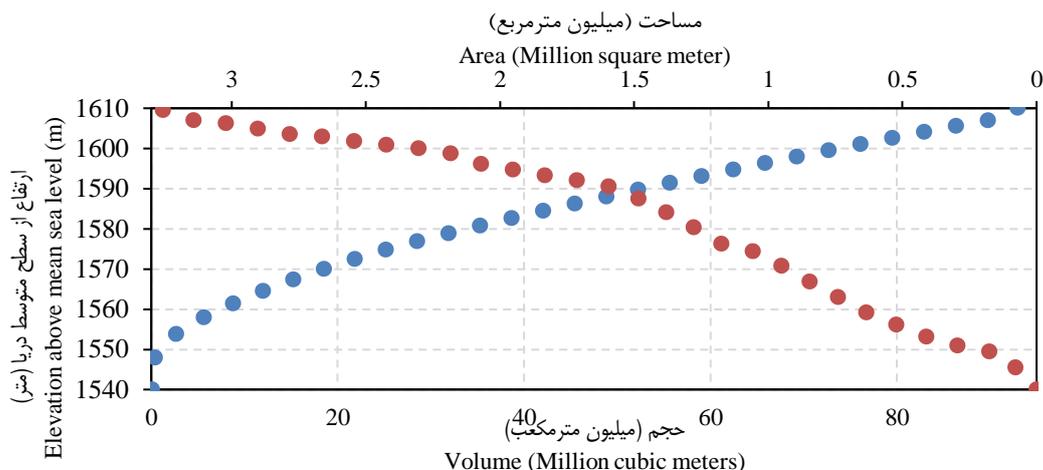
Figure 4- Rule curve of Dam and average monthly evaporation of meteorological station for a period of 50 years

این مطالعه انتخاب شده است. مدل HEC-ResSim برای دوره زمانی مورد نظر با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه هیدرومتری رودخانه جاجرود اجرا گردید. به منظور کنترل و اطمینان به صحت عملکرد مدل شبیه‌سازی از داده‌های مشاهداتی جریان رودخانه و مقادیر رهاسازی شده استفاده گردید (شکل ۶). کنترل مدل با در نظر گرفتن ضریب تبیین برای کل دوره شبیه‌سازی انجام گردید که معادل ۰/۸۳ برآورد شد.

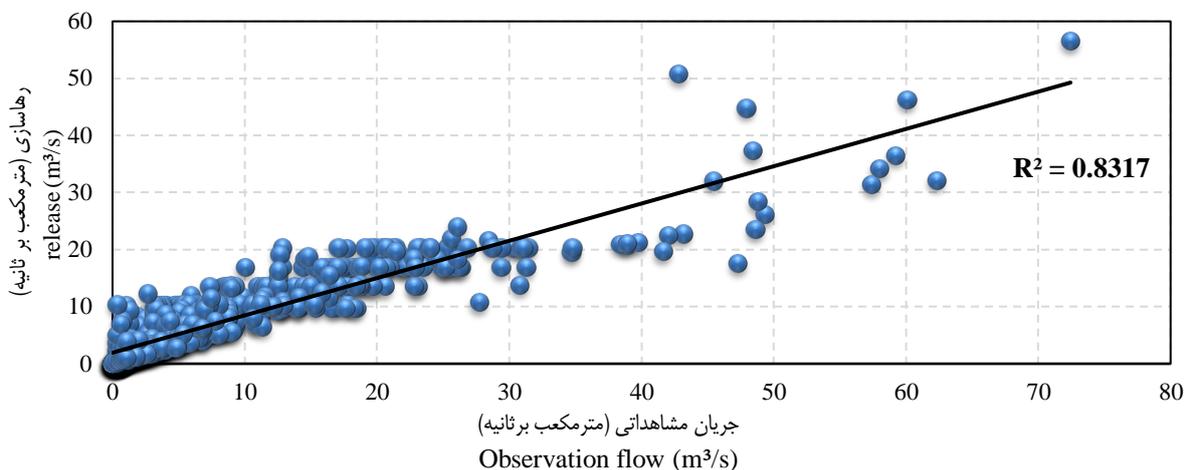
طبق بررسی مطالعات انجام شده قوانین بهره‌برداری از مخزن (منحنی فرمان سد) طبق نیاز پایین دست (شرب، کشاورزی، صنعت، محیط زیست) در هر ماه به همراه متوسط ماهانه تبخیر در شکل ۴ قرار داده شده است. منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد لتیان نیز به عنوان یکی از ورودی‌های مدل HEC-ResSim، در شکل ۵ مشخص نشان داده شده است (Behrangi et al., 2014).

## نتایج و بحث

دوره آماری از سال ۱۹۶۸ تا سال ۲۰۱۸ به عنوان دوره شبیه‌سازی



شکل ۵- منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن سد لتیان  
Figure 5- The volume, surface area, and elevation curves of the Latian Reservoir



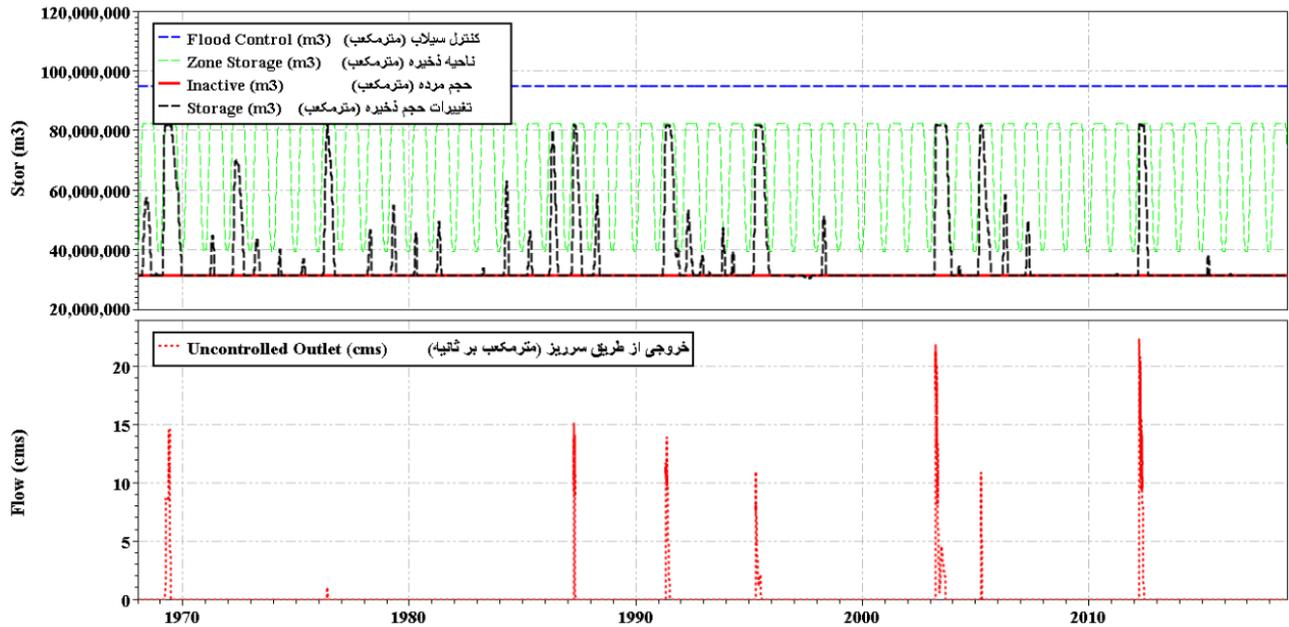
شکل ۶- نمودار پراکنش جریان مشاهده‌ای و رهاسازی برآورد شده توسط مدل HEC-ResSim  
Fig. 6- Scatter plot of observation flow and release estimated by HEC-ResSim model

شکل ۷ سطح آب در مخزن در مواقعی بخصوص در اواخر دوره شبیه سازی حتی پایین تر از تراز قابل بهره برداری (۶۰ متر) می رسد که ناشی از کاهش آورد رودخانه جاجرود می باشد. میانگین سالانه حجم ذخیره مخزن از سال ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۸ در شکل ۸ قرار داده شده است. نتایج نشان می دهد که بیشترین میزان حجم ذخیره مخزن در سال ۲۰۰۳ معادل ۶۲/۷ میلیون متر مکعب برآورد شده است. همچنین متوسط ارتفاع آب در مخزن نیز در این سال به میزان ۶۵/۲ متر محاسبه شد که بیشتر از سایر سال ها می باشد. ملاحظه می شود به طور متوسط ۴۵ درصد از حجم مخزن خالی از آب است. که مستلزم توجه به مدیریت و برنامه ریزی صحیح و ارائه راهکارهای مناسب می باشد.

بعد از اجرای موفق مدل شبیه سازی مخزن نتایج به دست آمده از مدل برای مولفه های مختلف ارائه می گردد. شکل ۷ تغییرات ذخیره مخزن و مقادیر سرریز برای دوره شبیه سازی از سال ۱۹۶۸ تا سال ۲۰۱۸ نشان می دهد. طبق این شکل بیشترین مقدار ذخیره مخزن در کل دوره شبیه سازی تقریباً معادل ۸۳ میلیون متر مکعب می باشد. همچنین کمترین میزان ذخیره مخزن تقریباً معادل ۳۲ میلیون متر مکعب می باشد. این مقدار حدبالای حجم مرده سد (۲۸ میلیون متر مکعب) می باشد. طبق بررسی گزارشات و مطالعات انجام شده حجم قابل تنظیم سالانه سد لتیان معادل ۸۰ میلیون متر مکعب گزارش شده است. در مطالعه حاضر مقادیر حجم مرده و حجم مفید سد لتیان به ترتیب معادل ۲۸ و ۸۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید که نشان دهنده همگرایی نتایج مدل با سایر مطالعات انجام شده می باشد. مطابق با

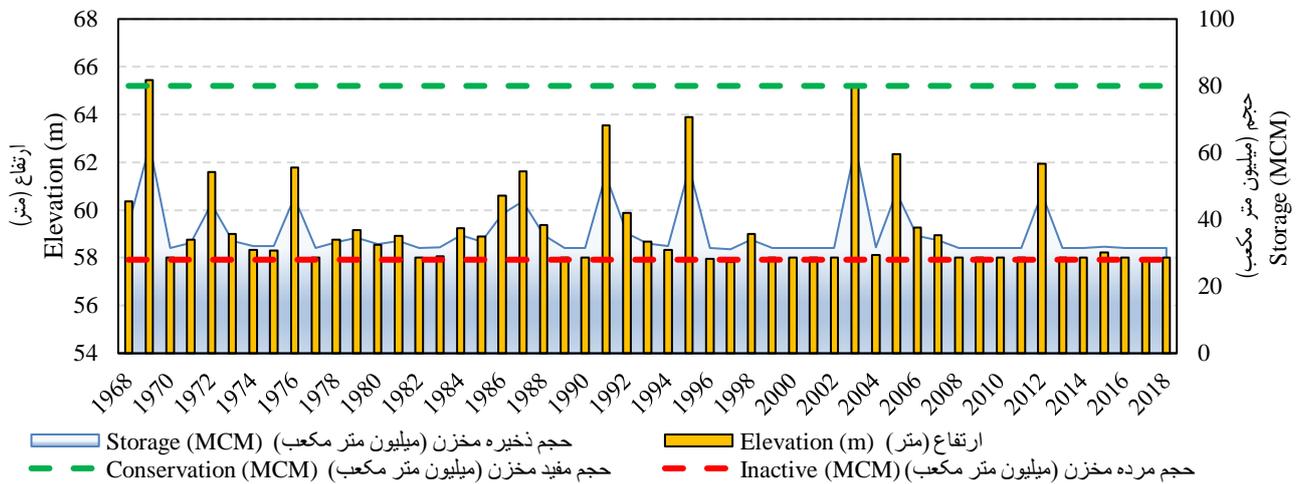
آمده از مدل در شکل ۸ ملاحظه می‌شود که بیشترین مقدار سرریز اتفاق افتاده در کل دوره شبیه‌سازی معادل ۲۵ متر مکعب بر ثانیه می‌باشد. همانطور که مشخص است سرریز از مخزن در مواقعی اتفاق افتاده است که ظرفیت حجم مفید مخزن به صورت کامل پر شده باشد که نشان‌دهنده صحت عملکرد مدل نیز می‌باشد.

میانگین حجم مخزن سد لتیان در مطالعه مهین‌خواه و همکاران (Mihankhah et al., 2012) از سال ۱۳۵۵ تا ۱۳۸۹ با استفاده از مدل بهینه‌سازی تصادفی ۴۸ میلیون متر مکعب برآورد شده بود که این میزان در مطالعه حاضر برای کل دوره ۵۰ ساله معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید. از طرفی مدل مقدار آب سرریز شده را هم در طول دوره شبیه‌سازی محاسبه می‌کند. مطابق با نتایج به دست



شکل ۷- نمودار مقایسه حجم مخزن شبیه‌سازی شده و سرریز از مخزن برای دوره شبیه‌سازی

Figure 7- The comparison chart of the volume of the simulated reservoir and the uncontrolled Outlet from the reservoir for the simulation period



شکل ۸- نمودار متوسط سالانه حجم مخزن شبیه‌سازی شده و ارتفاع سطح آب

Figure 8- Annual average simulated reservoir volume and water level height

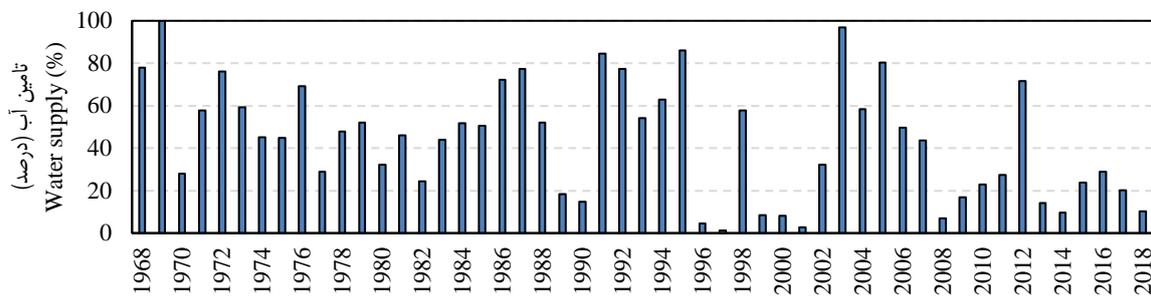
۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ سد لتیان توانسته به ترتیب ۱۰۰ و ۹۷ درصد نیاز پایین دست را تامین کند. میزان موفقیت سد لتیان در تامین نیاز شرب، صنعت

شکل ۹ درصد رسیدن به هدف در تامین آب مورد نیاز توسط سد لتیان را برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در سال

نمودار توان تولید و تولید انرژی برق-آبی می‌باشد. ملاحظه می‌شود هر چقدر میزان رهاسازی بیشتری صورت بگیرد میزان برق تولید شده افزایش پیدا می‌کند. همچنین با توجه به مشخصات ظرفیت تولیدی برق سد لتیان (جدول ۳)، مقدار توان تولید برق در سد لتیان ۴۵ مگا وات می‌باشد که با احتساب ۱/۱ درصد (Overload Factor) حداکثر توان تولید برق در نیروگاه کلان برای هر گام زمانی معادل ۴۹/۵ مگاوات می‌شود. مطابق نتایج به دست آمده در شکل ۱۰ ملاحظه می‌شود که در طول دوره شبیه‌سازی بیشترین و کمترین توان تولیدی برق برای هر گام زمانی به ترتیب معادل ۴۹/۵ و ۷/۷۵ برآورد گردید که نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل شبیه‌سازی مورد استفاده در این پژوهش می‌باشد.

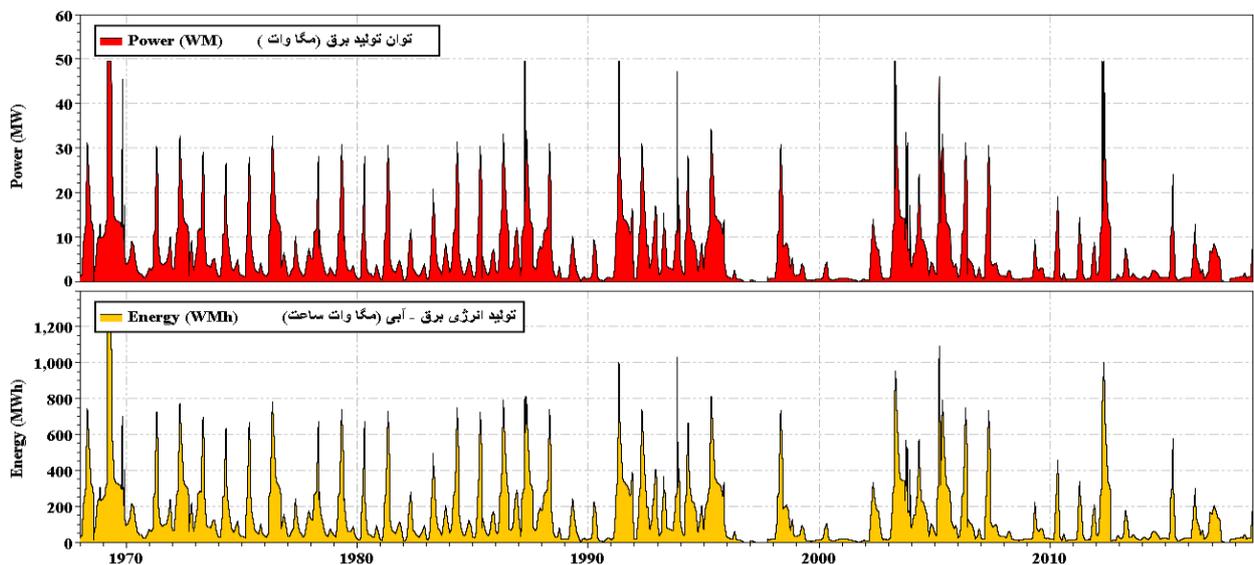
و محیط زیست پایین دست در کل دوره بهره‌برداری ۴۲ درصد می‌باشد. همچنین در سال ۱۹۹۷ با توجه به اینکه متوسط دبی ورودی به مخزن ۰/۲ متر مکعب بر ثانیه بوده، سد لتیان فقط ۱/۳ درصد از نیاز آب پایین دست را تامین کرده است. مطابق نتایج حاصل از اجرای مدل میانگین آب رهاسازی سد لتیان برای ۲۵ سال اول و دوم بهره‌برداری به ترتیب معادل ۶/۱ و ۳/۷ متر مکعب بر ثانیه بوده که به‌طور متوسط ۵۰ و ۳۲ درصد از نیاز پایین دست برآورده شده است. این درحالی است در اواخر دوره شبیه‌سازی به خصوص از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸ سد لتیان فقط قادر به تأمین ۲۴ درصد نیاز پایین دست می‌باشد.

میزان تولید انرژی برق-آبی از طریق توربین و ژنراتور سد بستگی به میزان آب رهاسازی شده به نیروگاه دارد. طبق شکل ۱۰ که شامل



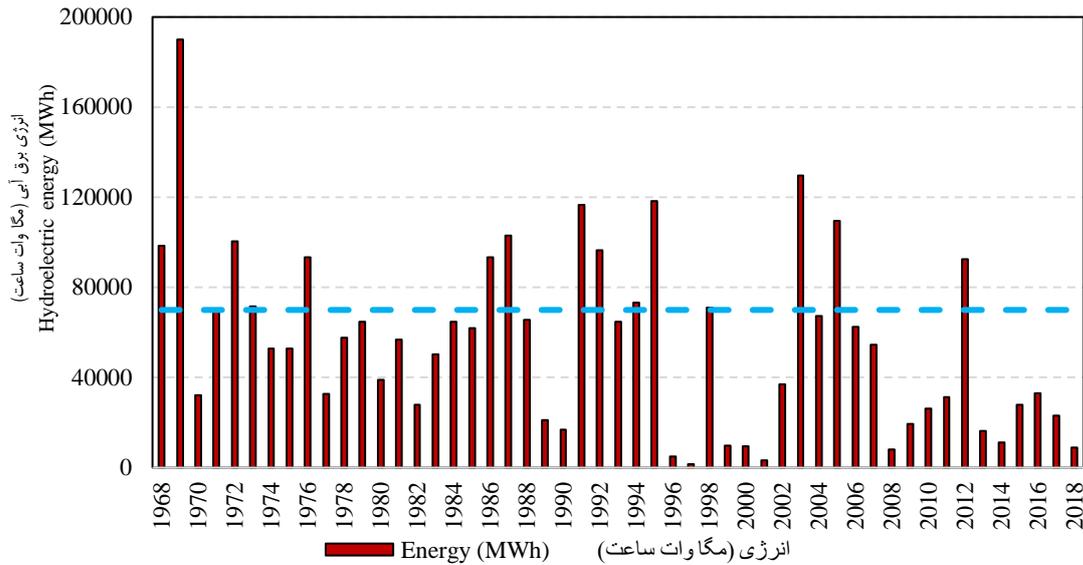
شکل ۹- درصد تامین آب مورد نیاز پایین دست سد لتیان با مدل HEC-ResSim

Figure 9- Percentage of required water supply downstream of Latian dam with HEC-ResSim model



شکل ۱۰- نمودار مقایسه توان تولید برق و تولید انرژی برق-آبی شبیه‌سازی شده از مخزن سد لتیان برای دوره شبیه‌سازی

Figure 10- The comparison chart of the production power and the simulated water-electric energy production from the Latian reservoir for the simulation period

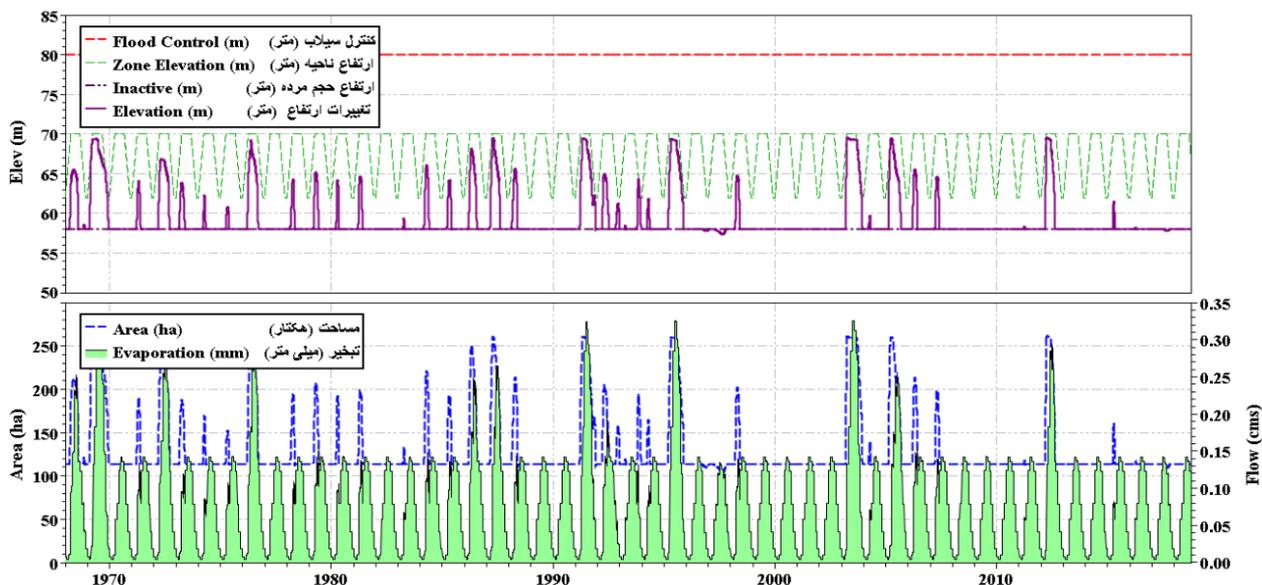


شکل ۱۱- متوسط سالانه انرژی برق-آبی تولید شده سد لتیان با مدل شبیه‌سازی  
Figure 11- Average annual energy production from Latian dam with simulation model

لتیان در ارتفاع ۷۰ متر مورد استفاده قرار می‌گیرد بر این اساس ارتفاع سطح آب در مخزن سد لتیان به بیشتر از ۷۰ متر نمی‌رسد مگر در مواقعی که حجم آب مازاد در سد از ظرفیت تخلیه سرریز بیشتر باشد. از طرفی در این شکل مساحت دریاچه سد برای ارتفاع ۵۸ و ۷۰ متر به ترتیب معادل ۱۲۵ و ۲۷۰ هکتار برآورد گردید. تبخیر از سطح دریاچه سد لتیان نیز به عنوان یکی از خروجی‌های معادله بیلان می‌باشد که مطابق نتایج با افزایش مساحت دریاچه سد افزایش پیدا می‌کند. با توجه به شبیه‌سازی مناسب مخزن توسط مدل HEC-ResSim، نتایج حاکی از آن است که مقادیر ماهانه نیاز پایین دست به خصوص در دهه اخیر به مراتب بیشتر از ورودی به مخزن سد لتیان بوده است. بنابراین تنها رویکرد به منظور مدیریت نتیجه‌محور در راستای حل مشکل کمبود مخزن، صرفه‌جویی در مصرف آب می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه بیش از ۹۰ درصد تقاضای آب از سد لتیان برای آب شرب تهران می‌باشد، بنابراین با ارائه یک سناریو صرفه‌جویی در مصرف آب شرب می‌توان هم به استفاده بهینه از منابع آبی کمک کرد و هم می‌توان میزان انرژی مورد نیاز را نیز تا حد قابل قبولی تامین کرد. در راستای ضرورت این مسئله در پژوهش حاضر از دو سناریو صرفه‌جویی در مصارف به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد استفاده گردید. نتایج به دست آمده از این دو سناریو در جدول ۴ ارائه شده است.

همانطور که اشاره گردید یکی از اهداف احداث سد لتیان تولید متوسط سالانه ۷۰۰۰۰ مگاوات ساعت انرژی برق - آبی جهت شبکه سراسری می‌باشد (IWRMC, 2015). مطابق با نتایج به دست آمده از مدل شبیه‌سازی مخزن، متوسط سالانه تولید انرژی برق-آبی نیروگاه سد لتیان معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات ساعت برآورد گردید که نشان‌دهنده همگرایی نتایج مدل HEC-ResSim با مقادیر واقعی می‌باشد. در شکل ۱۱ مقادیر انرژی برق-آبی تولید شده از سد لتیان با مدل شبیه‌سازی برای سال‌های مختلف قرار داده شده است. مطابق نتایج در ۱۶ سال از ۵۰ سال بهره‌برداری، نیروگاه برق-آبی کلان ۱۰۰ درصد نیاز را به طور کامل تامین کرده است. به طور متوسط نیروگاه کلان برای کل دوره شبیه‌سازی قادر به تامین ۸۰ درصد نیاز برق-آبی محدوده مطالعاتی می‌باشد.

شکل ۱۲ نشان دهنده توام تغییرات ارتفاع سطح آب در سد لتیان در مقابل تغییرات مساحت دریاچه سد و تبخیر برای کل دوره شبیه‌سازی می‌باشد. مطابق با محدودیت‌های بهره‌برداری در ارتفاعات مختلف و مشخصات نواحی ذخیره‌سازی سد لتیان (جدول ۲) مشاهده می‌شود که تغییرات بازه ارتفاع آب در مخزن بین ارتفاع ۵۸ و ۷۰ متر می‌باشد. با توجه به سیاست بهره‌برداری سد لتیان در مطالعه حاضر امکان بهره‌برداری از حجم مرده مخزن لتیان (ارتفاع کمتر از ۵۸ متر) در واقعیت و مدل شبیه‌سازی قرار نگرفته است. همچنین با توجه به اینکه سرریز سد



شکل ۱۲- نمودار تغییرات ارتفاع سطح آب در مقابل تغییرات مساحت دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه  
 Figure 13- Chart of water level changes against lake area changes and evaporation from the lake surface

طبق نتایج به دست آمده متوسط ذخیره مخزن سد لتیان برای کل دوره در سناریو اول و دوم به ترتیب معادل ۴۹ و ۶۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید. همچنین مخزن سد لتیان با اعمال سناریو صرفه‌جویی اول و دوم قادر خواهد بود که سالانه معادل ۶۶۰۰۰ و ۶۳۰۰۰ مگاوات ساعت تولید انرژی برق- آبی داشته باشد. بطور کلی نتایج حاکی از آن است که با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصارف خانگی تهران، علاوه بر اینکه به جهت تامین انرژی در حد قابل قبول، نیازی به رهاسازی بیشتر آب به نیروگاه کلان، به منظور تولید انرژی لازم نخواهد بود. همچنین کمبود آب در سد لتیان به میزان مناسبی به‌خصوص در سناریو دوم رفع گردید اما همچنان از سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ به دلیل کاهش شدید آورد رودخانه جاجرود، مشکل کمبود مخزن سد لتیان وجود دارد که نیازمند صرفه‌جویی بیشتر در مصارف آب می‌باشد.

به طور کلی مطابق با نتایج حاصل شده میزان حجم مخزن در شرایط واقعی از هر دو سناریو صرفه‌جویی کمتر برآورد گردید. این امر به‌خاطر نیاز زیاد پایین دست می‌باشد که مانع از ذخیره آب در مخزن می‌شود. اما در دو سناریو ۱ و ۲ با اعمال صرفه‌جویی در مصرف، مطابق انتظار میزان ذخیره نیز نسبت به شرایط واقعی افزایش پیدا می‌کند. این مورد در زمینه ارتفاع سطح آب در مخزن، مساحت دریاچه و تبخیر از سطح دریاچه نیز صدق می‌کند. اما این امر در خصوص تولید انرژی برق-آبی رابطه عکس دارد. به طوری که با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی در مصرف آب، میزان آب رهاسازی به نیروگاه مطابق با هر سناریو کاهش داشته که این امر منجر به کاهش تولید انرژی در دو سناریو شده است اما این کاهش تولید انرژی در دو سناریو محسوس نیست و نیروگاه کلان مطابق با سناریو ۱ و ۲ به ترتیب ۹۴ و ۹۰ درصد نیاز برق را تامین می‌کند.

جدول ۴- مقایسه متوسط سالانه نتایج شبیه‌سازی مدل برای سناریوهای اول و دوم با شرایط واقعی بهره‌برداری سد لتیان

Table 4- Average annual comparison of the simulation results of the model for the first and second scenarios with the actual operating conditions of the Latian Dam

تبخیر از سطح دریاچه Evaporation from the lake (cms)	مساحت دریاچه Lake area (ha)	تولید انرژی برق-آبی Energy production (MWh)	ارتفاع سطح آب Water level height (m)	میانگین حجم ذخیره مخزن Average reservoir storage volume (MCM)	میزان صرفه جویی Water saving (%)	سناریو Scenario
0.15	202.1	66000	66.1	49	% 20	1
0.21	278.9	63000	71.8	63	% 30	2
0.09	130.1	68000	59.3	41	-	شرایط واقعی Real conditions

### نتیجه‌گیری

ذخیره شده سد لتیان برای کل دوره معادل ۴۱ میلیون متر مکعب برآورد گردید که افت محسوس ۴۹ درصدی را نسبت به زمانی که مخزن پر است، نشان می‌دهد. با گذشت زمان با کاهش میزان ورودی به مخزن سد لتیان، میزان حجم ذخیره‌سازی شده در مخزن نیز کاهش یافته و در بسیاری از سال‌ها علاوه بر اینکه ظرفیت ذخیره مخزن تکمیل نمی‌شود از طرفی سرریز هم از سد اتفاق نمی‌افتد. متوسط سالانه تولید انرژی برق-آبی نیروگاه سد لتیان معادل ۶۸۰۰۰ مگاوات ساعت برآورد گردید که نشان‌دهنده همگرایی نتایج مدل HEC-ResSim با سایر روش‌های انجام شده می‌باشد. با اعمال سناریوهای صرفه‌جویی، مدیریت و برنامه‌ریزی صحیح منابع و مصارف آب و شناخت نیازهای موجود می‌توان بر مسئله کمبود آب فائق آمد. تغییر الگوی کشت مناسب و تغییر شیوه آبیاری از سنتی به تحت فشار یکی دیگر از راهکارهای پیشنهادی برای بهره‌وری مناسب از آب موجود در محدوده مطالعاتی این پژوهش می‌باشد.

در این مطالعه نحوه عملکرد و بهره‌برداری مخزن سد لتیان با استفاده از مدل شبیه‌سازی مخزن Hec-ResSim مورد بررسی قرار گرفت. پس از وارد کردن داده‌هایی نظیر ارتفاع و طول سد، منحنی‌های سطح - حجم و حجم - ارتفاع، تبخیر از سطح مخزن سد، ارتفاع و ضریب سرریز، نواحی ذخیره سد، منحنی فرمان و ... به مدل، دبی خروجی از سد توسط مدل شبیه‌سازی شد. در مطالعه حاضر مقادیر حجم مرده و حجم مفید سد لتیان به ترتیب معادل ۲۸ و ۸۳ میلیون متر مکعب برآورد گردید. میانگین آب رهاسازی سد لتیان برای ۲۵ سال اول و دوم بهره‌برداری به ترتیب معادل ۶/۱ و ۳/۷ متر مکعب بر ثانیه بوده که به‌طور متوسط ۵۰ و ۳۲ درصد از نیاز پایین دست برآورده شده است. این در حالی است در اواخر دوره شبیه‌سازی به خصوص از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸ سد لتیان فقط قادر به تأمین ۲۹ درصد نیاز پایین دست می‌باشد. اما در زمینه تولید انرژی برق-آبی به جز اواخر دوره شبیه‌سازی در سایر زمان‌ها کمبودی دیده نمی‌شود. همچنین متوسط حجم آب

### منابع

- Babazadeh, H., Sedghi, H., Kaveh, F., & Jahromi, H. M. (2007, March). *Performance evaluation of Jiroft storage dam operation using HEC-RESSIM 2.0*. In Eleventh International Water Technology Conference (pp. 449-459).
- Bazzi, H., Ebrahimi, H., & Aminnejad, B. (2021). A comprehensive statistical analysis of evaporation rates under climate change in Southern Iran using WEAP (Case study: Chahnimeh Reservoirs of Sistan Plain). *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 1339-1352. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.030>
- Behrangi, F., Banihashemi, M.A., Mahani, S., & Rahmanian, M.R. (2014). Sediment settling in the Latian Dam in Iran. *International Journal of Sediment Research*, 29(2), 208-217. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60037-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60037-8)
- Chandel, A., Shankar, V., & Jaswal, S. (2022). Employing HEC-ResSim 3.1 for Reservoir Operation and Decision Making. In *Boundary Layer Flows-Modelling, Computation, and Applications of Laminar, Turbulent Incompressible and Compressible Flows*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.101673>
- Cochrane, T.A., Arias, M.E., Teasley, R.L., & Killeen, T.J. (2010). Simulated changes in water flows of the Mekong River from potential dam development and operations on the Se San and Sre Pok tributaries.
- Emadi, A., & Khademi, M. (2011). Reservoir Operation Rule Curve of Doroodzan Dam using Yield Model. *Water and Soil*, 25(5). (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i-.11217>
- Hatamkhani, A., Shourian, M., & Moridi, A. (2021). Optimal Design and Operation of a Hydropower Reservoir Plant Using a WEAP-Based Simulation-Optimization Approach. *Water Resources Management*, 35(5), 1637-1652.

<mailto:https://doi.org/10.1007/s11269-021-02821-7>

8. IWRMC (Iran Water Resources Management Company) (2013) Report of alt Lake watershed. Water resources balance report of the Lavasanat study area. Yekom Consulting Engineers Company. (In Persian)
9. IWRMC (Iran Water Resources Management Company), (2015). Zoning of eco-hydrological sustainability status Of dams and hydro-electric power plants downstream with the purpose of determining the minimum environmental water requirements, using integrated SMCE and CEQUALW2 Models (Case study: Latian dam of Tehran province), R-1276695. (In Persian)
10. Mahmood, R. (2013). Assessment of Climate Change Impact on Water Resources and Hydropower in the Jhelum River Basin, Pakistan (Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology).
11. Mihankhah, N., Chizari, A., & Khalilian, S. (2012). Optimum Operational Management from Surface Water Resources with Application Dynamic Programming. *Journal Of Agricultural Economics and Development*, 26(4), 244-251. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jead2.v1391i4.19893>
12. Modini, C. (2010). Using HEC-ResSim for Columbia River treaty flood control. In 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, *Water Resource Systems Division*, Davis, CA.
13. Munir, M.M., Shakir, A.S., Rehman, H.U., Khan, N.M., Rashid, M.U., Tariq, M.A.U.R., & Sarwar, M.K. (2022). Simulation-optimization of tarbela reservoir operation to enhance multiple benefits and to achieve sustainable development goals. *Water*, 14(16), 2512. <https://doi.org/10.3390/w14162512>
14. Oli, H.B., Patra, J.P., & Mishra, S.K. (2019). Nalgad dam and reservoir operation simulation using Hec-Ressim model for hydropower generation. *Advance and Innovative Research*, 27.
15. Saab, S.M., Othman, F.B., Tan, C.G., Allawi, M.F., & El-Shafie, A. (2022). Review on generating optimal operation for dam and reservoir water system: simulation models and optimization algorithms. *Applied Water Science*, 12(4), 1-28. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01593-8>
16. Sattari, M. T., Apaydin, H., & ÖZTÜRK, F. (2013). Stochastic operation analysis of irrigation reservoir in low-flow conditions: a case study from Eleviyan Reservoir, Iran. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(5), 613-622. <https://doi.org/10.3906/tar-1210-89>
17. Taghian, M. (2016). Estimating the optimal capacity for reservoir dam based on reliability level for meeting demands. *Water and Soil*, 30(3), 672-684. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v30i3.34436>
18. Uysal, G., Aynur Şensoy, A., Arda Şorman, M., Cansaran, E., & Emmanuel, R. (2014). Evaluation of reservoir model integration with deterministic and probabilistic streamflow forecasts."
19. Yoon, Y., Beighley, E., Lee, H., Pavelsky, T., & Allen, G. (2016). Estimating flood discharges in reservoir-regulated river basins by integrating synthetic SWOT satellite observations and hydrologic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21(4), 05015030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001320](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001320)
20. Zhao, G., Gao, H., Naz, B.S., Kao, S.C., & Voisin, N. (2016). Integrating a reservoir regulation scheme into a spatially distributed hydrological model. *Advances in Water Resources*, 98, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.10.014>



## The Effect of Raindrop Impact on Runoff and Soil Loss from Rills under Different Rainfall Intensities

A.R. Vaezi<sup>1\*</sup>, R. Bigdeli<sup>2</sup>

Received: 12-09-2020

Revised: 19-01-2022

Accepted: 01-07-2023

Available Online: 03-07-2023

### How to cite this article:

Vaezi, A.R., & Bigdeli, R. (2023). The effect of raindrop impact on runoff and soil loss from rills under different rainfall intensities. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 383-396. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.15038.0>

### Introduction

Rill erosion is one of the main factors of soil degradation, especially in rainfed lands in semi-arid regions. These soils have relatively lower organic matter content with weakly-aggregated units, which increases their susceptibility to water erosion processes. Conventional tillage systems are adversely affect on soil structure and surface soil cover in rainfed lands. Raindrop energy and flow shear stress are the main erosive factors in the slope lands. The raindrop impact destroys soil structure and changes it to erodible unites; micro-aggregates and single particles, and so makes them to more detachment. A few studies have been done on the role of raindrop impact to soil erosion by water. Nevertheless, there is no sufficient information on the effect of raindrop impact on soil loss in the rills particularly in semi-arid regions. Therefore, this study was conducted to investigate the role of raindrop impact on soil loss from rills in various soil textures under different rainfall intensities.

### Materials and Methods

A laboratory experiment was performed on two soil textures (clay loam and sandy loam) under four rainfall intensities (30, 50, 72 and 83 mm.h<sup>-1</sup>) in two rainfall conditions (under raindrops impact and without raindrops impact). Soil samples (0-30 cm) were taken from a semi-arid region in Zanzan province in 2020. The experiments were set up in an erosion flume with 100 cm long and 60 cm width and 15 cm depth which were exposed to simulated rainfalls for 30 min duration. Runoff and soil loss were measured at three rills under slope gradient 10% in the two rainfall conditions for each rainfall intensity. Soil loss from rills was determined as the mass of sediment collected from rill outlet per rill surface area (g.m<sup>-2</sup>). Under raindrop impact, the soil was exposed directly to raindrop impact and under without raindrop impact, a metal mesh sheet was used to eliminate raindrops impact to soil surface. The role of raindrops impact to runoff and soil loss was computed from the difference of runoff and soil loss under raindrops impact and without raindrops impacts. A t-test was used to assess the role of raindrops impact between the two rainfall conditions for the soils and rainfall intensities.

### Results and Discussion

Results indicated that runoff production and soil loss were significantly affected by the soil texture and rainfall intensity. Runoff and soil loss under raindrops impact increased in the soils with increasing rainfall intensity. Clay loam showed more runoff production and soil loss than sandy loam which was associated to lower aggregate stability and hydraulic conductivity. Runoff and soil loss in the two soils and four rainfall intensities were significantly affected by raindrops impact. Runoff production and soil loss except to 72 mm.h<sup>-1</sup> rainfall intensity were very higher under raindrop impact than without raindrop impact. It seems under 72 mm.h<sup>-1</sup> rainfall intensity, raindrops impact varied the rill's morphology and prevent more runoff production. Runoff production in clay loam and sandy loam under raindrop impact were increased by 44 and 36 percent, respectively (p< 0.01). Soil loss

1 and 2- Professor and Former M.Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanzan, Zanzan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [vaezi.alireza@znu.ac.ir](mailto:vaezi.alireza@znu.ac.ir))

DOI: [10.22067/jsw.2023.15038.0](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.15038.0)

resulted by raindrop impact in clay loam and sandy loam increased by 53 and 62 percent, respectively ( $p < 0.01$ ). Raindrops impact had more importance in soil loss rather than runoff production. This result is related to the role of raindrops impact in destroying aggregates and producing more erodible soil particles and closing soil macropores and declining water infiltration. The role of raindrop impact in runoff production and soil loss varied among the rainfall intensities. A slight reduction in the role of raindrop impact in runoff and soil loss was occurred with increasing rainfall intensity, especially in sandy loam.

## Conclusion

The role of raindrop impact in runoff production and soil loss was significantly affected by soil type and rainfall intensity. Raindrops impact has more important in runoff and soil loss in the soils having higher aggregate stability and more hydraulic conductivity. The role of raindrop impact in runoff and soil loss in these soils declines with increasing rainfall intensity. In general, maintain soil surface cover is essential to control raindrops impact and decrease runoff and soil loss in semi-arid areas. The importance of soil surface cover is most obvious under different rainfalls in weakly-aggregated soils which are dominant in many slope lands. Also, soil surface cover has important role in controlling runoff and soil loss under heavy rainfalls in soils with more water-stable aggregates. Prevention from intensive tillage and using conservation tillage systems such as minimum tillage are effective strategies in controlling raindrop impact in rainfed lands in semi-arid regions.

**Keywords:** Aggregate resistance, Rainfall intensity, Semi-arid region, Soil texture, Surface cover

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۳۸۳-۳۹۶

## تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیاریهای شخم تحت شدت‌های مختلف باران

علی رضا واعظی<sup>۱\*</sup> ID - رعنا بیگدلی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

### چکیده

ضربه قطرات باران یکی از عوامل مؤثر بر تخریب ساختمان خاک و فرسایش آبی است. اطلاعات کافی در مورد نقش این عامل در تولید رواناب و هدررفت خاک از شیاریها به‌ویژه در خاک‌های مناطق نیمه‌خشک موجود نیست. این پژوهش با هدف بررسی اثر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک از شیاریها تحت شدت‌های مختلف باران در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک در استان زنجان انجام شد. برای این منظور آزمایش در دو خاک با بافت مختلف (لومرسی و لوم‌شنی) تحت چهار شدت بارندگی (۳۰، ۵۰، ۷۲ و ۸۳ میلی‌متر بر ساعت) در دو حالت بارندگی (تحت ضربه قطرات و حذف اثر ضربه قطرات باران) در فلوم فرسایشی تحت شیب ۱۰ درصد انجام گرفت. نتایج نشان داد که تولید رواناب تحت تأثیر ضربه قطرات باران در خاک لومرسی و لوم‌شنی به‌ترتیب ۴۴ و ۳۶ درصد افزایش یافت ( $p < 0.01$ ) و هدررفت خاک نیز در این دو خاک به‌ترتیب ۵۲ و ۶۲ درصد بیشتر از حالت بدون ضربه قطرات بود ( $p < 0.01$ ). تولید رواناب و هدررفت خاک بین دو حالت باران به شدت باران وابسته بود؛ به‌طوری‌که با افزایش شدت باران، نقش ضربه قطرات به‌ویژه در خاک لوم‌شنی تغییرات زیادی یافت. با افزایش شدت باران هدررفت خاک نسبت به تولید رواناب دچار کاهش بیشتری شد که این موضوع نشان‌دهنده مقاومت اندک خاکدانه‌ها به اثر ضربه قطرات باران در شدت‌های بارندگی بالا است. با توجه به ساختمان ناپایدار خاک‌های مناطق نیمه‌خشک، حفظ پوشش سطحی برای جلوگیری از تأثیر ضربه قطرات باران بر تولید رواناب و هدررفت خاک ضروری است.

**واژه‌های کلیدی:** بافت خاک، پوشش سطح، شدت باران، مقاومت خاکدانه، منطقه نیمه‌خشک

### مقدمه

بارندگی‌های شدید در این مناطق است (Vaezi and Vatani., 2014) به‌طوری‌که بیش از ۸۰ درصد فرسایش در اراضی شیب‌دار کشاورزی را شامل می‌شود (Qin et al., 2019). این فرسایش در اثر جریان متمرکز در دامنه‌ها به وجود آمده و پس از سالها، آبراهه‌ای کم عمق در امتداد شیب به وجود می‌آید. فرسایش شیاری عبارت از جدا شدن و انتقال رسوب به وسیله جریان متمرکز آب در آبراهه‌ای باریک و فرسایش‌پذیر است (Chen et al., 2017). این فرسایش مرحله آغازین فرسایش

فرسایش خاک تهدیدی جدی برای محیط زیست و امنیت کشاورزی است (Wu et al., 2018). فرسایش شیاری عامل مهم هدررفت خاک و آب در مراتع و زمین‌های زراعی شیب‌دار در بسیاری از نقاط جهان است (Kimaro et al., 2008). فرسایش شیاری، منبع و فرآیند عمده تولید رسوب در دامنه‌های شیب‌دار به‌ویژه تحت

۱ و ۲- به‌ترتیب استاد و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [vaezi.alireza@znu.ac.ir](mailto:vaezi.alireza@znu.ac.ir))

آبکندی بوده و یکی از اصلی‌ترین اشکال فرسایش خاک در دامنه‌ها است (Wirtz et al., 2012).

فرسایش شیاری دربرگیرنده سه فرآیند: جدا شدن خاکدانه‌ها، انتقال و رسوبگذاری است (He et al., 2014). توسعه شیاریها تأثیر مهمی در وقوع رواناب در دامنه‌ها و تغییر در مورفولوژی زمین دارد (Qin et al., 2018). با ظهور کانال‌های فرسایشی بر روی شیب، تولید رواناب و انتقال ذرات خاک بیشتر شده، فرسایش شیاری گسترش می‌یابد (Huo et al., 2011). با تشکیل اولین شیار بر روی شیب، فرسایش خاک به سرعت افزایش یافته و باعث تغییر مداوم ریخت‌شناسی شیب می‌گردد (Momm et al., 2018). آستانه تشکیل شیار در واقع زمانی است که تنش برشی بر مقاومت خاک غلبه می‌کند و این متأثر از میزان پوشش سنگریزه‌ای سطح خاک و برخی ویژگی‌های رواناب می‌باشد (Tailong et al., 2010).

تشکیل و تکامل شیاریها فرآیندهایی پیچیده هستند که تحت تأثیر عوامل بسیاری از جمله عوامل داخلی و خارجی قرار دارند (Qin et al., 2018، Zhao et al., 2018). عوامل گوناگونی مانند بارش، رواناب، توپوگرافی و سیستم کشت و کار تأثیر مهمی در توسعه شیار و تولید رسوب دارند. البته عوامل اصلی و قابل کنترل در فرسایش شیاری ترکیبی از رواناب و خاک است و دیگر عوامل با تأثیر غیرمستقیم سبب افزایش و کاهش عوامل اصلی می‌شوند (Wirtz et al., 2012). خاک از جنبه‌های مختلفی از جمله: مقاومت خاک، حساسیت به سلبندی، ظرفیت نفوذ، محتوای آب خاک، اثرات پیچیده‌ای بر روی فرسایش شیاری دارد. عمدتاً حساسیت خاک به فرسایش به عنوان فرسایش پذیری خاک تعریف شده است که مربوط به طیف وسیعی از خصوصیات خاک از جمله ویژگی‌های فیزیکی مانند ساختمان و بافت و ویژگی‌های شیمیایی مانند درصد ماده آلی و سدیم تبادل می‌باشد (Vrieling, 2006). ویژگی‌های فیزیکی خاک شامل پایداری خاکدانه‌ها، چگالی ظاهری، ترکیب ذرات خاک، محتوای آب خاک از طریق تغییر در ظرفیت نفوذپذیری خاک و مقاومت برشی خاک بر روی فرسایش شیاری تأثیر می‌گذارند (Li et al., 2010).

ضربه قطره باران عامل مهمی در فرسایش خاک است، به طوری که نه تنها در جداسازی ذرات خاک، بلکه در افزایش رسوب نیز حائز اهمیت است (Zhang and Wang, 2017). پاشش توسط قطرات باران به عنوان مهمترین عامل جدا شدن ذرات خاک است (Fu et al., 2017، Lu et al., 2016). هنگامی که قطرات باران بر سطح خاک اثر می‌گذارند، انرژی آنها صرف غلبه بر پیوند بین ذرات مصرف می‌شود. جدا شدن ذرات توسط ضربه قطره باران به عنوان فرآیند آغاز کننده فرسایش آبی شناخته می‌شود (Ma et al., 2014). فرسایش پاشمانی از جمله اشکال فرسایش آبی است که به شدت تحت تأثیر ضربه قطرات باران است (Fernández-Raga et al., 2010). شدت باران نقش مهمی در بروز اشکال فرسایش آبی دارد. برخی از پژوهشگران دریافته‌اند

که فرسایش شیاری با افزایش شدت باران افزایش می‌یابد (Berger et al., 2010). با افزایش شدت باران، اثر ضربه قطرات باران افزایش یافته، سبب فشردگی خاک، کاهش نفوذ و افزایش تولید رواناب می‌گردد (Lu et al., 2016).

ضربه قطرات باران در کنار تنش برشی رواناب، دو عامل مهم فرسایش خاک در اراضی شیبدار هستند (Meshesha et al., 2016). توانایی باران در فرسایش خاک که به عنوان فرسایش‌پذیری باران بیان می‌شود، دربرگیرنده نقش ضربه قطرات و نیروی رواناب است (Angulo-Martínez et al., 2016). ضربه مکانیکی قطرات باران عامی مهم در تخریب خاکدانه‌ها، تشکیل سله و کاهش نفوذپذیری خاک است (Francos et al., 2016). این نقش از باران تأثیر زیادی در افزایش تولید رواناب و فرسایش خاک دارد. به عبارت دیگر، تولید رواناب به تخریب فیزیکی خاک در اثر ضربه قطرات باران نیز بستگی دارد (Vaezi et al., 2017). مطالعات اندکی در مورد تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و فرسایش صورت گرفته است. بوزلینک و همکاران (Beuselinck et al., 2002) به بررسی تأثیر قطرات باران در تجمع رسوب توسط جریان سطحی در خاک‌های مختلف پرداخت و دریافته‌اند که قطرات باران سرعت جریان را مهار می‌کند و تأثیر مثبتی در تحویل رسوب دارد. آن و همکاران (An et al., 2012) با بررسی اثر ضربه قطرات باران بر فرآیندهای فرسایشی در خاک شنی نشان دادند که هدررفت خاک ناشی از ضربه قطرات باران بخش زیادی از عملکرد رسوب را شامل می‌شود. موسونی و همکاران (Moussouni et al., 2014) با بررسی انرژی جنبشی باران بر فرسایش‌پذیری خاک مزرعه نشان دادند که با افزایش شدت باران انرژی جنبشی قطرات باران افزایش یافته و موجب فرسایش بیشتر خاک می‌شود. واعظی و همکاران (Vaezi et al., 2017) با بررسی سهم ضربه قطرات باران در تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و هدررفت خاک در خاک لوم شنی در منطقه نیمه‌خشک اعلام کردند سهم قطرات باران در فرسایش سطحی با افزایش شدت بارندگی کاهش می‌یابد.

فرسایش شیاری به‌عنوان آغازین مرحله فرسایش درون‌آبراه‌ای در دامنه‌ها به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک است (Foroumadi and Vaezi, 2017). تشکیل و گسترش شیار پدیده‌ای مهم است که موجب تخریب شدید خاک می‌شود (Shen et al., 2019). در مطالعات بسیاری به فرآیندهای مؤثر بر فرسایش شیاری (Wirtz et al., 2012)، عوامل مؤثر بر تشکیل شیار (Wei et al., 2007) و گسترش شیار (He et al., 2016) پرداخته‌اند. با این حال، مطالعات در مورد روند جدایش ذرات خاک توسط قطرات باران (Choo et al., 2018)، در خاک‌های مختلف محدود است. کشتزارهای دیم واقع در اراضی شیب‌دار تحت انواع فرسایش آبی هستند و به دلیل شخم موازی شیب، فرسایش شیاری نقشی مهم در هدررفت آب و خاک در نوارهای کشت دارد (Vaezi and Heidari, 2019). مطالعات اندکی در مورد نقش قطرات باران در

نگهداری آب خاک رسیده، تحت باران قرار گرفتند. برای اعمال بارندگی، از دستگاه شبیه ساز باران به ابعاد ۱/۵ متر طول و ۱ متر عرض به ارتفاع ۳ متر استفاده شد. چهار شدت بارندگی (۳۰، ۵۰، ۷۲ و ۸۳ میلی‌متر بر ساعت) در دستگاه شبیه‌ساز باران تنظیم شد. فراوانی وقوع شدت‌های باران مذکور به ترتیب ۳۱، ۹، ۳ و ۲ درصد در منطقه مطالعاتی هست (Vaezi and Besharat, 2015). باران‌های شدید (بیشتر از ۷۰ میلی‌متر بر ساعت)، با وجود فراوانی اندکی سهم زیادی از فرسایش آبی در منطقه را دارند. در هر بخش از آزمایش، خاک‌ها به صورت جداگانه، به مدت ۳۰ دقیقه تحت یکی از شدت‌های بارندگی قرار گرفتند. برای اندازه‌گیری تولید رواناب و هدررفت خاک در حالت بدون ضربه، توری‌های فلزی با قاب چوبی برای هر بخش از فلوم ساخته و در آزمایش‌های حذف اثر ضربه قطرات باران استفاده شدند (شکل ۱). فاصله‌های زمانی ۵ دقیقه نمونه‌های رواناب و رسوب جمع‌آوری شدند. پس از جداسازی رواناب از رسوب به وسیله کاغذ صافی، ارتفاع رواناب در هر بارندگی به دست آمد و جرم رسوب، پس از خشک شدن در آون (دمای ۱۰۵ درجه، ۲۴ ساعت) برای هر نمونه تعیین شد.

### تجزیه و تحلیل داده‌ها

به منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها، ابتدا داده‌ها از نظر توزیع نرمال بودن با استفاده از آماره‌های چولگی و کشیدگی مورد بررسی قرار گرفتند. برای تعیین سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب و هدررفت خاک، مقدار این دو متغیر در دو حالت مذکور (تحت ضربه قطرات و بدون آنها) مقایسه شد. برای بررسی تفاوت تأثیر ضربه قطره باران از نظر تولید رواناب و هدررفت از شیارها در خاک‌ها در هر یک از شدت‌های مختلف باران از آزمون تی جفتی (t-test) استفاده شد. برای مقایسه بین هر یک از شدت‌های باران از نظر تولید رواناب و فرسایش بین شیارها از روش تجزیه‌واریانس استفاده شد و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون توکی به دست آمد. برای این منظور از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ بهره گرفته شد. همچنین برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه ۲۰۱۶ استفاده شد.

هدررفت آب و خاک در چنین نوارهای کشت انجام گرفته است. از این رو، این پژوهش با هدف بررسی تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و فرسایش خاک در شیارها در برخی خاک‌های منطقه نیمه‌خشک انجام گرفت.

### مواد و روش‌ها

#### انتخاب خاک‌های مورد بررسی

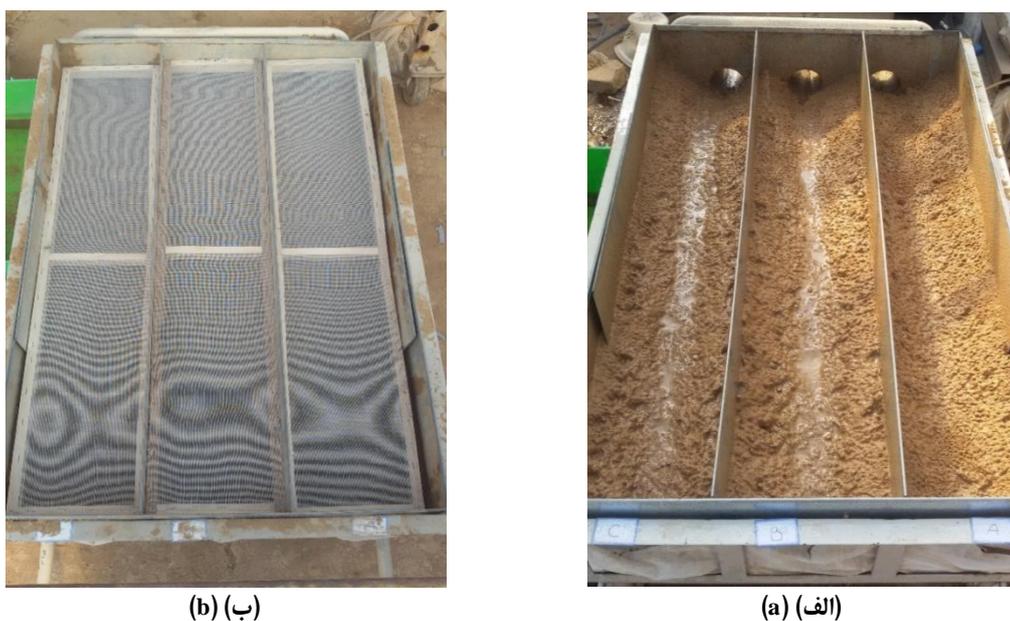
برای انجام این پژوهش، خاک‌های مختلف از زمین‌های دیم استان زنجان نمونه‌برداری و تجزیه شدند و در آخر دو خاک با بافت مختلف (لوم‌شنی و لوم‌رسی) به عنوان خاک غالب منطقه نیمه‌خشک انتخاب شدند. خاک‌های مذکور به عنوان خاک‌های غالب در کشتزارهای دیم منطقه مورد بررسی هستند (Vaezi et al., 2014). حدود ۸۰۰ کیلوگرم از هر خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری جمع‌آوری و به آزمایشگاه فرسایش خاک دانشگاه زنجان منتقل شدند. خاک‌ها برای حفظ ساختمان خاک و تطابق با شرایط مزرعه‌ای، از الک ۸ میلی‌متری عبور داده شدند (Jin et al., 2009).

#### اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌ها، نمونه‌ای از خاک‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1962)، چگالی ظاهری با استفاده از روش سیلندر فلزی (Blake and Hartge, 1986)، پایداری خاکدانه در خاکدانه‌هایی با قطر ۵/۶ تا ۸ میلی‌متر به روش الک تر (Yoder, 1936) به مدت یک دقیقه (Vaezi et al., 2017)، ماده آلی به روش والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، و هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (Mc Kenzie et al., 2002) اندازه‌گیری شد.

#### اندازه‌گیری رواناب و هدررفت خاک

مطالعه روند فرسایش از شیارها و انتقال ذرات از شیار در دو حالت بررسی شدند: ۱) تحت ضربه قطرات باران و ۲) بدون ضربه قطرات باران. برای این کار از فلومی به طول ۱۰۰ سانتی‌متر، به عرض ۶۰ سانتی‌متر و عمق ۲۰ سانتی‌متر استفاده شد. آزمایش‌ها تحت شیب ۱۰ درصد بر اساس شیب غالب دامنه‌های تحت شخم در منطقه تنظیم شدند. برای انجام آزمایش در سه تکرار، فلوم فرسایشی به سه بخش با عرض ۲۰ سانتی‌متر در امتداد فلوم تقسیم شد. در هر آزمایش، نمونه‌های خاک مورد نظر به درون سه بخش از فلوم منتقل شده و در هر بخش، شیارها با عمق ۷ سانتی‌متر مطابق با شیارهای تحت کشت دیم ایجاد شد. خاک‌ها برای تطبیق بیشتر با شرایط مزرعه‌ای، پیش از اعمال باران‌های شبیه‌سازی شده اشباع شدند و پس از گذشت ۲۴ تا ۴۸ ساعت و توقف خروج آب ثقلی، که رطوبت خاک به حد بالاترین ظرفیت



شکل ۱- فلوم آزمایشی در دو شرایط: تحت ضربه قطرات (الف) و بدون ضربه قطرات باران (ب)

Figure 1- Experimental flume in two conditions: with raindrop impact (a) and without raindrop impact (b)

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی- شیمیایی خاک‌های مورد بررسی

Table 1- Physicochemical properties of the study soils

نوع خاک Soil type	ویژگی‌های خاک Soil properties						
	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	ماده آلی OM (%)	هدایت هیدرولیکی اشباع K <sub>s</sub> (cm.h <sup>-1</sup> )	چگالی ظاهری BD (g.cm <sup>-3</sup> )	پایداری خاکدانه‌ها MWD <sub>wet</sub> (mm)
لومرسی (Clay loam)	26.88	35.60	37.52	0.44	5.34	1.17	0.52
لومشنی (Sandy loam)	67.17	25.32	7.51	0.81	13.86	1.40	0.92

## نتایج و بحث

### ویژگی خاک‌های مورد بررسی

برخی ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند. محتوای ماده آلی در خاک‌های مورد بررسی اندک (کمتر از ۱ درصد) است؛ به طوری که این مقدار در خاک لومرسی ۰/۴۴ درصد و در خاک لومشنی ۰/۸۱ درصد می‌باشد. عدم حفظ بقایای گیاهی و مخلوط کردن با خاک دلیل اصلی کمبود ماده آلی در خاک‌های دیم مناطق نیمه‌خشک است (Vaezi et al., 2017). هر دو خاک، به‌ویژه خاک لومرسی، پایداری ساختمانی ضعیفی در برابر آب دارند. پایداری اندک خاکدانه‌ها، ویژگی غالب خاک‌های مناطق نیمه‌خشک است که

حساسیت آنها را در برابر تخریب ناشی از قطرات باران بیشتر می‌کند (Akbari and Vaezi, 2015). چگالی ظاهری خاک لومرسی به دلیل بافت ریز و بر خورداری از منافذ ریز زیاد نسبت به خاک لومشنی کمتر است. با این حال، نفوذپذیری خاک لومشنی (۱۳/۸۶ cm.h<sup>-1</sup>) به علت فراوانی زیاد منافذ درشت نسبت به خاک لومرسی (۵/۳۴ cm.h<sup>-1</sup>) بیشتر است.

### تغییرات رواناب و هدررفت خاک‌ها در شدت‌های باران

آزمون t جفتی برای هر یک از شدت‌های باران به‌طور جداگانه انجام گرفت تا تفاوت آماری تولید رواناب و هدررفت خاک بین دو حالت بارندگی (تحت ضربه قطرات و حذف ضربه قطرات باران) را

نشان دهد (جدول ۲). نتایج نشان داد که نقش ضربه قطرات باران در تولید رواناب و هدررفت خاک در خاک لوم‌شنی معنی‌دار بود ( $p < 0.01$ ). در خاک لوم‌رسی، تفاوت در دو حالت بارندگی از نظر تولید رواناب تنها در شدت‌های پایین (۳۰ و ۵۰ میلی‌متر بر ساعت) معنی‌دار بود و از نظر هدررفت خاک در همه شدت‌های باران به جز در شدت ۳۰ میلی‌متر بر ساعت معنی‌دار بود. این موضوع نشان‌دهنده تأثیر پایداری ساختمان خاک در تولید رواناب و فرسایش از شیار است. گزارش‌ها نشان می‌دهد در خاک‌هایی که ساختمان بهتری دارند، نقش ضربه قطره باران در تغییر ویژگی‌های فیزیکی خاک و فرسایش اهمیت بیشتری پیدا می‌کند (Vaezi et al., 2017).

بر اساس شکل ۲ با افزایش شدت باران، مقدار تولید رواناب و هدررفت خاک از شیار در دو حالت باران (تحت ضربه قطرات و حذف ضربه قطرات باران) افزایش یافت. این نتیجه به این دلیل بود که از یک سو افزایش شدت باران، افزایش تأمین آب در سطح خاک و در نتیجه کاهش شدید نفوذپذیری خاک و تولید رواناب بیشتر را به دنبال داشت (Foroumadi and Vaezi, 2018) و از سوی دیگر در حالت تحت ضربه قطرات باران، انرژی جنبشی قطرات عامل فروپاشی خاکدانه‌ها، تشکیل اندوده سطحی و در نتیجه کاهش تخلخل توسط جریان سطحی فراهم می‌شود.

نفوذپذیری خاک بود (Foroumadi and Vaezi, 2017). نکته دیگر آن که ضربه قطرات باران، درصد ذرات فرسایش‌پذیر در سطح خاک را افزایش می‌دهد. دو علت اخیر موجب شد تولید رواناب و هدررفت خاک با افزایش شدت باران به ویژه در شرایط ضربه قطرات باران افزایش شدیدی پیدا کند. افزایش هدررفت آب و خاک در باران‌های شدید موضوعی شناخته شده است؛ به طوری که کینل (Kinell, 2003) گزارش کرد که بین هدررفت خاک و فرسایندهای باران رابطه‌ی وجود دارد و مدل‌های فرسایشی که مبتنی بر فرسایندهای باران و رواناب باشند، بهتر می‌توانند هدررفت خاک را تبیین نمایند. چنگ و همکاران (Cheng et al., 2008) و ظریف و همکاران (Zarif et al., 2009) نشان دادند که بین فرسایش شیری و شدت باران غالباً رابطه معنی‌دار وجود دارد؛ به طوری که با افزایش شدت باران هدررفت خاک افزایش پیدا می‌کند. این موضوع از یک سو به دلیل نقش ضربه قطرات باران در تخریب خاکدانه‌ها و از سوی دیگر افزایش تولید رواناب است. همچنین هان و همکاران (Han et al., 2016) نشان دادند که با افزایش شدت بارندگی، انرژی جنبشی قطرات باران افزایش می‌یابد و این موضوع موجب تشکیل اندوده سطحی و کاهش تخلخل خاک شده و با کاهش نفوذپذیری خاک، ذرات بیشتری برای انتقال

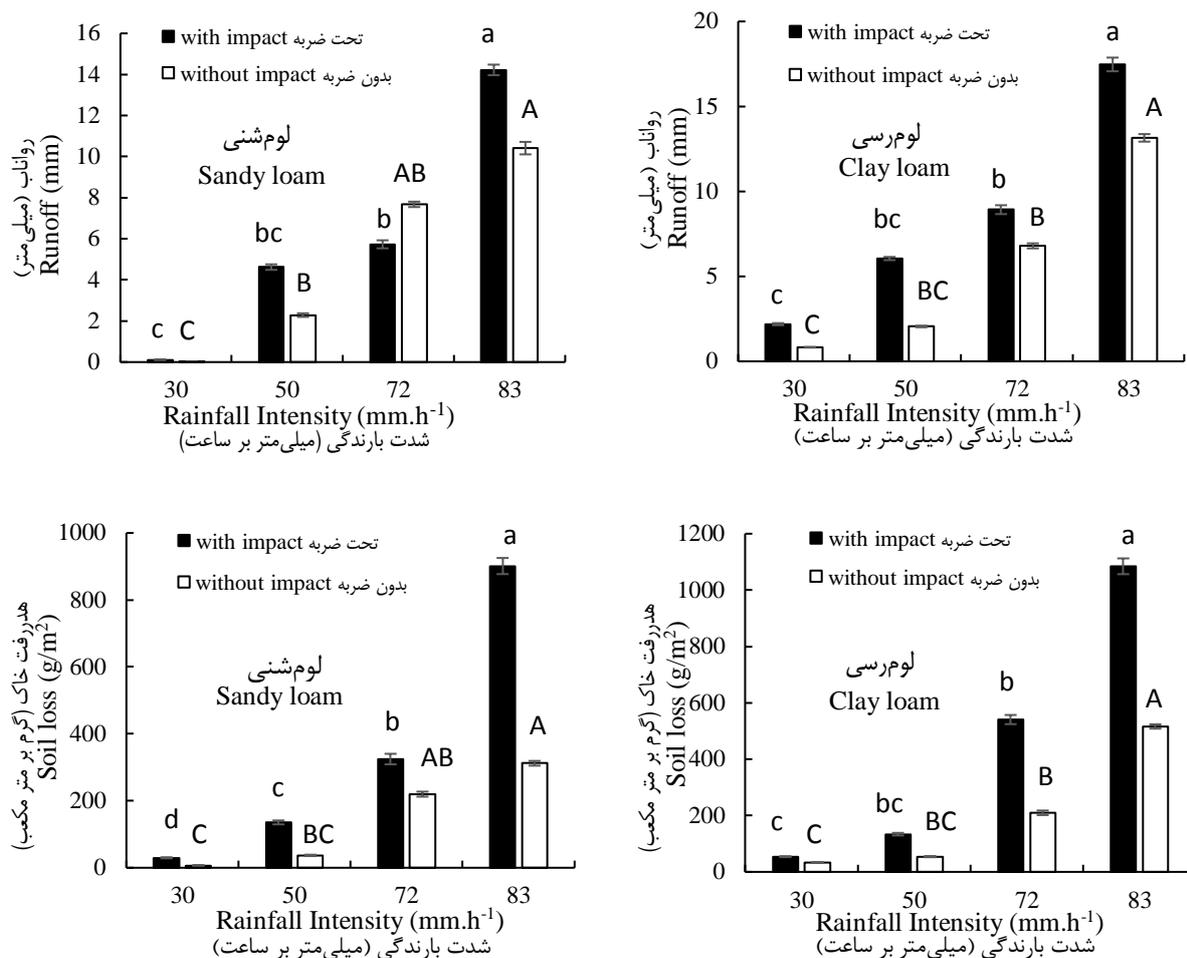
جدول ۲- مقایسه تأثیر ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک در شدت‌های مختلف باران با استفاده از آزمون t جفتی<sup>۱</sup>  
Table 2- Comparison of the effect of rainfall impact on runoff production and soil loss at different rainfall intensities using paired t-test

متغیر Variable	نوع خاک Soil texture	شدت باران Rainfall Intensity (mm/h)			
		30	50	72	83
رواناب Runoff (mm)	لوم‌رسی (Clay loam)	3.656**	7.915**	1.636 <sup>n.s</sup>	1.870 <sup>n.s</sup>
	لوم‌شنی (Sandy loam)	3.265**	3.828**	2.277*	2.370*
هدررفت خاک Soil Loss (g.m <sup>-2</sup> )	لوم‌رسی (Clay loam)	1.810 <sup>n.s</sup>	3.045**	3.346**	3.586**
	لوم‌شنی (Sandy loam)	3.059**	4.283**	1.337 <sup>n.s</sup>	5.179**

<sup>۱</sup> برای هر شدت باران، آزمون جداگانه t جفتی انجام گرفته است و تفاوت‌ها در هر شدت باران، مستقل از شدت دیگر است  
\*، \*\* و <sup>n.s</sup> به ترتیب معنی‌داری در سطح ۹۹/۹۹ درصد، ۹۹/۹۵ درصد و غیرمعنی‌دار

<sup>۱</sup> The t-test was done separately for each rainfall intensity and difference between the two conditions for each rainfall intensity is dependent of other rainfall intensity.

\*, \*\* and <sup>n.s</sup> were significant at the level of 99.99%, 99.95% and non-significant, respectively

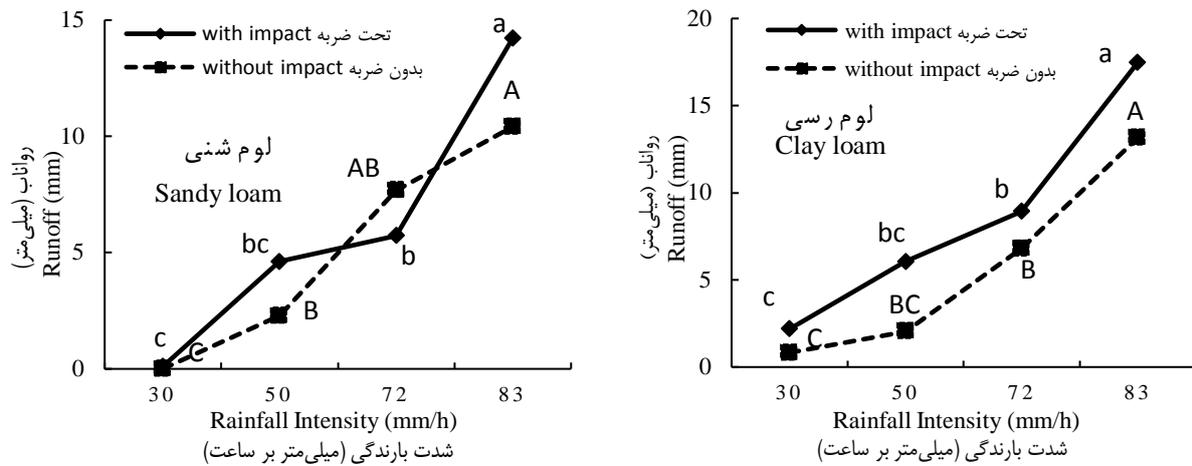


شکل ۲- مقایسه میانگین‌ها برای رواناب و هدررفت خاک در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 2- Means comparison for runoff and soil loss as affected by raindrop impact under different rainfall intensities

بررسی نقش ضربه قطرات باران در رواناب در شدت‌های مختلف نشان داد که به جز در شدت باران ۷۲ میلی‌متر بر ساعت در خاک لوم‌شنی، مقدار رواناب خروجی در هر دو خاک در تمامی شدت‌ها در حالت تحت ضربه قطرات باران بیشتر از حالت بدون ضربه است (شکل ۳). مقدار رواناب تولیدی در هر دو خاک در شدت‌های پایین مقدار کمتری بوده و با افزایش شدت بارندگی، مقدار رواناب افزایش یافت که ناشی از افزایش انرژی جنبشی قطرات باران در شدت‌های بالاتر بود. با افزایش انرژی جنبشی باران، تخریب ساختمان خاک سطحی بیشتر شده، زمینه برای تشکیل اندوده سطحی و در نتیجه تولید رواناب فراهم می‌آید. لیو و همکاران (Lu et al., 2016) اعلام کردند با افزایش شدت باران، اثر قطرات باران افزایش یافته و این موضوع، باعث تراکم بیشتر خاک سطحی شده و در نتیجه کاهش نفوذ و تولید بیشتر رواناب را به همراه دارد. همچنین حذف ضربه قطرات باران، از تولید رواناب سطحی خاک جلوگیری کرده، نفوذ آب را افزایش می‌دهد. فرناندز راگا و همکاران

در پژوهشی که با هدف بررسی رابطه بین انرژی جنبشی قطرات باران و فرسایش در خاک لوم‌شنی در شمال مرکزی پرتقال انجام دادند نتیجه گرفتند که با افزایش قطر قطرات باران، سرعت حد و انرژی جنبشی قطرات باران افزایش می‌یابد و به دلیل نقش تخریبی قطرات باران، فرسایش پاشمانی به صورت خطی افزایش می‌یابد. تفاوت منحنی‌های رواناب خروجی تحت شدت‌های مختلف باران در دو حالت، اهمیت نقش ضربه قطره باران را آشکار می‌کند (شکل ۳). فرومدی و واعظی (Foroumadi and Vaezi, 2016) نشان دادند رابطه شدت باران و شدت تولید جریان معنی‌دار بود ( $p < 0.01$  و  $R^2 = 0.98$ ); به طوری که با افزایش شدت باران، شدت جریان افزایش یافت. در خاک لوم‌شنی تحت شدت باران ۷۲ میلی‌متر بر ساعت احتمالاً ضربه قطرات باران منجر به تغییر مورفولوژی شیار از نظر شکل مقطع عبور جریان شد و این موضوع کاهش تولید رواناب را در پی داشت.

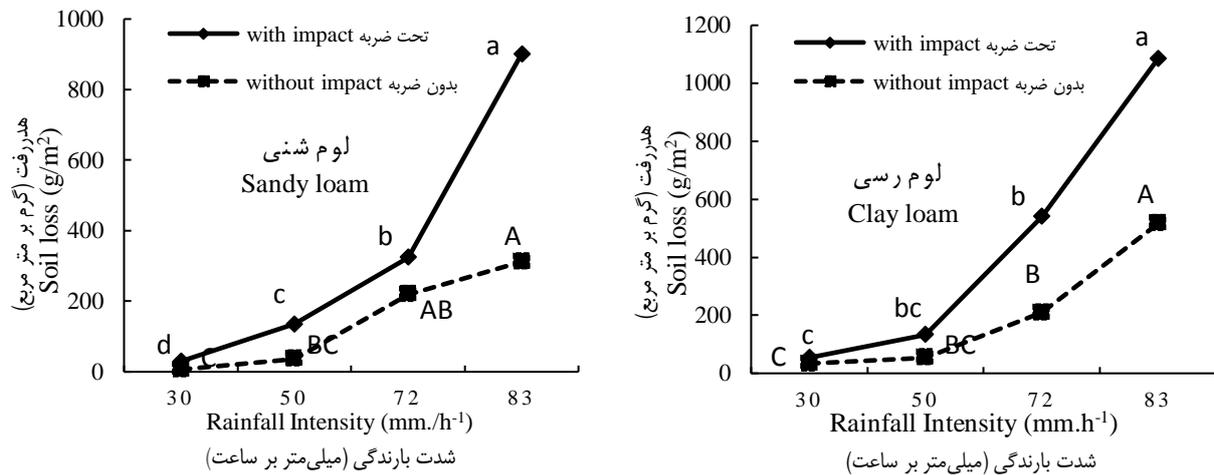


شکل ۳- مقایسه میانگین‌ها برای تولید رواناب در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران  
 Figure 3- Means Comparison for runoff production at two rainfall conditions under different rainfall intensities

افزایش رواناب می‌شود. والتا و همکاران (Valette *et al.*, 2006) نشان دادند قطرات باران پس از برخورد با سطح خاک، به دلیل مکانیکی خود باعث تخریب خاکدانه، ایجاد اندوده سطحی، کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش فرسایش خاک می‌شود. در مطالعه‌ای آنگولو و همکاران (Angulo-Martínez *et al.*, 2012) اعلام داشتند که میزان جدا شدن ذره به ویژگی‌های باران مثل انرژی جنبشی، شدت و مدت بارندگی و ویژگی‌های خاک بستگی دارد.

#### نقش ضربه قطرات باران بر هدررفت خاک در شدت‌های باران

مقدار هدررفت خاک از شباهای تحت ضربه قطرات باران در هر دو خاک بیشتر از حالت بدون ضربه قطرات باران بود (شکل ۴). ضربه قطرات باران از یک‌سو منجر به فرسایش پاشمانی می‌شود و از سوی دیگر با تخریب ساختمان خاک منجر به بسته شدن منافذ خاک و



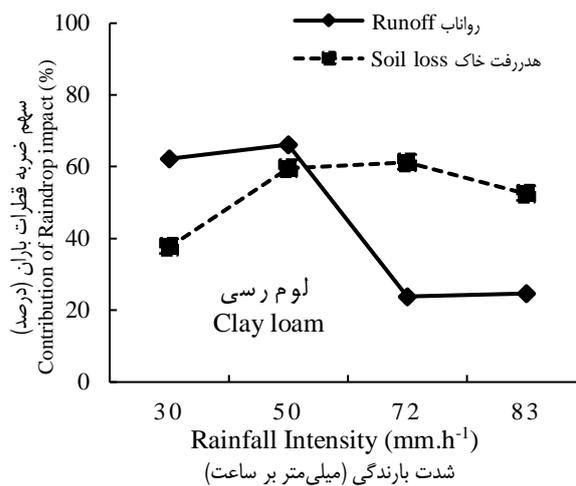
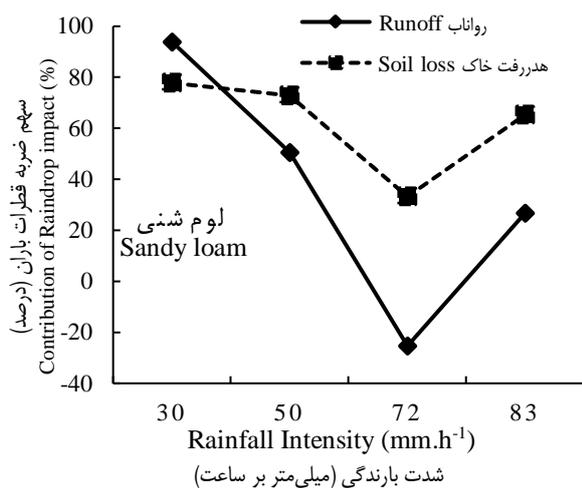
شکل ۴- مقایسه میانگین‌ها برای هدررفت خاک در دو شرایط باران تحت شدت‌های مختلف باران  
 Figure 4- Means Comparison for soil loss at two rainfall conditions under different rainfall intensities

### سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک

سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب از مقایسه تولید رواناب در دو حالت: با ضربه قطرات باران و بدون ضربه قطرات باران به دست آمد. نتایج نشان داد بین شدت‌های مختلف باران، بیشترین سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب در شدت‌های پایین بارندگی بود (شکل ۵). با افزایش شدت بارندگی درصد سهم ضربه باران روند نزولی را طی می‌کند. در خاک لوم‌شنی، با افزایش شدت بارندگی نقش ضربه قطرات باران کاهش یافت. مقدار رواناب در شدت‌های پایین در این خاک‌ها تابع اثر قطرات باران در تخریب ساختمان خاک بود اما در شدت‌های بالاتر باران، تولید رواناب، به دلیل افزایش حجم باران ورودی به سطح خاک در هر دو حالت (تحت ضربه و بدون ضربه قطرات باران) زیاد بود. سهم ضربه قطرات در تولید رواناب در خاک لوم‌شنی در شدت ۷۲ میلی‌متر بر ساعت منفی بود که نشان می‌دهد ضربه قطرات باران نه تنها عاملی مؤثر در افزایش تولید رواناب در این خاک نبوده بلکه نقش بازدارنده نیز داشته است. همان‌طور که پیشتر بیان شد این نتیجه می‌تواند به دلیل نقش ضربه قطرات در تغییر مورفولوژی شیار و در نتیجه کاهش رواناب باشد. سهم ضربه قطرات باران در تولید رواناب در خاک لوم‌رسی در همه شدت‌های بارندگی مقدار مثبتی بود. این موضوع، اثرگذاری غالب ضربه قطرات باران بر تولید رواناب را در این خاک نشان می‌دهد. همچنین فراوانی زیاد ذرات ریز و در نتیجه پایین بودن تخلخل درشت این خاک عاملی دیگر برای کاهش نفوذپذیری خاک و در نتیجه افزایش تولید رواناب در آن می‌تواند باشد (Vaezi and Vatani., 2015).

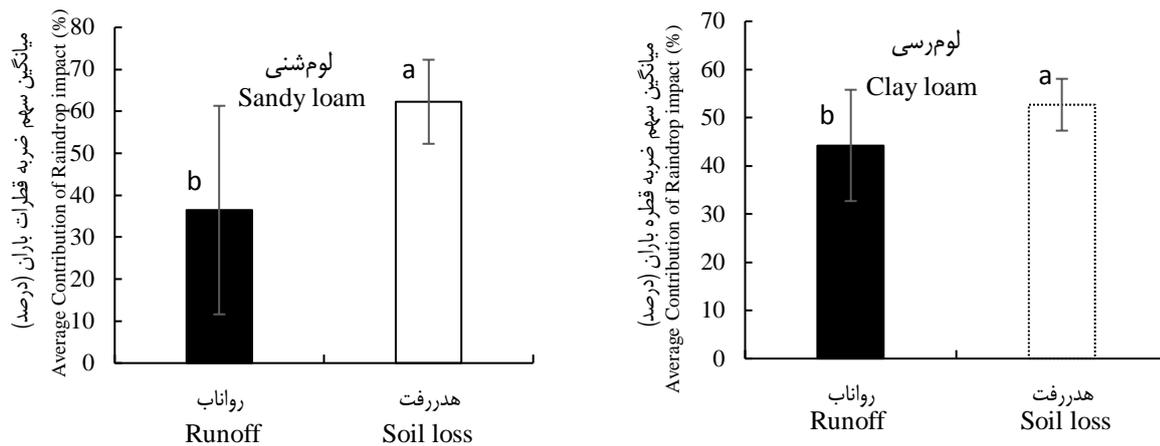
سهم ضربه قطرات باران در هدررفت خاک از شیار بیشتر از سهم

آن در تولید رواناب بود. روند هدررفت خاک تحت اثر ضربه قطرات باران نامنظم بود و در شدت‌های مختلف باران با کاهش و افزایش مواجه بود. بررسی تغییرات کلی سهم ضربه قطرات در شدت‌های مختلف نشان دهنده روند افزایشی جزئی (غیرمعنی‌دار) در خاک لوم رسی و روند کاهشی جزئی (غیرمعنی‌دار) در خاک لوم‌شنی است (شکل ۵). دلیل این امر می‌تواند فراوانی ذرات فرسایش پذیر در شیار باشد که این مقدار وابسته به پایداری خاکدانه است. در خاک‌های فرسایش پذیرتر، به دلیل حساس بودن خاکدانه‌ها به فرسایش، قطرات باران توانایی بیشتری در تخریب و کنده شدن ذرات از شیار و انتقال آنها توسط رواناب دارند. این نتایج با گفته‌های گای و همکاران (Guy et al., 1987) نیز موافق است که دریافت ۸۵ درصد کل عملکرد رسوب در اثر باران ناشی از ضربه قطرات باران است. همچنین آن و همکاران (An et al., 2012) اعلام کردند اگر تفاوت در عملکرد رسوب بین تأثیر ضربه مستقیم باران و عدم ضربه باران در نظر گرفته شود، فرسایش توسط ضربه قطرات باران ۷۳/۷۵ تا ۹۶/۲۰ درصد از کل عملکرد رسوب را به خود اختصاص می‌دهد. خاک لوم رسی نسبت به خاک لوم‌شنی از محتوای ماده آلی کمتر، پایداری ساختمان ضعیف‌تر و هدایت هیدرولیکی اشباع پایین‌تر برخوردار بود. به این دلیل سهم ضربه قطرات در هدررفت خاک از آن کمتر از خاک لوم‌شنی شد. در خاک لوم‌شنی، نفوذپذیری بالای خاک از یک سو و مقاومت نسبتاً زیاد خاکدانه‌ها از سوی دیگر شرایطی را فراهم آورد که برای هدررفت خاک از آن نیازمند صرف بیشتر انرژی قطرات باران باشد. در این خاک بر خلاف لوم‌رسی، با افزایش شدت بارندگی سهم ضربه در هدررفت خاک از شیار کاهش یافت چرا که در شدت‌های بالای بارندگی افزایش حجم باران عامل مهمی در افزایش رواناب و هدررفت خاک بود.



شکل ۵- تفاوت سهم ضربه قطرات در رواناب و هدررفت خاک تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 5- Difference between the role of raindrop impact in runoff and soil loss under different rainfall intensities



شکل ۶- میانگین سهم ضربه قطرات در تولید رواناب و هدررفت خاک تحت شدت‌های مختلف باران

Figure 6- Average contribution of raindrop impact in runoff production and soil loss under different rainfall intensities

### نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که شدت باران عاملی مهم در تولید رواناب و هدررفت خاک از شیارها در خاک‌های مورد بررسی در ناحیه نیمه خشک است. مقدار تولید رواناب در خاک لوم رسی و لوم شنی تحت تأثیر ضربه قطرات باران به ترتیب ۴۴ و ۳۶ درصد افزایش یافت و مقدار هدررفت خاک نیز به ترتیب ۵۳ و ۶۲ درصد بیشتر شد. این موضوع اهمیت ضربه قطرات باران را در تشدید رواناب و هدررفت خاک نشان می‌دهد. با توجه به پایداری بیشتر خاکدانه‌ها در خاک لوم‌شنی، نقش ضربه قطرات در هدررفت خاک در آن بارزتر بود. سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک تحت تأثیر مقدار شدت باران قرار گرفت. به نظر می‌رسد با افزایش شدت باران، سهم قطرات باران در هدررفت خاک نسبت به رواناب دچار کاهش بیشتری می‌شود. این موضوع نشان دهنده مقاومت اندک خاکدانه‌ها در برابر تخریب قطرات باران در شدت‌های بالای بارندگی است. به طور کلی این پژوهش نشان داد که تأثیر ضربه قطرات باران در رواناب و هدررفت خاک به دو عامل نوع خاک (بافت خاک و ویژگی‌های ساختمانی) و شدت باران وابسته است. در خاک‌های با ساختمان نسبتاً پایدارتر و نیز در باران‌های با شدت پایین، سهم ضربه قطرات در رواناب و هدررفت خاک بسیار آشکارتر است. با توجه به ناپایداری نسبی ساختمان خاک‌ها در مناطق نیمه خشک جلوگیری از تأثیر مستقیم قطرات باران بر سطح خاک و تشدید تولید رواناب و هدررفت خاک ضروری است. اهمیت حفظ پوشش سطح خاک در باران‌های با شدت نسبتاً پایین دوچندان است.

### مقایسه سهم ضربه قطرات باران بر رواناب و هدررفت خاک

بر اساس شکل ۶، سهم ضربه قطرات باران بر هدررفت خاک در هر دو خاک بیشتر از رواناب بود. میانگین سهم ضربه قطرات در شدت‌های باران از نظر رواناب در خاک لوم رسی ۴۴/۲ و در خاک لوم شنی ۳۶/۵ درصد بود. همچنین میانگین سهم ضربه قطرات در شدت‌های باران از نظر هدررفت خاک در خاک لوم رسی ۵۲/۷ درصد و در خاک لوم شنی ۶۲/۳ درصد بود. نقش ضربه قطرات باران در هدررفت خاک در خاک لوم‌رسی و لوم‌شنی به ترتیب ۸/۵ و ۲۵/۸ درصد بیشتر از نقش آن در تولید رواناب در آنها بود. این موضوع اهمیت حفظ پوشش گیاهی سطح خاک را برای مهار فرسایش آبی نشان می‌دهد (Francos et al., 2016). تولید رواناب در خاک لوم‌رسی به مقدار بیشتری نسبت به خاک لوم‌شنی متأثر از ضربه قطرات باران بود با این وجود نقش ضربه قطرات در هدررفت خاک از آن نسبتاً کمتر بود. ساختمان ضعیف در این خاک سبب شد تا ضربه قطرات باران به سهولت سبب جدایش خاکدانه‌ها شده و با انسداد منافذ خاک سبب افزایش تولید رواناب شوند. در برخی پژوهش‌ها به اهمیت ساختمان خاک از نظر مقاومت در برابر تخریب به وسیله قطرات باران اشاره شده است. روحی‌پور و همکاران (Rouhipour et al., 2004) در پژوهش خود، چهار نمونه خاک را تحت چهار شدت بارندگی و پنج شیب متفاوت بررسی کرده و نشان دادند که با افزایش درصد خاکدانه‌های پایدار، تخریب خاک توسط ضربه قطرات باران کاهش یافته و مقاومت خاک به فرسایش افزایش می‌یابد.

1. Akbari, S., & Vaezi, A.R. (2015). Investigating aggregates stability against raindrops impact in some soils of a semi-arid region, North West of Zanjan. *Water and Soil Science*, 25(2), 65-77. (In Persian)
2. An, J., Zheng, F., Lu, J., & Li, G. (2012). Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions. *Soil Science* 177(8), 517-526.
3. Angulo-Martínez, M., Beguería, S., & Kyselý, J. (2016). Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). *Science Total Environment* 568, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.223>
4. Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Navas, A., & Machin, J. (2012). Splash erosion under natural rainfall on three soil types in NE Spain. *Geomorphology* 175, 38-44.
5. Berger, C., Schulze, M., Rieke-Zapp, D., & Schlunegger, F. (2010). Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(12), 1456-1467.
6. Beuselinck, L., Govers, G., Hairsine, P.B., Sander, G.C., & Breynaert, M. (2002). The influence of rainfall on sediment transport by overland flow over areas of net deposition. *Journal of Hydrology*, 257, 145-163.
7. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 377-382.
8. Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465.
9. Chen, X.Y., Huang, Y.H., Zhao, Y., Mo, B., Mi, H.X., & Huang, C.H. (2017). Analytical method for determining rill detachment rate of purple soil as compared with that of loess soil. *Journal of Hydrology*, 549, 236-243.
10. Cheng, Q., Ma, W., & Cai, Q. (2008). The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: a case study in the hilly areas of the Loess Plateau, north China. *GeoJournal*, 71(2-3), 117-125.
11. Choo, H., Park, K.H., Won, J., & Burns, S.E. (2018). Resistance of coarse-grained particles against raindrop splash and its relation with splash erosion. *Soil and Tillage Research*, 184, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.06.009>
12. Fernández-Raga, M.R., Fraile, J., Keizer, M., Teijeiro, V.A., Castro, C., Palencia, C., & Marques, C. (2010). The kinetic energy of rain measured with an optical disdrometer: an application to splash erosion. *Atmospheric Research*, 96(2): 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.013>
13. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2016). Flow characteristics and rill erodibility in relation to the rainfall intensity in a Marl soil. *Iran-Watershed Management Science and Engineering* 12(40), 11-23. (In Persian with English abstract)
14. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2017). Physical degradation and particle detachment capacity of rill in relation to rainfall intensity and raindrop impact in a Marl soil. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 21(2), 263-277. (In Persian with English abstract)
15. Foroumadi, M., & Vaezi, A.R. (2018). Investigating temporal variation of rill erosion in an erosion-susceptible soil under different rainfall intensities. *Applied Soil Research*, 7(2), 135-147. (In Persian with English abstract)
16. Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., Mataix-Solera, J., & Úbeda, X. (2016). Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain). *Global and Planetary Change*, 145, 11-16.
17. Fu, Y., Li, G.L., Zheng, T.H., Li, B.Q., & Zhang, T. (2017). Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action. *Catena*, 150, 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.11.021>
18. Guy, B.T., Dickinson, W.T., & Rudra, R.P. (1987). The roles of rainfall and runoff in the sediment transport capacity of interrill flow. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1378-1386.
19. Han, Y., Fan, Y., Xin, Z., Wang, L., Cai, Q., & Wang, X. (2016). Effects of wetting rate and simulated rain duration on soil crust formation of red loam. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 140-149.
20. He, J.J., Li, X., Jia, L.J., Gong, H.L., & Cai, Q.G. (2014). Experimental study of rill evolution processes and relationships between runoff and erosion on clay loam and loess. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5), 1716-1725. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.02.0063>
21. He, J.J., Sun, L.Y., Gong, H.L., Cai, Q.G., & Jia, L.J. (2016). The characteristics of rill development and their effects on runoff and sediment yield under different slope gradients. *Journal of Mountain Science*, 13(3), 397-404.
22. Huo, Y.Y., Wu, S.F., Feng, H., & Yuan, L.F. (2011). Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner. *Science of Soil and Water Conservation*, 9, 32-37.
23. Jin, K., Cornelis, W.M., Gabriels, D., Baert, M., Wu, H.J., Schiettecatte, W., Cai, D.X., De Neve, S., Jin, J.Y., Hartmann, R., & Hofman, G. (2009). Residue cover and rainfall intensity effects on runoff soil organic carbon losses. *Catena*, 78(1), 81-86.
24. Kimaro, D.N., Poesen, J., Msanya, B.M., & Deckers, J.A. (2008). Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: interrill and rill erosion. *Catena*, 75, 38-44.
25. Kinnel, P.I.A. (2003). Event erosivity factor and errors in erosion predictions by some empirical models. *Australian Journal of Soil Research*, 211, 991-1003.
26. Li, J., Cai, Q.G., & Sun, L.Y. (2010). Reviewing on factors and threshold conditions of rill erosion. *Progress in*

- Geography*, 29(11), 1319-1325.
27. Lu, J., Zheng, F., Li, G., Bian, F., & An, J. (2016). The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 161, 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.002>
  28. Ma, R.M., Li, Z.X., Cai, C.F., & Wang, J.G. (2014). The dynamic response of splash erosion to aggregate mechanical breakdown through rainfall simulation events in Ultisols (subtropical China). *Catena*, 121, 279-287.
  29. Mc Kenzie, N., Coughlan, K., & Cresswell, H. (2002). *Soil physical measurement and interpretation for land evaluation* (Vol. 5). Csiro Publishing.
  30. Meshesha, D.T., Tsunekawa, A., Tsubo, M., Haregeweyn, N., & Tegegne, F. (2016). Evaluation of kinetic energy and erosivity potential of simulated rainfall using laser precipitation monitor. *Catena*, 137, 237-243. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.017>
  31. Momm, H.G., Wells, R.R., & Bennett, S.J. (2018). Disaggregating soil erosion processes within an evolving experimental landscape. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(2), 543-552.
  32. Moussouni, A., Mouzai, L., & Bouhadeh, M. (2014). The effect of raindrop Kinetic energy on soil erodibility. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 8(12), 879-883.
  33. Qin, C., Zheng, F., Wilson, G.V., Zhang, X.J., & Xu, X. (2019). Apportioning contributions of individual rill erosion processes and their interactions on loessial hillslopes. *Catena*, 181, 104099.
  34. Qin, C., Zheng, F., Xu, X., Wu, H., & Shen, H. (2018). A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope. *Journal of Soils and Sediments*, 18(4): 1679-1690.
  35. Rouhipour, H., Farzaneh, H., & Asadi, H. (2004). The effect of aggregate stability indices on soil erodibility factors using rainfall simulator. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 11(3): 235-254. (In Persian)
  36. Shen, H.O., Zheng, F.L., Wang, L., & Wen, L.L. (2019). Effects of rainfall intensity and topography on rill development and rill characteristics on loessial hillslopes in China. *Journal of Mountain Science*, 16(10): 2299-2307.
  37. Tailong, G., Quanjui, W.D., & Li, J.Z. (2010). Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid region of northwestern China. *Soils and Sediment*, 10, 1200-1208.
  38. Vaezi, A.R., Ahmadi, M., & Cerdà, A. (2017). Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls. *Science of the Total Environment*, 583, 382-392.
  39. Vaezi, A.R., Akbari, S., & Mohammadi, M.H. (2014). Study of rainfall processes in calcareous soils aggregates under laboratory conditions in NW Zanjan, Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(1), 87-94. (In Persian)
  40. Vaezi, A.R., & Besharat, F. (2015). Rainfall during events on runoff and soil loss under simulated rainfalls. *Jwmseir*, 9(29), 9-18. (In Persian)
  41. Vaezi, A.R., & Heidari, M. (2019). Investigating the effect of wheat straw on soil loss by rill erosion in furrows in different growth stages of rainfed wheat. *Journal of Soil Research (Soil and Water Sciences)*, 33(2), 127-139. (In Persian with English abstract)
  42. Vaezi, A.R., & Vatani, A. (2014). Determination of rill erodibility in some Zanjan soils under rain simulated. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources*, 71, 59-67. (In Persian)
  43. Vaezi, A.R., & Vatani, A. (2015). Determining rill erodibility in some soils in Zanjan province under simulated rainfall. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 19(71), 59-68. (In Persian). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.59>
  44. Valette, G., Prévost, S., Lucas, L., & Léonard, J. (2006). SoDA project: A simulation of soil surface degradation by rainfall. *Computers and Graphics*, 30(4), 494-506.
  45. Vrieling, A. (2006). Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. *Catena*, 65(1), 2-18.
  46. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
  47. Wei, W., Chen, L., Fu, B., Huang, Z., Wu, D., & Gui, L. (2007). The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China. *Journal of hydrology*, 335(3-4), 247-258.
  48. Wirtz, S., Seeger, M., & Ries, J.B. (2012). Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes. *Catena*, 91, 21-34.
  49. Wu, H., Xu, X., Zheng, F., Qin, C., & He, X. (2018). Gully morphological characteristics in the loess hilly-gully region based on 3D laser scanning technique. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(8), 1701-1710.
  50. Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses I. *Agronomy Journal*, 28(5), 337-351.
  51. Zarif, M.S., Sadeghi, S.H.R., & Mirnia, S.KH. (2009). *Study on changes in runoff and sediment yield in two difference slope in Kojour forest watershed*. Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran. Gorgan. 2-3 May, page 2. (In Persian)
  52. Zhang, X.C., & Wang, Z.L. (2017). Interrill soil erosion processes on steep slopes. *Journal of Hydrology*, 548, 652-664. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.046>
  53. Zhao, L., Hou, R., & Wu, F. (2018). Effect of tillage on soil erosion before and after rill development. *Land*





## The Effect of Land Abandonment on Biological, Physical and Chemical Properties of Soils

M.S. Sadati<sup>1</sup>, A. Beheshti Ale Agha<sup>2\*</sup>, F. Hamedi<sup>3</sup>

Received: 05-07-2022

Revised: 30-09-2022

Accepted: 30-11-2022

Available Online: 30-11-2022

### How to cite this article:

Sadati, M.S., Beheshti Ale Agha, A., & Hamedi, F. (2023). The effect of land abandonment on biological, physical and chemical properties of soils. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 397-413. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77543.1179>

### Introduction

Changing land use may have a major influence on physical, chemical, and biological soil properties with a consequence for soil functioning and productivity. Abandonment of agricultural lands is actually a kind of restoration of these lands to their original natural conditions, which is often done through human intervention. Soil restoration after land abandonment is a complex phenomenon. The pastures of our country are typically cultivated in rainfed methods, and the use of agricultural inputs such as animal manure, poisons, and chemical fertilizers is not very common. Therefore the continuous cultivation of a product and the lack of use of agricultural inputs causes a gradual decrease in fertility and increase erosion. Hence, after years of cultivation, the production potential decreases, and the land is abandoned.

### Materials and Methods

This study was conducted to determine the effects of land abandonment on some physical, chemical, and biological soil properties in the 0-20 and 20-40 cm depth at three different sites including Lal Abad, Qaleh Kohneh and Chalab-e Pain, using 2×2 factorial layout arranged in a completely randomized design (CRD) with three replications. The physical, chemical, and biological characteristics of the soil were measured by conventional laboratory methods. Electrical conductivity of saturated paste extract (ECe) with electrical conductivity meter device in saturated paste extract, pH of saturated paste with pH meter device, and bulk density by cylinder method were determined in the samples. The amount of dispersible clay (DC) was determined by the method of Gee and Bauder and the Mean Weight Diameter (MWD) was determined by the method of the wet sieve. The amount of absorbable phosphorus by extraction method and total soil nitrogen by Keldahl method were measured in the samples. The amount of soil organic carbon (OC) in the samples was determined by the method of Walkley and Black. Mineralization of organic carbon (soil respiration) (Cmin) and metabolic quotient (qCO<sub>2</sub>) were obtained by validated and conventional methods.

### Results and Discussion

The results showed that the abandonment of agricultural lands significantly increased the MWD and reduced the amount of dispersible clay. Bulk density also decreased due to the abandonment of agricultural land in all areas except the Qaleh Kohneh area. The results of the analysis of the chemical characteristics of the soil indicated a decrease in soil pH in all areas and depths, except in the Qaleh Kohneh area. The biological results also showed that the abandonment of agricultural lands caused the change in biological characteristics. Abandonment of agricultural lands in all three regions led to an increase in microbial biomass carbon and soil microbial respiration. High microbial respiration in abandoned lands is probably related to more organic carbon in these soils. Loss of soil organic matter due to cultivation and improper soil management is often the main reason for reducing soil respiration in agricultural lands compared to abandoned lands.

1 and 2- Master's Degree in Soil Biology and Associate Professor, Department of Soil Science, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [beheshtiali97@gmail.com](mailto:beheshtiali97@gmail.com))

3- Soil and Water Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2022.77543.1179](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77543.1179)

## **Conclusion**

Changing land use from agriculture to abandonment improved the physical, chemical, and biological indicators of soil quality, especially the surface layer of the soil, which ultimately led to the improvement of soil quality in all the studied areas. It can be concluded that the release of agricultural lands has increased soil health by increasing the carbon input into the soil, improving the soil aggregates, and improving the microbial activity of the soil.

**Keywords:** Intensive agriculture, Land use change, Soil erosion, Soil health

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۱۳-۳۹۷

## اثر رهاسازی اراضی کشاورزی بر برخی خصوصیات بیولوژیکی، فیزیکی و شیمیایی خاک

مهرانگیز السادات ساداتی<sup>۱</sup> - علی بهشتی آل آقا<sup>۲\*</sup> - فردین حامدی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

### چکیده

تغییر کاربری اراضی، تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌گذارد. در این پژوهش تأثیر رهاسازی اراضی کشاورزی که به مدت حداقل ۱۰ سال رهاسده‌اند بر شاخص‌های EC، pH، وزن مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه‌ها، میزان فسفر، نیتروژن و کربن آلی خاک، معدنی شدن کربن آلی، کسر متابولیسم و کربن زیست‌توده میکروبی در دو عمق صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری در ۳ منطقه به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در ۳ تکرار مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رهاسازی اراضی کشاورزی پایداری خاکدانه‌ها را به‌طور معنی‌دار افزایش و میزان رس قابل انتشار را کاهش داد. جرم مخصوص ظاهری نیز در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی در کلیه مناطق به‌جز در منطقه قلعه کهنه کاهش یافت. نتایج تجزیه و تحلیل ویژگی‌های شیمیایی خاک حاکی از کاهش pH خاک در کلیه مناطق و اعماق به‌جز در منطقه قلعه کهنه بود. نتایج بیولوژیکی نیز نشان داد که رهاسازی اراضی کشاورزی سبب تغییر ویژگی‌های بیولوژیکی شد. رهاسازی اراضی کشاورزی در هر سه منطقه منجر به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی و تنفس میکروبی خاک شد. بالا بودن تنفس میکروبی در اراضی رهاسده به احتمال زیاد به کربن آلی بیشتر در این خاک‌ها مرتبط است. هدر رفت ماده آلی خاک بر اثر کشت و کار و مدیریت نامناسب خاک اغلب عامل اصلی کاهش تنفس خاک در اراضی کشاورزی نسبت به اراضی رها شده است. به‌طور خلاصه، تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به رهاسده باعث بهبود شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی کیفیت خاک، به‌ویژه لایه سطحی خاک گردید که نهایتاً بهبود کیفیت خاک را در تمامی مناطق مورد مطالعه در پی داشته است. از این‌رو، می‌توان چنین نتیجه گرفت که رهاسازی اراضی کشاورزی با افزایش ورود کربن به خاک، بهبود خاکدانه‌ها و بهبود فعالیت میکروبی خاک باعث افزایش سلامت خاک گردیده است.

واژه‌های کلیدی: به‌هم‌خوردگی خاک، تغییر کاربری، سلامت خاک، کشاورزی فشرده

### مقدمه

زیادی از اراضی رهاسده که دلایل بوم‌شناختی و اقتصادی-اجتماعی متفاوتی داشته است، در آینده هم اراضی زیادی ممکن است رها شوند که دلیل عمده آن مهاجرت روستاییان خواهد بود (Cuesta et al., 2012).

رهاسازی اراضی کشاورزی در واقع نوعی ترمیم و بازیابی این اراضی به سمت شرایط طبیعی اولیه است که اغلب از طریق مداخله

رهاسازی اراضی کشاورزی از پیامدهای اصلی تغییرات کاربری اراضی در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. با توجه به عواقب منفی کشاورزی فشرده در این مناطق، پیش‌بینی می‌شود که در آینده رهاسازی اراضی کشاورزی روند سریع‌تری در این نواحی داشته باشد (Lesschen et al., 2008). در طول چند دهه گذشته مساحت

۱ و ۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد بیولوژی خاک و دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران  
(<sup>\*</sup> نویسنده مسئول: Email: beheshtiali97@gmail.com)

۳- عضو هیات علمی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی کرمانشاه، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران

بررسی‌هایی که در نواحی مرکزی کره جنوبی توسط لی و همکاران (Lee et al., 2002) انجام شده است نشان داده است که میزان ماده آلی خاک با افزایش زمان رهاسازی، افزایش پیدا می‌کند. دو و همکاران (Du et al., 2007) به این نتیجه رسیده‌اند که میزان ماده آلی در مرحله نخستین رهاسازی کاهش پیدا می‌کند اما پس از این مرحله افزایش می‌یابد. در هنگام تبدیل اراضی کشاورزی به اراضی رهاسازده، میزان ماده آلی خاک افزایش می‌یابد (Van Der Wal et al., 2006).

در تحقیقی که توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2012) در مقایسه زمین‌هایی که هم اکنون تحت کشت هستند با زمین‌هایی که به مدت ۶ سال رهاسازده بودند، انجام شد مشخص گردید میزان کربن آلی به اندازه ۵/۱ درصد افزایش یافته بود. همچنین آن‌ها دریافتند که با افزایش عمق خاک تا ۱ متری میزان کربن آلی خاک در هر دو نوع خاک کشت‌شده و رهاسازده، سیر کاهشی داشته است. هنگامی که زمین‌های تحت کشت، رها شدند ذخیره کربن آلی خاک در عمق ۲۰ سانتی‌متری خاک به میزان ۲۲/۶ درصد افزایش یافت. بر طبق نظر این محققین دلیل افزایش کربن در اراضی رهاسازده تجمعات ریشه و لاش برگ گیاهان در اراضی رهاسازده بود.

pH خاک در انواع مختلف اراضی رهاسازده، رفتارهای مختلفی از خود بروز می‌دهد. در تحقیق انجام شده توسط ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2010) مشخص شده است بین pH خاک و زمان رهاسازی، رابطه ویژه‌ای وجود ندارد. با توجه به بررسی‌های نانز و همکاران (Nunes et al., 2012) در اراضی رهاسازده مشخص شده است که در تمام مراحل رهاسازی pH خاک حالت اسیدی داشته است که این مطلب نشان می‌دهد که pH بستگی زیادی به پوشش گیاهی ندارد بلکه وابسته به مواد مادری است که در این مناطق مواد مادری سرچشمه گرفته از صخره‌های اسیدی بوده است. در تحقیق انجام شده توسط کامالا و سونادا (Kamla and Sunada, 2014) مشخص شده است که در اراضی کشاورزی که به مدت ۵۲ سال رهاسازده بودند نسبت به اراضی کشاورزی که به مدت ۲ سال رهاسازده‌اند pH خاک از ۵/۴۴ به ۶/۱۶ رسیده است.

جرم مخصوص ظاهری در اراضی که به مدت ۱۵ سال رهاسازده‌اند نسبت به اراضی که به مدت ۲ سال رهاسازده‌اند کاهش چشمگیرتری داشته و از ۱/۵۷ به ۱/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب رسیده است (Kamla and Sunada, 2014). مارتنز فرناندز و همکاران (Martinez-Fernandez et al., 1995) بیان کردند که رهاسازی اراضی کشاورزی در طول یک دوره ۱۰ ساله اثرات مثبتی بر روی خصوصیات خاک گذاشته و خصوصیات خاک به حالت قبل از کشت و کار نزدیک می‌شود. رهاسازی این مناطق باعث بهبود پارامترهایی همچون خاکدانه سازی و پایداری ساختمان خاک می‌شود (Kosmas et al., 2000). در بررسی‌های انجام شده توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2011) مشخص شده است که با گذشت زمان از رهاسازی اراضی کشاورزی

بشر صورت می‌پذیرد. ترمیم خاک پس از رهاسازی اراضی، پدیده‌ای پیچیده است. یک زمین کشاورزی رهاسازده، حداقل دو مرحله انتقال یا تغییر روبه را طی می‌نماید، ابتدا زمانی که پوشش گیاهی طبیعی آن برای ایجاد مزارع حذف می‌شود و سپس هنگامی که کشت محصولات کشاورزی متوقف می‌گردند. به هر حال رهاسازی اراضی کشاورزی که در واقع نوعی تغییر کاربری اراضی شناخته می‌شود، بخشی از یک مسئله بزرگ‌تر جهانی به نام اصلاح محیط‌زیست آسیب دیده زمین می‌باشد (Gelt et al., 2011).

استقرار مجدد پوشش گیاهی پس از رهاسازی کشاورزی در واقع یک توالی ثانویه است که ابتدا با استقرار گیاهان یک‌ساله شروع و سپس علف‌های کوتاه و سپس بلند و بوته‌ها و یا درختچه‌ها ادامه می‌یابد (Lesschen et al., 2008). بنت (Bonet, 2004) مشاهده کرد که در اولین مرحله پس از رهاسازی اراضی کشاورزی، گیاهان یک‌ساله و چندساله با طول عمر کوتاه استقرار و غنای گونه‌ای بیشتری دارند. در انتها گونه‌های چوبی پس از گذشت ۲۰ سال از رهاسازی، استقرار می‌یابند. بازگشت شرایط طبیعی که با استقرار مجدد پوشش گیاهی و در نتیجه ایجاد بوته‌زارها یا جنگل‌ها همراه است، به شرایط اقلیم و نوع خاک اکوسیستم بستگی دارد (Benayas et al., 2007).

در نتیجه رهاسازی اراضی کشاورزی، مصرف کودهای شیمیایی، سموم و از همه مهم‌تر، به هم خوردگی خاک ناشی از عملیات خاک‌ورزی متوقف می‌شود که نتیجه توقف به هم خوردگی، در مرحله اول تشکیل و بازیافت خاکدانه‌های درشت و افزایش پایداری خاکدانه‌ها و در پی آن افزایش حفاظت فیزیکی ماده آلی خاک در برابر تجزیه میکروبی می‌باشد (Dunjo et al., 2003; Bonet, 2004; Zhang et al., 2007; Lesschen et al., 2008).

استقرار تدریجی پوشش گیاهی و بازیابی شرایط طبیعی در میکرو اقلیم، موجب افت دما و افزایش رطوبت در سطح خاک و به دنبال آن، افزایش فعالیت میکروبی و تجزیه ماده آلی می‌شود (Benayas et al., 2007). رهاسازی اراضی کشاورزی در نتیجه تشکیل خاکدانه‌های درشت منجر به افزایش نفوذپذیری خاک شده، بنابراین رواناب سطحی کاهش و ظرفیت نگهداری آب افزایش و فرسایش‌پذیری خاک کاهش می‌یابد (Dunjo et al., 2003; Bonet, 2004).

نتایج بسیاری از مطالعات حاکی از آن است که رهاسازی اراضی کشاورزی منجر به افزایش تنوع زیستی گیاهان و موجودات خاکزی می‌گردد. مهم‌تر اینکه ترکیب جامعه میکروبی خاک تغییر می‌یابد که تغییر فرآیندهای میکروبی اکوسیستم را در پی دارد. به طوری که در نتیجه تغییر کیفیت مواد آلی و pH خاک، احتمالاً به دلیل توقف عملیات خاک‌ورزی زیست‌توده قارچی و بخصوص قارچ‌های میکوریزا و کرم‌های خاکی افزایش و زیست‌توده باکتریایی کاهش می‌یابد (Laiolo et al., 2004; Inoue, 2005; Kardol et al., 2005; Baur et al., 2006).

منطقه لعل آباد در استان کرمانشاه، شهرستان ماهیدشت واقع شده است (شکل ۲) و نمونه برداری از آن در ۲ نوع کاربری اراضی رهاسده و اراضی تحت کشت انجام شد. این منطقه به طور متوسط دارای ۱۶۳۷ متر ارتفاع از سطح دریا است و مختصات جغرافیایی آن " ۳۷ ' ۱۳ ° شمالی و " ۵۲ ' ۴۶ ° ۴۶ شرقی است. اقلیم این منطقه طبق روش دومارتن اصلاح شده نیمه خشک می باشد. اراضی زراعی این منطقه حداقل به مدت ۱۵۰ سال تحت کشت بوده و محصولاتی چون گندم، جو، نخود و عدس از آن برداشت شده است. خاک ورزی در این اراضی به وسیله گاواهن برگردان دار، کولتیواتور و دیسک معمولی انجام می گیرد و عمق شخم ۲۰ سانتی متر است. اراضی رهاسده آن قدمتی ۵۰ ساله دارند و عمده پوشش گیاهی طبیعی آن را گیاهان علفی یکساله و چندساله (گلرنگ وحشی، گراس ها مانند جو وحشی، خردل وحشی، کنگر صحرایی، شقایق، شکر تیغال و جوموشک) تشکیل می دهد. همچنین این اراضی دارای بافت لوم رسی سیلتی و ماده مادری سنگ های اسیدی می باشد.

منطقه قلعه کهنه در استان کرمانشاه، شهرستان کرمانشاه واقع شده است (شکل ۳) و نمونه برداری از آن در ۲ نوع کاربری اراضی رهاسده و اراضی تحت کشت انجام شد. این منطقه به طور متوسط دارای ۱۳۲۴ متر ارتفاع از سطح دریا است که مختصات جغرافیایی آن " ۳۸ ' ۲۱ ° شمالی و " ۴۴ ' ۳ ° ۴۷ شرقی است. اقلیم این منطقه طبق روش دومارتن اصلاح شده نیمه خشک می باشد.

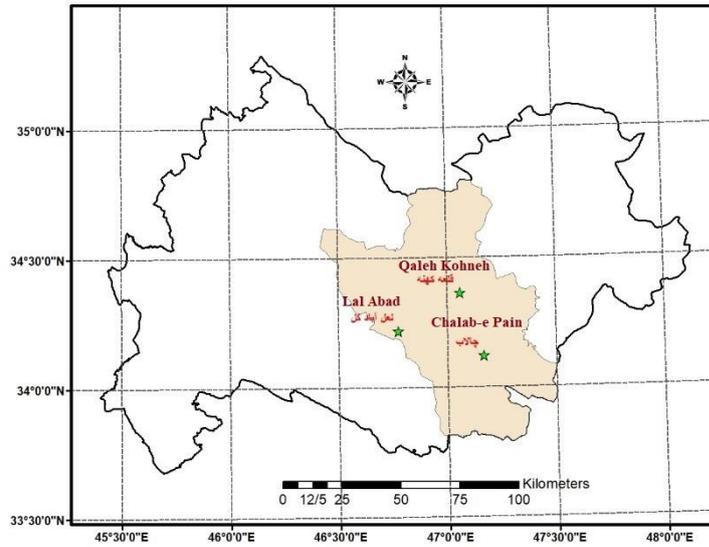
کربن زیست توده میکروبی افزایش پیدا کرد و این به خاطر استقرار مجدد پوشش گیاهی در اراضی رهاسده است. بررسی های جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2009) نشان داد که در اراضی رهاسده واقع در مناطق نیمه خشک چین در عمق ۲۰ سانتی متری خاک، کربن زیست توده میکروبی و نسبت کربن زیست توده میکروبی به کربن آلی خاک با افزایش زمان رهاسازی افزایش و با افزایش عمق کاهش پیدا کردند.

در بسیاری از مراتع کشور ما کشاورزی اغلب به صورت دیم صورت می گیرد که استفاده از نهاده های کشاورزی مانند کود دامی، سموم و کودهای شیمیایی خیلی معمول نمی باشد و بنابراین کشت پیوسته یک محصول و عدم استفاده از نهاده های کشاورزی، سبب کاهش تدریجی حاصلخیزی و باروری خاک می شود. لذا پس از سال ها کشت، پتانسیل تولید کاهش و زمین رها می گردد. این رهاسازی حتماً موجب تغییر ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می شود. هدف این مطالعه بررسی اثر رهاسازی (حداقل ۱۰ سال) اراضی کشاورزی بر ویژگی های pH، EC، وزن مخصوص ظاهری، پایداری خاکدانه ها، میزان فسفر، نیتروژن و کربن آلی خاک، معدنی شدن کربن آلی، کسر متابولیسی و کربن زیست توده میکروبی در استان کرمانشاه بود.

## مواد و روش ها

### مناطق مورد مطالعه

به منظور بررسی تأثیر رهاسازی اراضی کشاورزی بر برخی شاخص های کیفیت خاک، ۳ منطقه در استان کرمانشاه انتخاب (شکل ۱) و از زوج اراضی کشاورزی و رهاسده که حداقل به مدت ۱۰ سال کشت نشده اند نمونه برداری شد. مناطق مورد نظر توسط روش های پارامتریک استوری (Storie, 1976) و ریشه دوم (Khidir, 1986) برای تعیین تناسب اراضی مورد بررسی قرار گرفتند. این مناطق که به لحاظ ویژگی های ظاهری خاک، اقلیم، شیب و پستی و بلندی یکسان بودند در ۲ عمق صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری و در ۳ تکرار نمونه های مرکب خاک تهیه گردید. همچنین به منظور تعیین جرم مخصوص ظاهری، از عمق های مورد مطالعه، نمونه های دست نخورده خاک نیز تهیه شدند. نمونه های جمع آوری شده پس انتقال به آزمایشگاه هوا خشک و سپس هر یک از نمونه های هوا خشک شده به دو بخش تقسیم شدند. بخشی از الک ۲ میلی متری و بخش دیگر از الک ۴ میلی متری عبور داده شد و هر کدام در ظروفی جداگانه نگهداری گردیدند. قبل از شروع تجزیه خاک و اندازه گیری ها، رطوبت اولیه خاک هوا خشک جهت تصحیح پارامترها اندازه گیری گردید. ذرات درشت قابل مشاهده، بقایای گیاهی و سنگریزه موجود در نمونه ها به طور کامل و به صورت دستی جدا شدند. با توجه به عدم تغییر ویژگی بافت خاک در طی ۱۰ سال گذشته، از این ویژگی برای بررسی و تأیید یکسان بودن جفت اراضی کشاورزی و رهاسده در هر منطقه استفاده شد.



شکل ۱- مختصات جغرافیایی مناطق مورد مطالعه  
Figure 1- Geographical coordinates of the study areas



شکل ۲- منطقه مورد مطالعه در لعل آباد  
Figure 2- The studied area in Lal Abad

کشت می‌شد. خاک‌ورزی در این اراضی به‌وسیله گاواهن برگردان دار، کولتیواتور و دیسک معمولی انجام می‌گیرد و عمق شخم ۲۰ سانتیمتر

اراضی زراعی این منطقه حداقل به مدت ۱۱۰ سال تحت کشت بوده و محصولاتی چون گندم، ذرت، سیب‌زمینی، هویج و پیاز در آن

صحرايي، شقایق، شکر تیغال و جوموشک) تشکیل می‌دهد. همچنین این اراضی دارای بافت لوم رسی و ماده مادری سنگ‌های اسیدی می‌باشد.

#### شاخص‌های مورد بررسی در خاک

ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک با روش‌های آزمایشگاهی مرسوم اندازه‌گیری شد. هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (ECe) با دستگاه رسانایی سنج الکتریکی در عصاره گل اشباع (Christenen and Johnston, 1997)، pH گل اشباع با دستگاه pH متر (Christenen and Johnston, 1997)، وزن مخصوص ظاهری به روش سیلندر (Estefan et al., 2013) در نمونه‌ها تعیین شدند. میزان رس قابل انتشار (DC) به روش گی و بائودر (Gee and Bauder, 1986) و پایداری خاکدانه‌ها (MWD) به روش الک تر (Yoder, 1936) تعیین شدند. میزان فسفر قابل جذب به روش عصاره گیری (Estefan et al., 2013) و نیتروژن کل خاک به روش کج‌لدال (Estefan et al., 2013) در نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند.

است و اراضی رهاسده آن قدمتی ۱۸ ساله دارند و عمده پوشش گیاهی آن علف‌های یک‌ساله و چند ساله (گلرنگ وحشی، گراس‌ها مانند جو وحشی، خردل وحشی، کنگر صحرايي، شقایق، شکر تیغال و جوموشک) است. همچنین این اراضی دارای بافت لوم رسی سیلتی و ماده مادری رسوبات آهکی می‌باشد.

منطقه چالاب پایین در استان کرمانشاه، شهرستان فیروزآباد واقع شده است (شکل ۴) و نمونه‌برداری از آن در ۲ نوع کاربری اراضی رهاسده و اراضی تحت کشت انجام شد. این منطقه به‌طور متوسط دارای ۱۵۶۹ متر ارتفاع از سطح دریا است که مختصات جغرافیایی آن ۳۶° ۷' شمالی و ۴۷° ۸' ۳۱' شرقی است. اقلیم این منطقه طبق روش دومارتن اصلاح شده نیمه‌خشک می‌باشد. اراضی زراعی این منطقه حداقل به مدت ۷۰ سال تحت کشت محصولاتی چون گندم، جو و نخود بوده‌اند. خاک‌ورزی در این اراضی به‌وسیله گاواهن برگردان دار، کولتیواتور و دیسک معمولی انجام می‌گیرد و عمق شخم ۲۰ سانتی متر است اراضی رهاسده آن در حدود ۲۰ سال است که رها گردیده است و عمده پوشش گیاهی آن را گیاهان یک‌ساله و به‌ندرت چندساله (گلرنگ وحشی، گراس‌ها مانند جو وحشی، خردل وحشی، کنگر



شکل ۳- منطقه مورد مطالعه در قلعه کهنه  
Figure 3- The studied area in Qaleh Kohneh



شکل ۴- منطقه مورد مطالعه در چالاب پایین  
Figure 4- The studied area in Chalab-e Pain

میزان کربن آلی خاک ( $OC$ ) در نمونه‌ها به روش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) تعیین شد. معدنی شدن کربن آلی (تنفس خاک) ( $C_{min}$ ) و کسر متابولیکی ( $qCO_2$ ) با روش‌های تأیید شده و مرسوم به دست آمدند (Nannipieri and Alef, 1995). کربن زیست‌توده میکروبی با روش گاز دهی و طی ۱۰ روز خواباندن (Nannipieri and Alef, 1995) تعیین گردید و ضریب بازیافت یا راندمان تجزیه کربن میکروبی معادل  $0/45$  در نظر گرفته شد.

میزان کربن آلی خاک ( $OC$ ) در نمونه‌ها به روش واکلی و بلک (Walkley and Black, 1934) تعیین شد. معدنی شدن کربن آلی (تنفس خاک) ( $C_{min}$ ) و کسر متابولیکی ( $qCO_2$ ) با روش‌های تأیید شده و مرسوم به دست آمدند (Nannipieri and Alef, 1995). کربن زیست‌توده میکروبی با روش گاز دهی و طی ۱۰ روز خواباندن (Nannipieri and Alef, 1995) تعیین گردید و ضریب بازیافت یا راندمان تجزیه کربن میکروبی معادل  $0/45$  در نظر گرفته شد.

### نتایج و بحث

#### تأثیر تغییر کاربری اراضی و عمق بر ویژگی‌های شیمیایی خاک مناطق مورد مطالعه

##### pH خاک

نتایج نشان داد که در منطقه لعل آباد تأثیر عمق بر واکنش خاک معنی‌دار نبود؛ اما اثر نوع کاربری و اثر متقابل آن با عمق بر pH در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). در اراضی رها شده نسبت به اراضی کشاورزی میزان pH در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری  $3/68$  درصد کاهش یافت به گونه‌ای که میزان آن از  $7/33$  به  $7/06$  رسید اما در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری تفاوتی در میزان این شاخص مشاهده نشد (جدول ۲). در منطقه قلعه کهنه نوع کاربری، عمق و اثر متقابل

#### تجزیه و تحلیل آماری

پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و اجزای مواد آلی در تمامی ۳۶ نمونه مرکب خاک، داده‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با جامعه آماری مشتمل بر ۱۲ نمونه مرکب خاک (۳ تکرار  $2 \times 2$  عمق  $2 \times 2$  کاربری) برای هر منطقه به طور جداگانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نوع کاربری (رها شده و کشاورزی) و عمق (صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری) به عنوان متغیرهای مستقل در نظر گرفته شدند. تجزیه و تحلیل کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 برای هر منطقه به طور جداگانه انجام شد. برای مقایسه میانگین از روش حداقل اختلاف معنی‌دار فیشر

اضافه می‌کنند و این احتمال وجود دارد که این کاهش pH به دلیل پوشش گیاهی و یا نشست گرفته از مواد مادری اسیدی باشد. اما در قلعه کهنه احتمالاً به دلیل آن که pH وابستگی زیادی به نوع پوشش گیاهی نداشته است و فقط نشست گرفته از مواد مادری آهکی است به همین خاطر در اثر رهاسازی تغییر نکرده است (Anderson, 1988; Wang et al., 2011; Gruba and Socha, 2016). ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2010) نیز مشاهده کردند که بین زمان رهاسازی و میزان pH رابطه خاصی وجود ندارد درحالی که پژوهشگران دیگری همچون واندروال و همکاران (Van Der Wal et al., 2006) جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2009) و وانگ و همکاران (Wang et al., 2011) به این نتیجه رسیدند که به دلیل استقرار مجدد پوشش گیاهی pH کاهش می‌یابد.

آن با نوع کاربری بر واکنش خاک معنی‌دار نشد. در این منطقه رهاسازی اراضی کشاورزی تأثیری بر میزان pH نداشت (جدول‌های ۱ و ۲). نتایج نشان داد که نوع کاربری و عمق در سطح احتمال ۵ درصد اثر معنی‌داری بر واکنش خاک در منطقه چالاب پایین داشتند اما اثر متقابل آن‌ها بر pH معنی‌دار نشد (جدول ۱). در این منطقه تغییر کاربری اراضی کشاورزی سبب کاهش ۰/۸۵ درصدی pH خاک گردید (جدول ۲). بررسی‌ها نشان داد که در لعل آباد و چالاب پایین میزان pH در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی روند کاهشی داشته است که ممکن است به دلیل استقرار مجدد پوشش گیاهی درختان بلوط در حاشیه اراضی رهاسازی لعل آباد و افزایش در میزان مواد آلی خاک که به احتمال زیاد حاوی بنیان‌های اسیدی فراوانی بوده است، باشد؛ همچنین گیاهان علفی یکساله در منطقه چالاب پایین نیز ماده آلی فراوانی به خاک

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک  
Table 1- The analysis of variance of data on chemical and physical properties of soil

نام منطقه Name of location	Sources of variance	df	میانگین مربعات Mean square							
			pH	P	OC	TN	C/N	BD	DC	MWD
لعل آباد Lal Abad	نوع کاربری Land use type	1	16**	0.27 <sup>ns</sup>	66.9**	48.3**	125**	33.8**	75**	72.4**
	عمق Depth	1	1 <sup>ns</sup>	110**	80.0**	71.1**	40.1**	1.80 <sup>ns</sup>	0.85 <sup>ns</sup>	7.78*
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	16**	53.7**	36.9**	31.3**	10.2**	16.2**	27**	33.3**
	خطای آزمایشی error	24	0.8	0.95	0.96	0.95	0.96	0.87	0.93	0.93
	CV%	-	0.8	11.5	9.76	9.04	1.41	1.59	9.38	9.69
قلعه کهنه Qaleh Kohneh	نوع کاربری Land use type	1	0.01 <sup>ns</sup>	22.3**	207**	18.6**	71.9**	36.3**	127**	97.9**
	عمق Depth	1	0.01 <sup>ns</sup>	37.8**	72.8**	4.33 <sup>ns</sup>	1.00 <sup>ns</sup>	0.51 <sup>ns</sup>	22.9**	3.10 <sup>ns</sup>
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	1.19 <sup>ns</sup>	28.2**	5.03*	0.04 <sup>ns</sup>	1.12 <sup>ns</sup>	110**	124**	72.0**
	خطای آزمایشی error	24	0.13	0.92	0.97	0.74	0.90	0.95	0.97	0.96
	CV%	-	3.27	11.8	3.14	7.20	2.10	1.78	6.75	6.78
چالاب پایین Chalab-e Pain	نوع کاربری Land use type	1	5.33*	3.57 <sup>ns</sup>	748**	286**	41.4**	116**	90.2**	363**
	عمق Depth	1	5.33*	53.1**	21.1**	13.8**	0.48 <sup>ns</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	0.01 <sup>ns</sup>	33.0**
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	0.0001 <sup>ns</sup>	21.3**	0.49 <sup>ns</sup>	0.03 <sup>ns</sup>	0.25 <sup>ns</sup>	24.6**	370**	85.2**
	خطای آزمایشی error	24	0.57	0.91	0.99	0.97	0.84	0.95	0.98	0.98
	CV%	-	0.70	9.51	4.06	5.58	2.83	2.30	6.47	5.60

\*\* 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

## فسفر قابل دسترس خاک

نوع کاربری اراضی اثر معنی‌داری بر فسفر قابل دسترس خاک در منطقه لعل آباد نداشت. در حالی که عمق و اثر متقابل آن با نوع کاربری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان فسفر قابل دسترس خاک در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری ۲۸/۷ درصد کاهش یافت اما در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری ۱۳۴ درصد افزایش وجود داشته است. همچنین اثر عمق معنی‌دار بوده است یعنی با افزایش عمق میزان این شاخص کاهش پیدا کرد (جدول ۲). اثر کاربری، عمق و اثر متقابل آن‌ها در منطقه قلعه کهنه در سطح احتمال ۱ درصد بر فسفر قابل دسترس معنی‌دار بود (جدول ۱). در اراضی رهاشده نسبت به اراضی کشاورزی میزان فسفر قابل دسترس در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری ۷۸/۶ درصد افزایش داشته است در حالی که در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. همچنین، با معنی‌دار شدن اثر عمق و با افزایش آن فسفر قابل دسترس کاهش یافت (جدول ۲). اثر نوع کاربری اراضی بر فسفر قابل دسترس در منطقه چالاب پایین معنی‌دار نبود؛ اما عمق و اثر متقابل آن با نوع کاربری در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی در این منطقه میزان فسفر قابل دسترس در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری در حدود ۲۵/۹ درصد کاهش یافته است اما در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری تفاوت چشمگیری مشاهده نشد (جدول ۲).

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شد که در لعل آباد و چالاب پایین نوع کاربری بر روی فسفر قابل دسترس تأثیری نداشت اما با این حال، در این مناطق در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میزان فسفر در سطح خاک کاهش یافت. این‌طور به نظر می‌رسد که در گذشته در این اراضی کشاورزی مصرف کودهای شیمیایی فسفر بالا بوده است و هنگامی که این اراضی رها شده‌اند میزان فسفر روند نزولی یافته تا به حالت تعادل خود نزدیک شود؛ اما در منطقه قلعه کهنه میزان فسفر در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی افزایش یافته است که به احتمال زیاد به دلیل ایجاد و توسعه مجدد پوشش گیاهی در این اراضی بوده است. وانگ و همکاران (Wang et al., 2011)، لی و شائو (Li and Shao, 2006) و کامالا و سونادا (Kamla and Sunada, 2014) مشاهده کردند که در اثر استقرار مجدد پوشش گیاهی میزان فسفر قابل دسترس در اراضی رهاشده افزایش می‌یابد که با نتایج به دست آمده در منطقه قلعه کهنه همخوانی دارد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2010) بیان داشتند که فسفر کل و فسفر قابل دسترس با افزایش زمان رهاسازی تغییر چشمگیری نخواهد داشت و دلیل آن را در فرآیندهای بیوشیمیایی سخت در طول توالی ثانویه فسفر در اراضی رهاشده دانسته‌اند. در حالی که دو و همکاران (Du et al., 2007) مشاهده کردند که فسفر قابل دسترس در سرتاسر دوره رهاسازی کاهش پیدا خواهد

کرد که فقط با نتایج قلعه کهنه مغایرت دارد. در لعل آباد و چالاب پایین در اثر رهاسازی فسفر در سطح خاک کاهش می‌یابد.

## کربن آلی خاک

در منطقه لعل آباد اثر کاربری، عمق و اثر متقابل آن‌ها بر کربن آلی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی این منطقه میزان کربن آلی در عمق صفر تا ۲۰ سانتی متری ۹۴/۶ درصد افزایش داشته است در حالی که در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری تفاوت چشمگیری در میزان کربن آلی مشاهده نشد. همچنین با افزایش عمق میزان کربن آلی کاهش یافته (جدول ۲). در منطقه قلعه کهنه، نوع کاربری و عمق اثر معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد بر روی کربن آلی خاک داشته‌اند. همچنین اثر متقابل آن‌ها نیز در سطح احتمال ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱). رهاسازی اراضی کشاورزی به ترتیب سبب افزایش ۲۲/۸ و ۳۹/۲ درصدی میزان کربن آلی خاک به ترتیب در عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری گردید و با افزایش عمق میزان این شاخص کاهش یافت (جدول ۲). نوع کاربری و عمق اثر معنی‌داری بر روی کربن آلی خاک در منطقه چالاب پایین داشته‌اند (جدول ۱)؛ اما اثر متقابل آن‌ها بر روی این شاخص معنی‌دار نشد (جدول ۱). با این حال تغییر کاربری اراضی به ترتیب سبب افزایش ۹۰/۸ و ۹۸/۷ درصدی کربن آلی خاک به ترتیب در عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی متری گردید و با افزایش عمق این ویژگی کاهش یافت (جدول ۲).

نتایج حاکی از آن است که در هر سه منطقه مذکور در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میزان کربن آلی خاک افزایش یافته است که به احتمال زیاد، به علت استقرار مجدد پوشش گیاهی اعم از یک‌ساله و چندساله و درختچه‌ها، تجمع لاش برگ گیاهان در سطح خاک و تجمع ریشه آن‌ها در خاک، عدم انجام عملیات شخم و سایر فعالیت‌های خاک‌ورزی و حفظ خاکدانه‌های خاک بوده است. تشکیل و وجود خاکدانه‌های پایدار باعث حفاظت فیزیکی ماده آلی و کربن آلی شده و در نتیجه مانع از هدر رفت کربن آلی خاک شده است. همچنین این روند افزایشی ممکن است به حالت آغازین زمین نیز بستگی داشته باشد یعنی بلافاصله بعد از توقف عملیات کشت و کار مقادیر زیادی ماده آلی به خاک برگردانده شده است که در نتیجه میزان کربن آلی خاک افزایش یافته است (Li and Shao, 2006; Du et al., 2007; Zhang et al., 2010; Zahng et al., 2012).

## نیترژن کل خاک

اثر نوع کاربری، عمق و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد بر نیترژن کل در منطقه لعل آباد معنی‌دار شد (جدول ۱). با رهاسازی

اراضی کشاورزی میزان نیتروژن کل در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری ۷۳/۵ درصد افزایش یافته است اما در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری تفاوت چشمگیری نداشت (جدول ۲). عمق و اثر متقابل آن با نوع کاربری بر نیتروژن کل در منطقه قلعه کهنه معنی‌دار نبود (جدول ۱) اما اثر نوع کاربری بر نیتروژن کل در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید (جدول ۱). با این حال، با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان نیتروژن کل در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری ۱۷/۹ درصد و در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری ۲۱/۹ درصد افزایش داشته است (جدول ۲). داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهند که اثر نوع کاربری و عمق در منطقه چالاب پایین در سطح احتمال ۱ درصد بر نیتروژن کل معنی‌دار شده است اما اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نبود. با این وجود، با رهاسازی اراضی کشاورزی نیتروژن کل به ترتیب به میزان ۷۰/۴ و ۸۰/۷ درصد افزایش در عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری داشت. با افزایش عمق میزان این شاخص کاهش یافته است (جدول ۲).

در این پژوهش مشخص شده است که در مناطق مذکور با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان نیتروژن کل افزایش یافته است. با توجه به این نکته که مقدار قابل توجهی از نیتروژن موجود در خاک در بخش آلی واقع شده است بنابراین به تبع آن در مناطق مورد بررسی با افزایش میزان ماده آلی خاک میزان نیتروژن کل نیز افزایش یافته است. در اراضی کشاورزی بهره‌برداری بی‌رویه از خاک، کشت و کار فشرده و فرسایش خاک می‌تواند باعث افزایش معدنی شدن ماده آلی و هدر رفت نیتروژن، کاهش باروری خاک و همچنین آلودگی آب‌های سطحی شود. همچنین، نیتروژن نیتراتی متحرک است بنابراین در اثر آبیاری می‌تواند از خاک شسته شود (Batjes, 1996). به عقیده جیا و همکاران (Guo-

### نسبت کربن به نیتروژن

اثر نوع کاربری و عمق و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۱ درصد بر نسبت کربن به نیتروژن در منطقه لعل آباد معنی‌دار شد (جدول ۱). نسبت کربن به نیتروژن در اراضی رهاسازی نسبت به اراضی کشاورزی افزایش داشته است به گونه‌ای که در اراضی رهاسازی نسبت کربن به نیتروژن به ترتیب در عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری به ترتیب ۱۲/۱ و ۷/۳ درصد بیشتر از اراضی کشاورزی بوده است (جدول ۲). همچنین اثر عمق معنی‌دار بوده و با افزایش عمق میزان این شاخص کاهش یافت (جدول ۲). داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهند که تنها اثر نوع کاربری در منطقه قلعه کهنه بر نسبت کربن به نیتروژن معنی‌دار بوده است. در اراضی رهاسازی نسبت به اراضی کشاورزی نسبت کربن به نیتروژن در حدود ۱۰/۹ درصد بیشتر بود (جدول ۲). در چالاب پایین تنها اثر نوع کاربری بر نسبت کربن به نیتروژن در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شده است (جدول ۱). نسبت کربن به نیتروژن خاک در اراضی رهاسازی نسبت به اراضی کشاورزی ۱۱/۱ درصد بیشتر بود. میانگین نسبت کربن به نیتروژن خاک در هر دو نوع کاربری تحت تأثیر عمق قرار نگرفت و در هر دو عمق تقریباً یکسان بود.

جدول ۲- مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک در هر ۳ منطقه مورد بررسی

Table 2- Comparison of the average chemical and physical properties of soil in all 3 areas

نام منطقه	نوع کاربری	Depth	pH	P	OC	TN	C/N	BD	DC	MWD
Name of location	Land use type	cm	-	(mg/kg)	(g/kg)	(g/kg)	-	(Mg/m <sup>3</sup> )	(%)	(mm)
لعل آباد	منطقه رهاسازی	0-20	7.06 b	13.3 b	35.7 a	3.21 a	11.1 a	1.53 c	5.94 d	1.83 a
	Abandoned area	20-40	7.23 a	10.8 b	17.4 b	1.69 b	10.3 b	1.61 b	9.24 c	1.23 b
Lal Abad	منطقه زراعی	0-20	7.33 a	18.7 a	18.4 b	1.85 b	9.90 c	1.68 a	13.4 a	0.84 c
	Agricultural area	20-40	7.23 a	4.31 c	14.7 b	1.54 b	9.60 c	1.64 ab	11.1 b	1.04 bc
قلعه کهنه	منطقه رهاسازی	0-20	7.36 a	24.5 a	35.0 a	3.23 a	10.8 a	1.44 d	7.95 c	1.85 a
	Abandoned area	20-40	7.20 a	12.2 b	31.6 b	3.01 ab	10.9 a	1.63 b	11.0 b	1.32 b
Qaleh Kohneh	منطقه زراعی	0-20	7.20 a	13.7 b	28.5 c	2.74 bc	9.86 b	1.71 a	18.6 a	0.89 c
	Agricultural area	20-40	7.33 a	12.8 b	22.7 d	2.47 c	9.73 b	1.55 c	11.0 b	1.24 b
چالاب پایین	منطقه رهاسازی	0-20	7.00 b	14.9 b	37.9 a	3.51 a	10.8 a	1.42 d	6.15 d	1.79 a
	Abandoned area	20-40	7.06 ab	12.7 bc	34.5 b	3.18 b	10.8 a	1.53 c	15.6 b	1.60 b
Chalab-e Pain	منطقه زراعی	0-20	7.06 ab	20.1 a	19.9 c	2.06 c	9.63 b	1.75 a	20.4 a	0.60 d
	Agricultural area	20-40	7.13 a	10.5 c	17.4 d	1.76 d	9.83 b	1.65 b	10.8 c	1.19 c

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال درصد ندارند.

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests.

شخم و خاک‌ورزی، کشت و کار فشرده، تردد مکرر ماشین‌آلات کشاورزی طی مرحله کاشت، داشت و برداشت موجب فشردگی ذرات خاک، خرد شدن خاکدانه‌ها، پراکنش خلل و فرج به وسیله ذرات خرد شده و کاهش تخلخل، تهویه و نفوذپذیری خاک شده و در نهایت موجب افزایش میزان جرم مخصوص ظاهری شده است و در اثر رهاسازی این اراضی و استقرار مجدد پوشش گیاهی و افزایش ماده آلی میزان این شاخص کاهش یافته است. توسعه پوشش گیاهی منجر به اضافه شدن مقدار زیادی از ریشه گیاهان به تحت الارض خاک شده که باعث افزایش ماده آلی، نفوذپذیری و تخلخل خاک می‌شود و در ادامه نیز باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شده است (Jiang et al., 2009; Wang et al., 2011; Nunes et al., 2012; Kamala et al., 2014).

### رس قابل انتشار در آب

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که در هر سه منطقه اثر نوع کاربری و اثر متقابل آن با عمق در سطح احتمال ۱ درصد بر میزان رس قابل انتشار معنی‌دار شده است و اثر عمق معنی‌دار نبوده و تنها اثر عمق در منطقه قلعه کهنه معنی‌دار شد (جدول ۱). در منطقه قلعه کهنه با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان رس قابل انتشار به ترتیب در عمق‌های صفر تا ۲۰ و ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری ۵۵/۷ و ۱۶/۷ درصد کاهش یافته است. همچنین در منطقه قلعه کهنه میزان رس قابل انتشار در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری ۵۷/۲ درصد کاهش داشت ولی در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری تفاوت چشمگیری مشاهده نشد (جدول ۲). در منطقه چالاب پایین میزان رس قابل انتشار در عمق اول ۶۹/۸ درصد کاهش ولی در عمق دوم ۴۴ درصد افزایش داشت (جدول ۲). با توجه به نتایج به دست آمده مشخص شده است که در هر سه منطقه مورد مطالعه، در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی درصد رس قابل انتشار در آب، در سطح خاک کاهش یافته است که این کاهش ممکن است به دلیل توسعه و استقرار مجدد پوشش گیاهی در این اراضی و افزایش میزان ماده آلی باشد زیرا عوامل ذکر شده موجب فولکوله شدن و تجمع ذرات رس شده و از پخشیدگی این ذرات جلوگیری می‌کند. همچنین، عدم شخم و تردد ماشین‌آلات کشاورزی نیز ممکن است باعث کاهش درصد رس قابل انتشار شده باشد. در منطقه چالاب پایین در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری افزایش در میزان این شاخص مشاهده شد که به احتمال زیاد در اثر آبیاری در این اراضی، کلوئیدهای رس از لایه سطحی خاک شسته شده و در لایه زیرین تجمع پیدا کرده است.

بررسی نسبت کربن به نیتروژن در هر سه منطقه مشخص کرد که رهاسازی اراضی کشاورزی بر روی این نسبت تأثیر گذاشته و باعث افزایش میزان آن گردیده است. بقایای تازه دارای نسبت کربن به نیتروژن بالایی است. در اراضی رهاسازده مورد بررسی به دلیل استقرار مجدد پوشش گیاهی و وارد شدن بقایای تازه به خاک، نسبت کربن به نیتروژن افزایش یافته است. علاوه بر این، در اراضی رهاسازده به دلیل عدم شخم و خاک‌ورزی میزان جمعیت قارچی که دارای نسبت کربن به نیتروژن بالاتری نسبت به باکتری‌ها هستند افزایش می‌یابد که می‌تواند دلیل دیگری برای افزایش نسبت کربن به نیتروژن در اراضی رهاسازده باشد (Sabiené et al., 2010) به عبارت دیگر، در اثر تبدیل اراضی کشاورزی به اراضی رهاسازده نسبت کربن به نیتروژن ماده آلی افزایش پیدا می‌کند و این افزایش را به افزایش در زیست‌توده قارچی نسبت داده‌اند که با خصوصیات غیرزنده و معدنی خاک فعل‌وانفعالات آهسته‌ای دارد و باعث افزایش در مقدار ماده آلی خاک می‌گردد (Van Der Wal et al., 2006). از طرف دیگر، در اراضی کشاورزی هر سه منطقه مصرف کودهای شیمیایی نیتروژنه و جمع‌آوری بقایای کاه و کلش از سطح اراضی به منظور مصرف دام منجر به پایین آمدن نسبت کربن به نیتروژن گردیده است چرا که نسبت کربن به نیتروژن کاه و کلش نزدیک به ۲۰ است و در صورتی که به زمین بازگردد باعث افزایش این نسبت خواهد شد.

### تأثیر تغییر کاربری اراضی و عمق بر ویژگی‌های فیزیکی

#### خاک مناطق مورد مطالعه

#### جرم مخصوص ظاهری خاک

در هر سه منطقه اثر عمق بر روی جرم مخصوص ظاهری معنی‌دار نبود؛ اما تأثیر نوع کاربری و اثر متقابل آن با عمق در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شدند (جدول ۱). در منطقه لعل آباد در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میزان جرم مخصوص ظاهری در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری ۸/۹۲ درصد کاهش یافت در حالی که در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری تفاوت چشمگیری در میزان این شاخص مشاهده نشد (جدول ۲). در منطقه کهنه قلعه، در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری میزان جرم مخصوص ظاهری ۱۵/۶ درصد کاهش داشت ولی در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری ۵/۱۶ درصد افزایش مشاهده شد (جدول ۲). در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی در منطقه چالاب پایین، جرم مخصوص ظاهری در هر دو عمق به ترتیب ۱۸/۸ و ۷/۲۷ درصد کاهش یافت (جدول ۲).

نتایج به دست آمده بیانگر این موضوع است که در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی جرم مخصوص ظاهری در هر سه منطقه کاهش یافته است. به بیان دیگر، می‌توان گفت که در اراضی کشاورزی انجام عملیات

### میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

اثرات نوع کاربری و اثر متقابل آن‌ها در هر سه منطقه بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد ولی اثر عمق در مناطق مختلف متفاوت بود (جدول ۱). در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی در هر دو منطقه لعل آباد و قلعه کهنه، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری افزایش یافت اما در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری تفاوت چشمگیری مشاهده نشده است (جدول ۲). در منطقه چالاب پایین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در هر دو عمق افزایش داشت (جدول ۲).

چنانچه نتایج نشان می‌دهد در هر سه منطقه در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش یافت که نشان دهنده تشکیل و بازسازی خاکدانه‌ها بود. به احتمال زیاد، استقرار مجدد پوشش گیاهی و توسعه ریشه آن‌ها و مواد ترشحي حاصل از ریشه موجب تحریک جامعه میکروبی شده و با توسعه جمعیت ریزجانداران، ترشحات مواد موکولپی ساکاریدی و صمغ میکروبی نیز افزایش یافته که همگی سبب تشکیل خاکدانه‌هایی بزرگ‌تر با درجه پایداری بیشتر گردیده است. همچنین، مواد آلی حاصل از بقایای این پوشش گیاهی و نیز توسعه شبکه قارچی یکی دیگر از عوامل مهم تشکیل و رشد خاکدانه‌های درشت بود. از طرف دیگر، با توجه به این‌که در اراضی رهاشده عملیات خاک‌ورزی صورت نمی‌پذیرد و همچنین عدم تردد ماشین‌آلات کشاورزی، به هم خوردگی و شکستگی خاکدانه‌ها وجود نداشت. همچنین، به دلیل بهتر شدن وضعیت سطحی خاک در اراضی رهاشده میزان این شاخص در سطح بیشتر از عمق خاک بود. مارتینز-فرناندرز و همکاران (Martinez-Fernandez et al., 1995) نیز نتیجه گرفتند که رهاسازی اراضی کشاورزی در طول یک دوره ۱۰ ساله اثرات مثبتی بر روی خصوصیات خاک گذاشته و خصوصیات خاک به حالت قبل از کشت و کار نزدیک شده است. رهاسازی این مناطق باعث بهبود پارامترهایی همچون خاکدانه سازی و پایداری ساختمان خاک می‌شود؛ به عبارت دیگر، رهاسازی اراضی کشاورزی موجب می‌گردد که این اراضی به حالت علفزاری خود نزدیک شوند و به دلیل افزایش میزان ماده آلی در این اراضی میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند، زیرا ماده آلی موجب پیوند بین ذرات خاک می‌گردد (Li and Shao, 2006).

### تأثیر تغییر کاربری اراضی و عمق بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک مناطق مورد مطالعه

#### تنفس میکروبی

اثرات نوع کاربری و عمق در منطقه لعل آباد در سطح احتمال ۱ درصد بر روی تنفس میکروبی معنی‌دار بود اما اثر متقابل آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول ۳). با این وجود، در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میزان

تنفس میکروبی در عمق صفر تا ۲۰ سانتی‌متری ۴۲/۵ درصد افزایش و در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری ۵۶ درصد افزایش داشته است. به‌طور کلی می‌توان به این نتیجه رسید که تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به رهاشده موجب افزایش تنفس میکروبی خاک شده است. همچنین، این نسبت به‌طور معنی‌دار با افزایش عمق کاهش یافت (جدول ۴). اثرات نوع کاربری و عمق در منطقه قلعه کهنه در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح احتمال ۵ درصد بر روی تنفس میکروبی معنی‌دار شد (جدول ۳). با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان تنفس میکروبی در عمق‌های اول و دوم به ترتیب ۱۹ و ۳۲/۹ درصد افزایش یافت. همچنین، اثر عمق معنی‌دار بود و با افزایش عمق از میزان این شاخص کاسته شد (جدول ۴). در منطقه چالاب پایین در سطح احتمال ۱ درصد اثر نوع کاربری و عمق و در سطح احتمال ۵ درصد اثر متقابل آن‌ها بر روی تنفس میکروبی معنی‌دار بود (جدول ۳). در اثر تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به رهاشده میزان تنفس میکروبی خاک در هر دو عمق به ترتیب ۴۰/۲ و ۴۱/۹ درصد افزایش یافت. در این منطقه نیز با افزایش عمق از میزان تنفس میکروبی کاسته شد (جدول ۴).

با بررسی نتایج به دست آمده مشخص شد که در هر سه منطقه در اثر رهاسازی اراضی کشاورزی میزان تنفس میکروبی یا به عبارتی معدنی شدن کربن افزایش یافت. بالا بودن تنفس میکروبی در اراضی رهاشده به احتمال زیاد به کربن آلی بیشتر در این خاک‌ها مرتبط است. هدر رفت ماده آلی خاک بر اثر کشت و کار و مدیریت نامناسب خاک اغلب عامل اصلی کاهش تنفس خاک در اراضی کشاورزی نسبت به اراضی رهاشده است. همچنین، اراضی رهاشده دارای جمعیت‌های میکروبی یا وزن زیست‌توده میکروبی بالاتری نسبت به اراضی کشاورزی هستند که مقدار ماده آلی بیشتری را در زمان مشخص تجزیه نموده و تنفس بالاتری را عرضه می‌کنند. از سوی دیگر، نتایج این تحقیق نشان داد که به احتمال زیاد، کشت و کار طولانی‌مدت در اراضی کشاورزی سبب تغییر شدیدی در بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی خاک گردید که از آن جمله می‌توان به افزایش غلظت فلز سنگین کادمیم اشاره نمود. غلظت بالای این فلزات، احتمالاً بر فعالیت ریزجانداران خاک اثر بازدارنده داشته و میزان فعالیت تنفسی آن‌ها را محدود می‌سازد. همچنین در اراضی کشاورزی، لایه سطحی خاک همواره در معرض آشفستگی و مخلوط شدن بر اثر شخم قرار دارد که این عمل علاوه بر فشرده کردن خاک موجب شکسته شدن خاکدانه‌های درشت و از بین رفتن خلل و فرج درشت خاک و متعاقب آن کاهش تهویه خاک می‌شود. یکی از مهم‌ترین پیامدهای کاهش تهویه در اراضی کشاورزی، کاهش فراهمی اکسیژن و ایجاد ریز مکان‌های بی‌هوایی برای ریزجانداران خاک و در نتیجه کاهش فعالیت‌های زیستی آن‌ها، مانند تنفس هوایی می‌باشد. کاهش غلظت نیترژن بر اثر کشت هم می‌تواند دلیل کاهش تنفس میکروبی باشد. افزایش رس قابل انتشار بر

و با افزایش عمق کربن زیست‌توده میکروبی کاهش پیدا کرد (جدول ۴).

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که رها سازی اراضی کشاورزی در هر سه منطقه منجر به افزایش کربن زیست‌توده میکروبی خاک شده است. نظر به این که در حدود ۱ تا ۵ درصد از کل کربن آلی موجود در خاک مربوط به بخش میکروبی خاک است بنابراین می‌توان گفت که با افزایش کربن آلی میزان کربن زیست‌توده میکروبی نیز افزایش یافته است. بزرگی مقدار کربن آلی خاک باعث رشد قابل توجه در جامعه میکروبی می‌شود و بنابراین منجر به بزرگی زیست‌توده میکروبی خواهد شد (Guo-Mei *et al.*, 2010).

اثر کشت هم می‌تواند دلیل دیگری برای کاهش تنفس میکروبی باشد زیرا تهویه کاهش می‌یابد. جیانگ و همکاران (Jiang *et al.*, 2009) نیز نتیجه گرفتند که در اراضی رها شده نسبت به اراضی کشاورزی به علت وجود پوشش گیاهی گسترده میزان تنفس بیشتری وجود دارد که همواره با افزایش عمق از میزان آن کاسته می‌شود.

### کربن زیست‌توده میکروبی

اثر نوع کاربری و عمق و اثر متقابل آن‌ها بر کربن زیست‌توده میکروبی در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار گردید و تنها اثر متقابل کاربری و عمق در منطقه قلعه کهنه معنی‌دار نبود (جدول ۳). در اثر رها سازی اراضی کشاورزی میزان کربن زیست‌توده میکروبی افزایش یافت

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک  
Table 3- The analysis of variance of data on biological properties of soil

نام منطقه Name of location	Sources of variance	df	میانگین مربعات Mean square		
			Cmin	MBC	qCO <sub>2</sub>
لعل آباد Lal Abad	نوع کاربری Land use type	1	261**	101**	14.1**
	عمق Depth	1	208**	122**	29**
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	1.04 <sup>ns</sup>	49.8**	2.63 <sup>ns</sup>
	خطای آزمایشی error	24	0.98	0.97	0.85
	CV%	-	4.14	13.3	17.2
قلعه کهنه Qaleh Kohneh	نوع کاربری Land use type	1	137**	129**	42**
	عمق Depth	1	503**	23.4**	2.90 <sup>ns</sup>
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	5.78*	1.32 <sup>ns</sup>	1.09 <sup>ns</sup>
	خطای آزمایشی error	24	0.99	0.95	0.85
	CV%	-	2.47	10.4	17
چالاب پایین Chalab-e Pain	نوع کاربری Land use type	1	968**	1218**	40**
	عمق Depth	1	306**	114**	4.34 <sup>ns</sup>
	نوع کاربری × عمق Depth × Land use type	1	6.08*	22.1**	0.01 <sup>ns</sup>
	خطای آزمایشی error	24	0.99	0.99	0.85
	CV%	-	1.89	5.20	13

\*\* 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.

جدول ۴- مقایسه میانگین ویژگی‌های بیولوژیکی خاک در هر ۳ منطقه مورد بررسی  
Table 4- Comparison of the average biological properties of soil in all 3 areas

نام منطقه Name of location	نوع کاربری Land use type	Depth cm	Cmin (mg/kg)	MBC (mg/kg)	qCO <sub>2</sub> µgC/gMBC.day
لعل آباد Lal Abad	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	1063 a	0.8 a	69.9 c
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	778 b	0.26 bc	174 ab
قلعه کهنه Qaleh Kohneh	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	746 b	0.29 b	150 b
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	499 c	0.17 c	206 a
چالاب پایین Chalab-e Pain	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	1243 a	0.74 a	82.8 b
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	893 c	0.56 b	91.0 b
	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	1044 b	0.37 c	150 a
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	672 d	0.26 d	185 a
	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	1250 a	0.97 a	85.8 b
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	1036 b	0.72 b	104 b
	منطقه رهاشده Abandoned area	0-20	891 c	0.31 c	144 a
	منطقه زراعی Agricultural area	20-40	730 d	0.21 d	165 a

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال درصد ندارند.

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests.

یافت و در منطقه چالاب پایین، با تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به رهاشده میزان ضریب متابولیسی در کل ۳۸/۵ درصد کاهش یافت (جدول ۴).

نتایج بررسی تغییرات ضریب متابولیسی نشان داد که در همه مناطق مورد بررسی به‌طور معنی‌دار میزان ضریب متابولیسی در اراضی کشاورزی بیشتر از اراضی رهاشده بود. این افزایش با توجه به سایر نتایج به دست آمده در این تحقیق قابل پیش‌بینی بود، چرا که اراضی کشاورزی نسبت به رهاشده در اکثر مناطق دارای ویژگی‌های کیفی پایین‌تری هستند که نشان از وجود شرایط تنش برای ریز جانداران خاک است. همچنین مصرف سموم و کودهای شیمیایی در خاک‌های تحت کشت احتمالاً سبب افزایش غلظت آلاینده‌ها و فلزات سنگین نظیر کادمیم شده که این نیز تنش را تشدید می‌کند. علاوه بر این، در اراضی کشاورزی با تغییر مقدار و کیفیت بقایای آلی وارد شده به خاک، تغییر و کاهش جمعیت و فعالیت میکروبی و نیز آشفستگی شرایط پایدار خاک بر اثر عملیات خاک‌ورزی و تردد ماشین‌آلات خاک‌ورزی سبب افزایش این ویژگی گردیده است. مقادیر بالاتر ضریب متابولیسی در خاک‌های کشت شده در مقایسه با خاک‌های رهاشده نشان می‌دهد که زیست‌توده میکروبی در خاک‌های کشت شده به ازای هر واحد کربن آلی خود مقدار بیشتری از آن را تنفس و یا معدنی نموده و به گاز کربنیک تبدیل می‌کند و مقدار کمتری از آن صرف رشد و تکثیر و تشکیل زیست‌توده میکروبی می‌نماید. به بیان دیگر، قسمت اعظم کربن سوبسترا برای تأمین انرژی مورد نیاز سلول دچار متابولیسم شده و کمتر به زیست‌توده میکروبی تبدیل می‌گردد. این تغییرات در درصد کربن معدنی شده نیز دیده می‌شود و این دو پارامتر یکدیگر را تأیید می‌کنند. از سوی دیگر، تجزیه بیشتر کربن آلی خاک‌های کشت شده احتمالاً به

استقرار مجدد پوشش گیاهی موجب افزایش کربن آلی خاک می‌شود. همچنین، پوشش گیاهی ایجاد شده در سطح اراضی رها شده باعث تنظیم رژیم حرارتی سطح خاک می‌گردد و در نتیجه از طریق کاهش استرس دمایی، خشکی خاک و به هم خوردگی‌های سطح خاک باعث رشد و فعالیت بیشتر میکروبی می‌گردد (Jiang et al., 2009). از طرف دیگر، اراضی کشاورزی رهاشده نسبت به اراضی قابل کشت دارای بیشترین نسبت قارچ هستند. جامعه قارچی نقش بزرگی در تجزیه ماده آلی تازه در خاک دارند. در اراضی کشاورزی رهاشده نسبت به اراضی قابل کشت پوشش گیاهی بیشتری وجود دارد. بنابراین، در آنجا یک مشارکت بین افزایش لاشبرگ به خاک و متعاقب آن توسعه جامعه قارچی وجود دارد. از آنجا که قارچ‌ها نسبت به باکتری‌ها دارای زیست‌توده بیشتری هستند، در نتیجه باعث افزایش کربن زیست‌توده میکروبی در اراضی رهاشده، شده‌اند (Zhao et al., 2014). وانگ و همکاران (Wang et al., 2011) نیز نتیجه گرفتند که استقرار مجدد پوشش گیاهی موجب بالا رفتن میزان کربن زیست‌توده میکروبی می‌شود که با نتایج این مطالعه مطابقت دارد.

### ضریب متابولیسی

بر اساس جدول ۳ مشخص شد که اثر متقابل نوع کاربری و عمق بر ضریب متابولیسی در هر سه منطقه معنی‌دار نبود و اثر عمق و کاربری در مناطق مختلف متفاوت بود. در منطقه لعل آباد، در اثر تغییر کاربری اراضی از کشاورزی به رهاشده میزان ضریب متابولیسی در حدود ۳۱/۵ درصد کاهش یافت. با معنی‌دار شدن اثر عمق میزان این شاخص با افزایش عمق افزایش یافت (جدول ۴). در منطقه قلعه کهنه، با رهاسازی اراضی کشاورزی میزان ضریب متابولیسی در حدود ۴۸/۲ درصد کاهش

### نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی در کل می‌توان چنین نتیجه گرفت که در اکثر موارد، رها سازی اراضی کشاورزی موجب بهبود این خصوصیات می‌گردد اما میزان و شدت آن‌ها در مناطق مورد بررسی تفاوت‌هایی داشت که ممکن است به دلیل تفاوت در نوع پوشش گیاهی منطقه، ویژگی‌های اولیه خاک، مدت‌زمان رها سازی اراضی کشاورزی و نهایتاً ماهیت پارامتر اندازه‌گیری شده، باشد.

دلیل نسبت کربن به نیتروژن پایین‌تر آن‌ها می‌باشد که فرآیند تجزیه آن‌ها را تسریع می‌کند. مصرف کودهای شیمیایی نیتروژن دار در خاک‌های زراعی به کاهش نسبت کربن به نیتروژن خاک‌های زراعی کمک نموده و این فرآیند معدنی شدن مواد آلی آن‌ها را تسریع می‌کند (Černý *et al.*, 2003). جیانگ و همکاران (Jiang *et al.*, 2009) نیز نشان دادند که در اثر فعالیتهای کشاورزی طولانی مدت میزان ضریب متابولیکی در اراضی کشاورزی بیشتر از اراضی بکر است.

### منابع

- Anderson, D.W. (1988). The effect of parent material and soil development on nutrient cycling in temperate ecosystems. *Biogeochemistry*, 5, 71-97. <https://doi.org/10.1007/BF02180318>
- Batjes N.H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163. [https://doi.org/10.1111/ejss.12114\\_1](https://doi.org/10.1111/ejss.12114_1)
- Baur, B., Cremene, C., Groza, G., Rakosy, L., Schileyko, A.A., Baur, A., & Erhardt, A. (2006). Effects of abandonment of subalpine hay meadows on plant and invertebrate diversity in Transylvania, Romania. *Biological Conservation*, 132(2), 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.04.018>
- Rey Benayas, J.M., Martins, A., Nicolau, J.M., & Schulz, J.J. (2007). Abandonment of agricultural land: an overview of drivers and consequences. *CABI Reviews*, 14-pp. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20072057>
- Bonet, A. (2004). Secondary succession of semi-arid Mediterranean old-fields in south-eastern Spain: insights for conservation and restoration of degraded lands. *Journal of Arid Environments*, 56(2), 213-233. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00048-X)
- Černý, J., Balík, J., Pavlíková, D., Zitková, M., & Sýkora, K. (2003). The influence of organic and mineral nitrogen fertilizers on microbial biomass nitrogen and extractable organic nitrogen in long-term experiments with maize. *Plant Soil Environ*, 49(12), 560-564.
- Christensen, B.T., & Johnston, A.E. (1997). Soil organic matter and soil quality—lessons learned from long-term experiments at Askov and Rothamsted. In *Developments in Soil Science*, 25, 399-430. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(97\)80045-1](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(97)80045-1)
- Cuesta, B., Benayas, J.R., Gallardo, A., Villar-Salvador, P., & González-Espinosa, M. (2012). Soil chemical properties in abandoned Mediterranean cropland after succession and oak reforestation. *Acta Oecologica*, 38, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2011.09.004>
- Du, F., Zongsuo, L., Xuexuan, X., Lun, S., & Xingchang, Z. (2007). Community biomass of abandoned farmland and its effects on soil nutrition in the Loess hilly region of Northern Shaanxi, China. *Acta Ecologica Sinica*, 27(5), 1673-1683. (In Chinese with English abstract). [https://doi.org/10.1016/S1872-2032\(07\)60038-9](https://doi.org/10.1016/S1872-2032(07)60038-9)
- Dunjó, G., Pardini, G., & Gispert, M. (2003). Land use change effects on abandoned terraced soils in a Mediterranean catchment, NE Spain. *Catena*, 52(1), 23-37. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00148-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00148-0)
- Estefan, G. (2013). Methods of soil, plant, and water analysis: a manual for the West Asia and North Africa region. p. 243. <https://hdl.handle.net/20.500.11766/7512>
- Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). Particle- size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 383-411.
- Gelt, J. (1993). Abandoned farmland often is troubled land in need of restoration. <https://wrrc.arizona.edu/publications/arroyo-newsletter/abandoned-farmland-often-troubled-land-need-restoration>
- Gruba, P., & Socha, J. (2016). Effect of parent material on soil acidity and carbon content in soils under silver fir (*Abies alba* Mill.) stands in Poland. *Catena*, 140, 90-95. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.020>
- Guo-Mei, J.I.A., Zhang, P.D., Gang, W.A.N.G., Jing, C.A.O., Jing-Cheng, H.A.N., & Huang, Y.P. (2010). Relationship between microbial community and soil properties during natural succession of abandoned agricultural land. *Pedosphere*, 20(3), 352-360. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60024-0](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60024-0)
- Inoue, T. (2005). Causes of butterfly decline in Japan. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 8, 43-64.
- Jiang, J.P., Xiong, Y.C., Jiang, H.M., De-You, Y.E., Ya-Jie, S.O.N.G., & Feng-Min, L.I. (2009). Soil microbial activity during secondary vegetation succession in semiarid abandoned lands of Loess Plateau. *Pedosphere*, 19(6), 735-747. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(09\)60169-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(09)60169-7)

18. Kamala, H., & Sunada, S. (2014). Microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics along a chronosequence of abandoned tropical agroecosystems. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(9), 956-970. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143350342>
19. Kardol, P., Bezemer, T.M., van der Wal, A., & Van der Putten, W.H. (2005). Successional trajectories of soil nematode and plant communities in a chronosequence of ex-arable lands. *Biological Conservation*, 126(3), 317-327. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.06.005>
20. Khiddir, S.M. (1986). *A statistical approach in the use of parametric systems applied to the FAO framework for land evaluation* (Doctoral dissertation, Ghent University). <https://biblio.ugent.be/publication/8540966>
21. Kosmas, C., Gerontidis, S., & Marathianou, M. (2000). The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesvos (Greece). *Catena*, 40(1), 51-68. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00064-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00064-8)
22. Laiolo, P., Dondero, F., Ciliento, E., & Rolando, A. (2004). Consequences of pastoral abandonment for the structure and diversity of the alpine avifauna. *Journal of Applied Ecology*, 41(2), 294-304. <https://doi.org/10.1111/j.0021-8901.2004.00893.x>
23. Lee, C.S., You, Y.H., & Robinson, G.R. (2002). Secondary succession and natural habitat restoration in abandoned rice fields of central Korea. *Restoration Ecology*, 10(2), 306-314. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.2002.00003.x>
24. Lesschen, J.P., Cammeraat, L.H., Kooijman, A.M., & van Wesemael, B. (2008). Development of spatial heterogeneity in vegetation and soil properties after land abandonment in a semi-arid ecosystem. *Journal of Arid Environments*, 72(11), 2082-2092. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.06.006>
25. Li, Y.Y., & Shao, M.A. (2006). Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 64(1), 77-96. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.04.005>
26. Martinez-Fernandez, J., Lopez-Bermudez, F., Martinez-Fernandez, J., & Romero-Diaz, A. (1995). Land use and soil-vegetation relationships in a Mediterranean ecosystem: El Ardal, Murcia, Spain. *Catena*, 25(1-4), 153-167. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00007-F](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00007-F)
27. Nannipieri P., & Alef, K. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Netherlands: Elsevier Science.
28. Nunes, A., Figueiredo, A., & Almeida, A. (2012). The effects of farmland abandonment and plant succession on soil properties and erosion processes: a study case in centre of Portugal. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 2, 165-190. <http://dx.doi.org/10.17127/got/2012.2.008>
29. Sabienè, N., Kušlienė, G., & Zaleckas, E. (2010). The influence of land use on soil organic carbon and nitrogen content and redox potential. *Žemdirbystė= Agriculture*, 97(3), 15-24.
30. Storie, R.E. (1976). Storie index soil rating (revised). Special publication division of agricultural science. *University of California, Berkeley*, 3032, 1-4. <http://anrcatalog.ucanr.edu/pdf/3203.pdf>
31. van der Wal, A., van Veen, J.A., Smant, W., Boschker, H.T., Bloem, J., Kardol, P., & de Boer, W. (2006). Fungal biomass development in a chronosequence of land abandonment. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(1), 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.04.017>
32. Walkley A., & Black I.A. (1974). An examination of the digestion method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science*, 63, 251-263.
33. Wang, B., Liu, G.B., Xue, S., & Zhu, B. (2011). Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 62, 915-925. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0577-4>
34. Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. <http://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>
35. Zhang, J., Song, C., & Wenyan, Y. (2007). Tillage effects on soil carbon fractions in the Sanjiang Plain, Northeast China. *Soil and tillage Research*, 93(1), 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.014>
36. Zhang, K., Dang, H., Tan, S., Wang, Z., & Zhang, Q. (2010). Vegetation community and soil characteristics of abandoned agricultural land and pine plantation in the Qinling Mountains, China. *Forest Ecology and Management*, 259(10), 2036-2047. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.02.014>
37. Zhang, L., Zhongkui, X., Rui Feng, Z., & YaJun, W.A.N.G. (2012). The impact of land use change on soil organic carbon and labile organic carbon stocks in the Longzhong region of Loess Plateau. *Journal of Arid Land*, 4(3), 241-250. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1227.2012.00241>
38. Zhao, F.Z., Han, X.H., Yang, G.H., Feng, Y.Z., & Ren, G.X. (2014). Soil structure and carbon distribution in subsoil affected by vegetation restoration. *Plant, Soil and Environment*, 60(1), 21-26.



## The Relationship between the Slope Hill and Bedrock with Some Soil Properties

M. Jafarian<sup>1</sup>, A. Golkarian<sup>2\*</sup>, H. Emami<sup>3</sup>

Received: 20-10-2022

Revised: 24-01-2023

Accepted: 06-03-2023

Available Online: 06-03-2023

### How to cite this article:

Jafarian, M., Golkarian, A., & Emami, H. (2023). The relationship between the slope hill and bedrock with some soil properties. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 415-430. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79280.1214>

### Introduction

Changes in soil properties depend on factors such as climate, topography, landscape features, altitude, parent material, and vegetation. The quantity and quality of soils obtained from different rocks (igneous, sedimentary and metamorphic rocks) depend on the minerals that make up the rock, as well as weather and other factors. Soil parent material is one of the primary and important issues in soil classification in terms of physical quality and also one of the most important effective factors in soil erodibility. The topographical factor of each region is one of the important and influential features on the soil quality of that region. The present research was conducted with the aim of understanding the spatial changes of soil properties in different slopes and different types of rocks.

### Material and Methods

The studied area is located in Razavi Khorasan province in the cities of Mashhad, Chenaran, Sarakhs and Torbat-Haidarieh. The geographic location of the region ranges from 58 degrees and 52 minutes to 60 degrees and 40 minutes east longitude and 35 degrees and 38 minutes to 36 degrees and 25 minutes north latitude. This research was carried out on seven types of rocks: granite, Sarakhs paleogene limestone, Chenaran jurassic limestone, marl, shale, sandstone and ophiolite from relatively pure rocks of Razavi Khorasan province. In the present study, two factors of rock type and slope were investigated as effective factors of soil properties. Soil samples were taken from the surface layer (0-20 cm) and from three slope classes i.e., less than 10%, 10-25% and more than 25%, as well as all soil samples from the southern slopes. Three soil samples were taken from each slope and a total of 63 samples were taken and the samples were transferred to the laboratory for physical and chemical tests. In this study, the soil particle size distribution (texture) was measured by hydrometer method, organic carbon and calcium carbonate were determined by wet oxidation and titration with HCl 6 M, the mean weight diameter of soil aggregates and surface crust factor were calculated by related equations. To measure soil cohesion and penetration resistance were used pocket vane test and pocket penetrometer, respectively. Comparison of means was done through Duncan test in spss software.

### Results and Discussion

The results showed that all the studied variables in different types of stones had a significant difference at the level of 1%. There was no significant difference in the variable of surface level in different slopes. Also, the variables of calcium carbonate percentage and saturated conductivity at 5% level had significant differences in different slopes. Other characteristics of soil, including percentage of organic matter, the mean weight diameter of soil aggregates, the number of drops impact, and soil cohesion and penetration resistance in different slopes had a significant difference at the level of 1%. Although the soil texture class was not significantly different in different slopes, the percentage changes of clay, silt and sand had a lot of difference along the slope. The highest and lowest parameters of organic matter percentage, Soil cohesion and penetration resistance were observed in granite and

1 and 2- Former M.Sc. Student and Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [Golkarian@um.ac.ir](mailto:Golkarian@um.ac.ir))

3- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran  
DOI: [10.22067/jsw.2023.79280.1214](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79280.1214)

shale, respectively. The highest percentage of calcium carbonate was observed in Chenaran limestone (40.41%) and the lowest in granite (14.72 %). The mean weight diameter of soil aggregates was the highest in ophiolite (1.005 mm) and the lowest in marl (0.403 mm). The mean weight diameter of soil aggregates in the medium slope was significantly higher than the other two slopes. The parameter of the number of drops impact was the highest in granite (47.14 number) and the lowest in marl (27.70 number). The highest value of saturated conductivity variable was observed in marl rock and the lowest value was observed in Chenaran limestone.

## Conclusion

The results showed that all the investigated variables had significant differences in different types of stones. Also, some of the investigated variables such as percentage of organic matter, percentage of equivalent calcium carbonate and the mean weight diameter of soil aggregates had significant changes along the hillside. As a general conclusion, given that the physical and chemical properties of the soil are partly under the influence of the parent material and the slope, and also with the presence of good geological information in the country, it can be suggested to provide suitable management solutions to prevent soil erosion and degradation by comprehensive examination of soil properties under different slope and types of stones.

**Keywords:** Petrology, Slope hill, Soil properties

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص ۴۳۰-۴۱۵

## رابطه بین شیب دامنه و سنگ بستر با برخی از ویژگی‌های خاک

مهدی جعفریان<sup>۱</sup> - علی گلکاریان<sup>۲\*</sup> - حجت امامی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

### چکیده

ماده مادری و توپوگرافی از ویژگی‌های مهم و تاثیرگذار بر کیفیت خاک در هر منطقه می‌باشند. خاک‌های حاصل از جنس سنگ‌های مختلف دارای خصوصیات مختلفی هستند که این تفاوت‌ها در کیفیت خاک و فرسایش‌پذیری آن تأثیر مستقیم دارد. هدف از این پژوهش بررسی رابطه بین درصد شیب و جنس سنگ با برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از قبیل درصد ماده آلی، درصد کربنات کلسیم، بافت خاک، مقاومت فروری خاک، چسبندگی خاک، هدایت اشباع، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تعداد موثر قطره و سله سطحی در هفت جنس سنگ (گرانیت، آهک پالئوژن، آهک ژوراسیک، افیولیت، شیل، مارن و ماسه سنگ) در استان خراسان رضوی می‌باشد. نمونه‌های خاک از عمق ۲۰-۳۰ سانتی‌متری و از سه کلاس شیب کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰-۲۵ درصد و بیشتر از ۲۵ درصد با سه تکرار در هر شیب برداشت شد. نتایج نشان داد تمام متغیرهای مورد بررسی در جنس سنگ‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشند ( $p < 0.001$ ). تنها متغیر سله سطحی در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری نمی‌باشد ( $\text{sig} = 0.142, p < 0.05$ ). متغیرهای درصد کربنات کلسیم و هدایت اشباع در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشند ( $\text{sig} = 0.009, p < 0.05$ ،  $\text{sig} = 0.030$ ). سایر خصوصیات خاک نیز شامل درصد ماده آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها، تعداد موثر قطره، مقاومت نفوذ خاک و چسبندگی خاک در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد هستند ( $p < 0.001$ ). با توجه به اینکه کلاس بافت خاک در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری نبود ولی درصد رس، سیلت و شن در طول شیب تغییرات زیادی داشت به طوری که با افزایش شیب درصد ذرات درشت‌تر افزایش یافته و از درصد ذرات ریز کاسته می‌شود. بیشترین و کمترین مقدار پارامترهای درصد ماده آلی، چسبندگی خاک و مقاومت نفوذ خاک به ترتیب در جنس سنگ گرانیت و شیل مشاهده شد. بیشترین درصد کربنات کلسیم در جنس سنگ آهک چناران (۴۰/۴۱ درصد) و کمترین مقدار آن در جنس سنگ گرانیت (۱۴/۷۲ درصد) مشاهده شد. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جنس سنگ افیولیت دارای بیشترین مقدار (۱/۰۰۵ میلی‌متر) و در جنس سنگ مارن دارای کمترین مقدار (۰/۴۰۳ میلی‌متر) بود. میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب ۱۰-۲۵ درصد به طور معنی‌داری بیشتر از دو شیب دیگر بود. پارامتر تعداد موثر قطره در جنس سنگ گرانیت دارای بیشترین مقدار و در جنس سنگ مارن دارای کمترین مقدار می‌باشد. مقدار بیشینه متغیر هدایت اشباع در جنس سنگ مارن و کمینه آن در جنس سنگ آهک چناران مشاهده شد. به طور کلی با توجه به تغییرات قابل ملاحظه ویژگی‌های خاک در طول شیب دامنه و جنس سنگ‌های مختلف انتظار می‌رود هدررفت خاک نیز دارای تفاوت مشخصی باشد و راهکارهای مقابله با آن باید اتخاذ شود.

**واژه‌های کلیدی:** جنس سنگ، شیب دامنه، ویژگی‌های خاک

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبخیزداری و دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

\*- نویسنده مسئول: (Email: [Golkarian@um.ac.ir](mailto:Golkarian@um.ac.ir))

۳- استاد گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

## مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در شهرستان‌های مشهد، چناران، سرخس و تربت‌حیدریه واقع شده‌است. محدوده موقعیت جغرافیایی منطقه از ۵۸ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۴۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه عرض شمالی می‌باشد (شکل ۱).

این پژوهش در هفت جنس سنگ گرانیت، آهک پالئوژن سرخس، آهک ژوراسیک چناران، مارن، شیل، ماسه سنگ و افیولیت از جنس سنگ‌های نسبتاً خالص استان خراسان رضوی انجام شد. در مطالعه حاضر دو عامل جنس سنگ و شیب به‌عنوان عوامل موثر خصوصیات خاک مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های خاک از لایه سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متری) و بر اساس طبقه بندی تانگ (Tang, 2004) از سه کلاس شیب کمتر از ۱۰ درصد، ۱۰-۲۵ درصد و بیشتر از ۲۵ درصد و از دامنه‌های جنوبی برداشت شد.

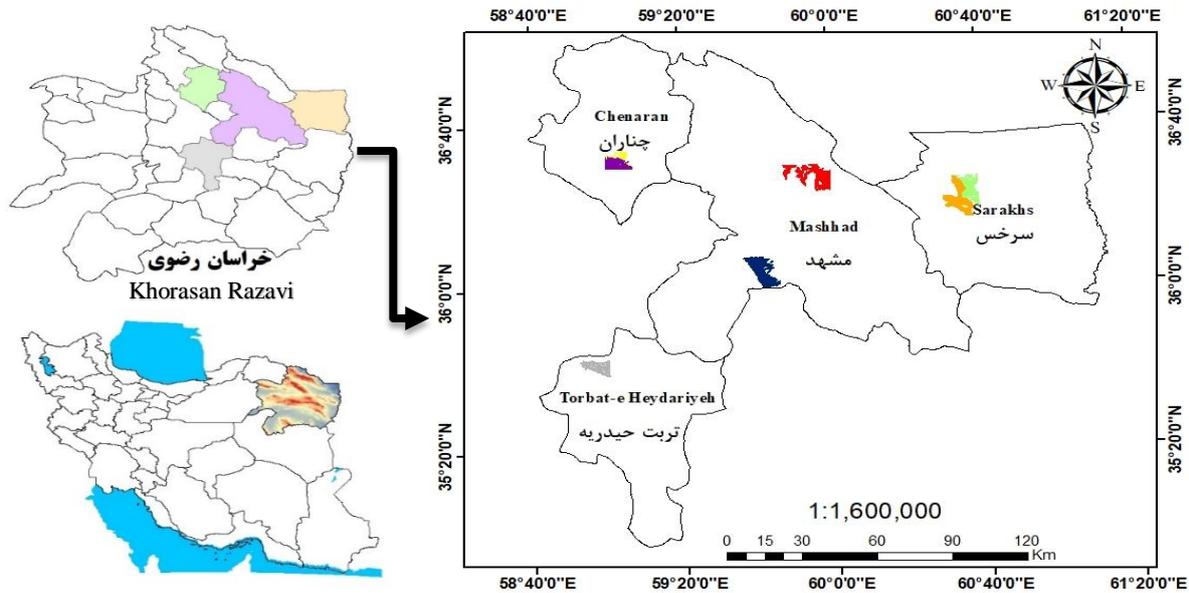
از هر شیب ۳ نمونه خاک و در مجموع ۶۳ نمونه برداشت شد و نمونه‌ها برای انجام آزمایشات فیزیکی و شیمیایی به آزمایشگاه منتقل شد. در این پژوهش از روش هیدرومتر برای اندازه‌گیری بافت خاک استفاده شد (Bouyoucos, 1962). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها از روش الک تر بر اساس روش کمپر و روزنا (Kemper and Rosenau, 1986) با استفاده از الک‌های ۴، ۲، ۱، ۰/۵، ۰/۲۵۰، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۶۳ میلی‌متر با استفاده از معادله (۱) به‌دست آمد.

$$MWD = \sum_{i=1}^n (X_i W_i) \quad (1)$$

که در آن  $X_i$  میانگین قطر خاکدانه‌های باقی مانده روی هر الک (میانگین قطر منافذ دو الک متوالی) و  $W_i$  نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌های بکاربرده شده در اول آزمایش (۵۰۰ گرم) پس از کسر ذرات شن و سنگریزه می‌باشد. برای به‌دست آوردن پارامتر تعداد موثر قطره<sup>۱</sup> تعداد ۶۰ خاکدانه بین الک ۴/۸ و ۴ میلی‌متر را روی الک ۲ میلی‌متر قرار داده و تعداد قطره لازم برای (۵۰ قطره در دقیقه، قطر ۵ میلی‌متر و از ارتفاع ۱ متر) از بین بردن کامل خاکدانه‌ها به‌عنوان تعداد موثر قطره در نظر گرفته شد (Lui et al, 2003). برای به‌دست آوردن پارامتر چسبندگی خاک<sup>۲</sup> و مقاومت نفوذ خاک<sup>۳</sup> به ترتیب از دستگاه‌های پره‌ای جیبی<sup>۴</sup> و نفوذسنج جیبی<sup>۵</sup> استفاده شد (Lui et al, 2003). این کار در منطقه برداشت و در زمین‌هایی با ابعاد ۱×۱ متر که تا ظاهر شدن جریان آب بوسیله آب‌پاش باغبانی مرطوب می‌شود، انجام شد. اندازه‌گیری ماده آلی به روش اکسیداسیون تر و در مجاورت دی کرومات پتاسیم انجام شد (Black and Walkley, 1986).

تغییرات مکانی خصوصیات خاک تابع عواملی از قبیل اقلیم، توپوگرافی، خصوصیات زمین‌نما، ارتفاع، ماده مادری و پوشش گیاهی می‌باشد. کمیت و کیفیت خاک‌های حاصل از سنگ‌های مختلف (سنگ‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی) به کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ و نیز آب و هوا و عوامل دیگری بستگی دارد. مواد مادری خاک یکی از مسائل اولیه و مهم در طبقه‌بندی خاک از نظر کیفیت فیزیکی و از مهمترین عوامل موثر در فرسایش‌پذیری خاک می‌باشد. عامل توپوگرافی هر منطقه، یکی از ویژگی‌های مهم و تاثیرگذار بر کیفیت خاک آن منطقه می‌باشد (Pajand et al., 2016). پستی و بلندی‌های محلی به طور قابل توجهی بر میزان هوازدگی سنگ‌ها و در نتیجه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن تاثیرگذار است. نتایج پژوهش‌های زیادی تاثیر ماده مادری و توپوگرافی را در خصوصیات خاک تایید می‌کند. تازیکه و همکاران (Tazikeh et al., 2018) نشان دادند که ماده مادری یکی از عوامل مهم تشکیل‌دهنده نوع خاک با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوت می‌باشد. نتایج پژوهش ملکی و همکاران (Maleki et al., 2013) نشان داد قسمت‌های پایین شیب دارای بیشترین مقدار رس، کربن آلی، پایداری خاکدانه‌ها و کمترین مقدار کربنات کلسیم معادل می‌باشند. بافت خاک اساسی‌ترین خصوصیت خاک است که منعکس‌کننده شماری از خصوصیات خاک نظیر نفوذپذیری، ظرفیت تبادل کاتیونی، ظرفیت نگهداشت آب و ماده آلی می‌باشد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2018) در پژوهش خود بیان کردند بافت خاک به طور غیرمستقیم با تعدیل ویژگی‌های خاک بر نفوذپذیری خاک تاثیر می‌گذارد. با از بین رفتن ساختار خاک و از هم گسیختگی خاک، ماده آلی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که اهمیت بافت خاک را در حفظ ماده آلی نشان می‌دهد (Lupi et al., 2021). اطمینان و همکاران (Etminan et al., 2011) تفاوت خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در سازندهای مختلف را مورد بررسی قرار دادند و نتایج آنها نشان داد که میانگین وزنی قطر خاکدانه در سازند لار از سایر سازندها بیشتر است و نتایج آنها تفاوت معنی‌دار خصوصیات فیزیکی خاک در سازندهای مختلف را تایید می‌کند. بنا بر آنچه گفته شد، بررسی اثر درصد شیب و نوع ماده مادری، می‌تواند پژوهشگران را در ارائه برنامه‌های مدیریتی و راهبردی راهنمایی نمایند. از این رو پژوهش حاضر با هدف درک چگونگی تغییرات مکانی خصوصیات خاک در شیب‌های مختلف و جنس سنگ‌های متفاوت انجام شد.

- 1- Number Drop Impact
- 2- Soil Cohesion
- 3- Penetration Resistance
- 4- Pocket Vane Tester
- 5- Pocket Penetrometer



شکل ۱- موقعیت مناطق مورد مطالعه در استان خراسان رضوی  
 province Figure 1- The location of the studied areas in KhorasanRazavi

جدول ۲ نتایج حاصل از تجزیه واریانس متغیرهای مورد بررسی در شیب و جنس سنگ‌های مختلف برای ۶۳ نمونه آمده است.

#### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر توزیع اندازه ذرات

متغیرهای درصد سیلت، رس و شن در جنس سنگ‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشند ( $P < 0.001$ ). اگرچه این متغیرها در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معناداری نبودند ولی به طور کلی با افزایش شیب از درصد رس خاک کاسته شده و به درصد شن افزوده می‌شود که دلیل آن را می‌توان تأثیر رواناب و شستشوی بیشتر خاک در شیب‌های بالا و همچنین تأثیر هوازدگی در ارتفاعات بیشتر بیان کرد. همچنین اثر متقابل جنس سنگ و شیب در سطح یک درصد بر متغیرهای درصد شن، سیلت و رس تأثیرگذار است. بیشترین و کمترین درصد رس موجود در نمونه‌های خاک به ترتیب در جنس سنگ شیل با میانگین ۳۶ درصد و گرانیت با میانگین ۱۷ درصد مشاهده شد (شکل ۲).

درصد شن به ترتیب در جنس سنگ‌های ماسه سنگ، افیولیت، آهک پالئوزن سرخس، گرانیت، آهک ژوراسیک چناران، مارن و شیل کاهش می‌یابد به طوری که بیشترین مقدار آن برای ماسه سنگ با میانگین ۶۳ درصد و کمترین میزان آن برای جنس سنگ شیل با میزان ۳۰ درصد می‌باشد. ماسه سنگ سنگی مقاوم به هوازدگی می‌باشد به همین دلیل میزان شن در آن بیشتر از سایر جنس سنگ‌ها است و در مقابل، شیل در مقابل هوازدگی، مقاومت کمی از خود نشان می‌دهد

کربنات کلسیم معادل خاک به روش خنثی کردن کربنات‌های خاک با اسید کلریدریک و تیتراسیون برگشتی اسید اضافی با سدیم هیدروکسید یا سود (NaOH) به دست آمد (Leoppert *et al.*, 1994). در این تحقیق برای اندازه‌گیری پارامتر هدایت اشباع از روش تک استوانه که در منطقه برداشت صورت می‌گیرد، استفاده شد (Haverkamp *et al.*, 1994). برای بدست آوردن پارامتر سله سطحی از معادله (۲) استفاده شد (Fryrear *et al.*, 2000).

$$SCF = \frac{1}{1 + 0.0066 \times clay + 0.21 \times som} \quad (2)$$

در این معادله SCF سله سطحی به میلی‌متر، clay درصد رس و SOM درصد ماده آلی خاک می‌باشد.

#### آنالیز آماری داده‌ها

آنالیز آماری تیمارها شامل نرمال بودن داده‌ها بوسیله آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، تجزیه واریانس به وسیله آزمون تجزیه واریانس با طرح کاملاً تصادفی و مقایسه میانگین تیمارها به وسیله آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) و همبستگی بین متغیرها از طریق آزمون همبستگی پیرسون در نرم‌افزار IMB SPSS انجام شد.

#### نتایج و بحث

در جدول ۱ ویژگی‌های متغیرهای مورد بررسی شامل دامنه تغییرات، بیشترین و کمترین مقدار متغیر، میانگین و میانگین خطا، انحراف معیار، واریانس، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات، و در

درصد ماده آلی در جنس سنگ‌ها و شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشد ( $P < 0.001$ ). همچنین اثر متقابل جنس سنگ و شیب بر متغیر ماده آلی در سطح یک درصد معنی‌دار است. بیشترین درصد ماده آلی در بین جنس سنگ‌های مختلف مربوط به جنس سنگ گرانیت می‌باشد (شکل ۵). در بین سه کلاس شیب مورد نظر نیز در شیب متوسط (۲۵-۱۰ درصد) بیشترین درصد ماده آلی مشاهده شده است. در جنس سنگ گرانیت نیز بر خلاف سایر جنس سنگ‌ها بیشترین درصد ماده آلی در کلاس شیب زیاد می‌باشد، در حالی که در سایر جنس سنگ‌ها بیشترین درصد ماده آلی در شیب متوسط مشاهده شد. کمترین میزان درصد ماده آلی نیز با میانگین ۱/۳۰ درصد در جنس سنگ شیل مشاهده شد و در میان سه کلاس شیب نیز دو کلاس شیب کم و زیاد تقریباً دارای درصد ماده آلی یکسان می‌باشند و شیب متوسط با میزان ۱/۹۶ درصد دارای مقدار ماده آلی بیشتری از دو شیب دیگر است (شکل ۵).

و دارای درصد شن پایینی می‌باشد (شکل ۳). درصد سیلت به ترتیب در جنس سنگ‌های ماسه سنگ، افیولیت، آهک ژوراسیک چناران، گرانیت، شیل، آهک پالئوژن سرخس و مارن روند افزایشی دارد. بیشترین درصد سیلت در جنس سنگ مارن با میزان ۴۴ درصد و کمترین مقدار آن در جنس سنگ ماسه سنگ با مقدار ۱۸ درصد مشاهده شد. به طور کلی ثابت شده است که با افزایش میزان سیلت در خاک میزان فرسایش پذیری نیز افزایش خواهد یافت (شکل ۴). طبیعی است جنس سنگ‌های مختلف به دلایل متعدد مانند مقاومت متفاوت آنها در مقابل هوازدگی، ساختار اولیه سنگ، سن تشکیلات زمین‌شناسی، نوع اقلیم و ... بافت خاک متفاوتی داشته باشند. نتایج پژوهش زارع و همکاران (Zare et al., 2019) در جنس سنگ‌های مختلف در استان خراسان رضوی نشان داد که کلاس بافت خاک در سطح ۱ درصد در تمام جنس سنگ‌ها با یکدیگر دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشند که با نتایج پژوهش حاضر هم‌خوانی دارد.

#### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر ماده آلی

جدول ۱- مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین، ضریب تغییرات، انحراف معیار و واریانس خصوصیات اندازه‌گیری شده

Table 1-The minimum, maximum, mean, Coefficient of variation, standard deviation and variance values of the measured characteristics

متغیر Parameter	ضریب تغییرات Coefficient of variation	واریانس Variance	انحراف معیار Std. Deviation	میانگین Mean	کمترین Minimum	بیشترین Maximum
Clay (%) درصد رس	36.4	81.59	9.03	22.17	11.00	50.00
Silt (%) درصد سیلت	39.5	159.41	12.62	32.14	2.00	56.00
Sand (%) درصد شن	33.2	223/76	14/95	44/68	15/00	77/00
MWD (mm) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	33.3	0.05	0.23	0.69	0.31	1.21
NDI(number) تعداد مونر قطره	20.33	65.15	8.07	39.29	22.00	57.66
SCF (mm) سله سطحی	51.6	12.36	3.55	5.74	2.77	17.71
PR (Kpa) مقاومت فروری خاک	47.2	2711.94	52.07	110.74	27.93	229.07
COH (Kpa) چسبندگی خاک	58.2	17.75	4.21	6.87	1.23	20.34
Ks (cm/hr) هدایت اشباع	38.4	0.006	0.75	12.18	5.22	21.84
CaCO <sub>3</sub> (%) درصد کربنات کلسیم معادل	40.5	116.70	10.80	25.76	1.80	48.41
OM (%) درصد ماده آلی	28.0	0.21	0.46	1.72	0.67	2.68

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) برای متغیرهای مورد بررسی  
Table 2- ANOVA (mean square) for the investigated variables

متغیر Parameter	معنی‌داری Sig.	میانگین مربعات Mean Square	درجه آزادی Df	ورودی Source
Clay (%) درصد رس	0.000	388.045	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.396	29.046	2	شیب (Slope)
	0.011	80.151	12	اثر متقابل (Interaction)
Silt (%) درصد سیلت	0.000	553.212	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.216	105.33	2	شیب (Slope)
	0.000	297.259	12	اثر متقابل (Interaction)
Sand (%) درصد شن	0.000	1136.720	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.030	210.540	2	شیب (Slope)
	0.000	355.799	12	اثر متقابل (Interaction)
MWD (mm) میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها	0.000	0.375	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.000	0.279	2	شیب (Slope)
	0.000	0.026	12	اثر متقابل (Interaction)
NDI (number) تعداد موثر قطره	0.000	380.193	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.000	322.885	2	شیب (Slope)
	0.000	29.770	12	اثر متقابل (Interaction)
SCF (mm) سله سطحی	0.000	48.835	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.142	10.586	2	شیب (Slope)
	0.003	16.312	12	اثر متقابل (Interaction)
PR (Kpa) مقاومت فروری خاک	0.000	18729.029	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.001	3895633	2	شیب (Slope)
	0.000	2362.159	12	اثر متقابل (Interaction)
COH (Kpa) چسبندگی خاک	0.000	128.826	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.000	110.130	2	شیب (Slope)
	0.002	5.220	12	اثر متقابل (Interaction)
Ks (cm/hr) هدایت اشباع	0.000	0.032	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.030	0.008	2	شیب (Slope)
	0.038	0.004	12	اثر متقابل (Interaction)
CaCO <sub>3</sub> (%) درصد کربنات کلسیم معادل	0.000	996.760	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.009	64.039	2	شیب (Slope)
	0.000	51.016	12	اثر متقابل (Interaction)
OM (%) درصد مادالی	0.000	1.079	6	جنس سنگ (Parent material)
	0.000	0.889	2	شیب (Slope)
	0.000	0.176	12	اثر متقابل (Interaction)

خواهد بود. شاید یکی از دلایل کمیود میزان ماده آلی در جنس سنگ های مارن، شیل و افیولیت میزان کم پوشش گیاهی و لاشبرگ بر روی این جنس سنگ ها در منطقه مورد مطالعه باشد که به تبع آن سبب کاهش میزان ماده آلی خاک در طولانی مدت می‌شود. وودز و همکاران (Woods et al., 1988) با بررسی درصد ماده آلی در سه کلاس شیب مختلف به این نتیجه رسیدند که درصد ماده آلی در شیب‌های مختلف

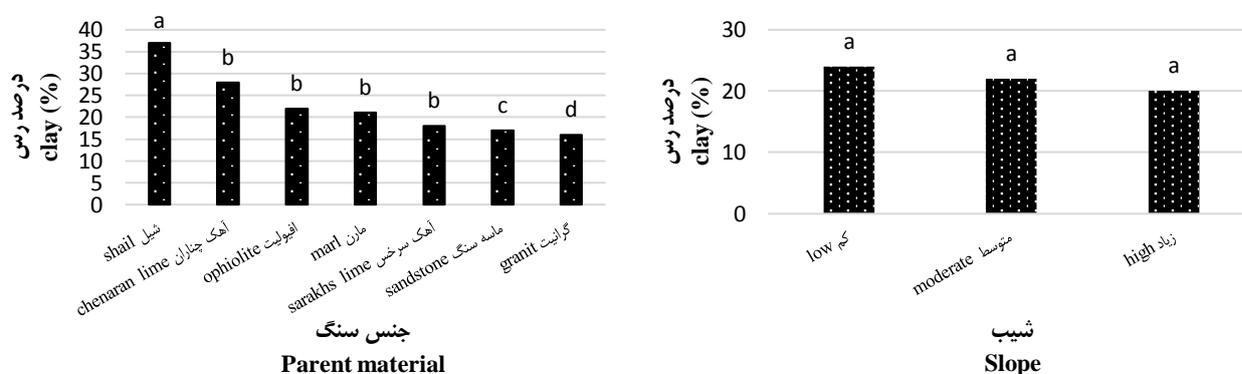
همانطور که گفته شد جنس سنگ گرانیت و شیل به ترتیب دارای بیشترین و کمترین مقدار درصد ماده‌آلی بودند که این نتایج از تغییرات پوشش گیاهی موجود بر روی خاک‌های تشکیل یافته از این جنس سنگ‌ها منشا می‌گیرد، به طوری که هر چه پوشش گیاهی بیشتر باشد درصد ماده‌آلی نیز افزایش می‌یابد و با توجه به نامناسب بودن خاک‌های حاصل از جنس سنگ شیل، طبیعی است درصد ماده آلی در آنها پایین

معادل در جنس سنگ آهک چناران (۴۰/۴۱ درصد) و کمترین میزان آن در جنس سنگ گرانیت (۱۴/۷۲ درصد) می‌باشد. همچنین بیشترین میزان کربنات کلسیم معادل در کلاس شیب زیاد (۲۷/۰۲ درصد) مشاهده شد و کمترین مقدار آن در شیب کم (۲۳/۴۵ درصد) می‌باشد (شکل ۶). با توجه به وجود تشکلات آهکی و غیر آهکی انتظار می‌رود درصد کربنات کلسیم معادل در جنس سنگ‌های مختلف دارای تفاوت مشخصی باشند. کوالسکا و همکاران (Kowalska et al., 2019) تفاوت درصد کربنات کلسیم معادل را در چهار نوع کاربری اراضی مختلف تایید کردند. همانطور که گفته شد با افزایش درصد شیب، درصد کربنات کلسیم معادل نیز افزایش می‌یابد که شاید دلیل این امر پوشش گیاهی ضعیف، رواناب و فرسایش بیشتر موجود در قسمت‌های بالایی شیب باشد که باعث ظاهر شدن آهک در سطح خاک می‌شود.

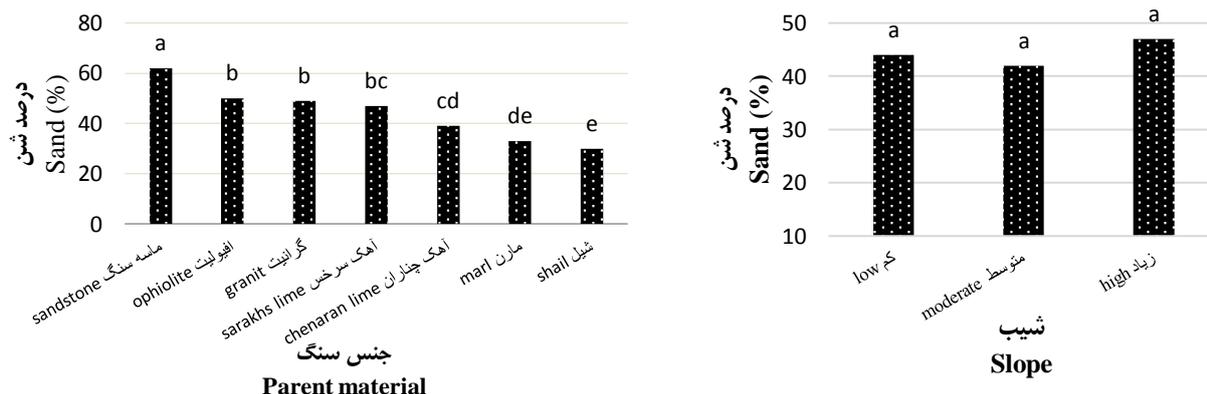
دارای تغییرات قابل توجهی می‌باشد، که با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد. بنابراین آنچه گفته شد می‌توان نتیجه گرفت که در قسمت‌های بالایی شیب به دلیل فرسایش بیشتر و شرایط ناپایدارتر، مقدار ماده آلی کمتری نسبت به موقعیت‌های پایین شیب دارد. نتایج این پژوهش در مورد ماده آلی با نتایج بوراکا و همکاران (Buraka et al., 2022) همخوانی دارد.

### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر کربنات کلسیم معادل

درصد کربنات کلسیم معادل در شیب‌ها و جنس‌های مختلف در سطح ۱ درصد دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد ( $P < 0.001$ ). همچنین اثر متقابل جنس سنگ و شیب نیز در سطح ۱ درصد بر درصد کربنات کلسیم معادل تاثیرگذار است ( $P < 0.001$ ). بیشترین مقدار کربنات کلسیم



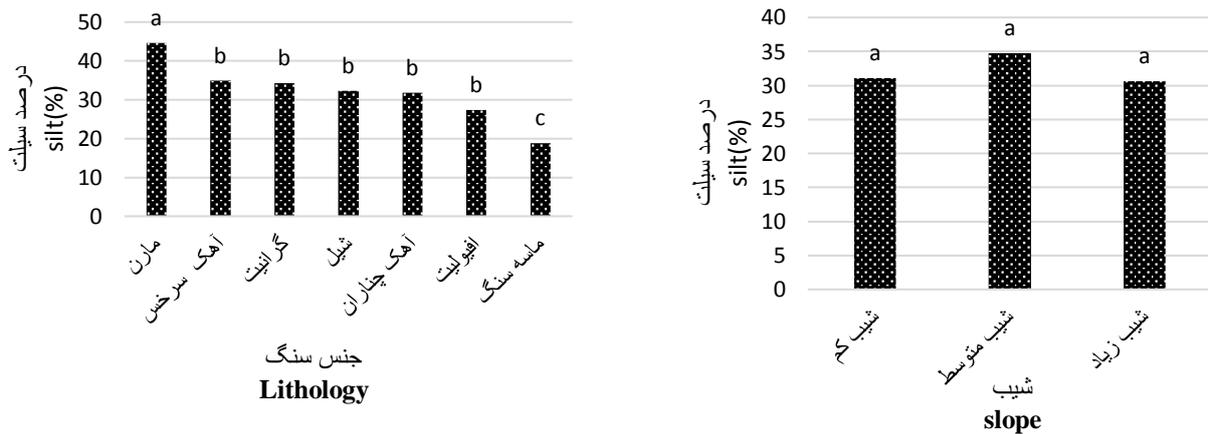
شکل ۲- تغییرات درصد رس در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 2- Variation of clay percent in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۳- تغییرات درصد شن در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 3- Variation of sand percent in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )

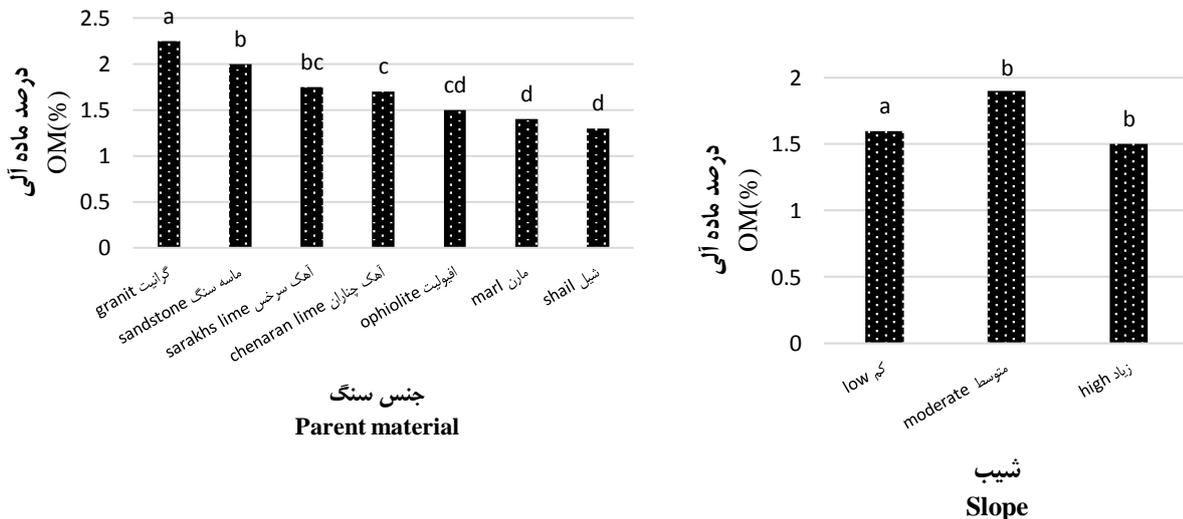
مقدار آن در شیب کمتر از ۵ درصد مشاهده شد، که با نتایج این تحقیق کاملاً هم‌خوانی دارد. در مورد جنس سنگ گرانیت نیز به دلیل عدم وجود تشکیلات آهکی همراه با این جنس سنگ، سبب کاهش قابل ملاحظه میزان کربنات کلسیم معادل درخاک‌های حاصل از این جنس سنگ شده است.

همچنین به دلیل حجم بیشتر رواناب در قسمت‌های پایین دامنه و سرعت کمتر آن در شیب‌های پایین‌تر امکان شست‌وشوی کربنات کلسیم معادل از افق سطحی خاک بیشتر فراهم می‌شود. نتایج تحقیقات پژند و همکاران (Pajand et al., 2016) در منطقه سنگانه با اقلیم نیمه خشک و خاک شیل با لایه‌های نازک سیلت استون نشان داد بیشترین درصد کربنات کلسیم در شیب بالاتر از ۵۰ درصد و کمترین



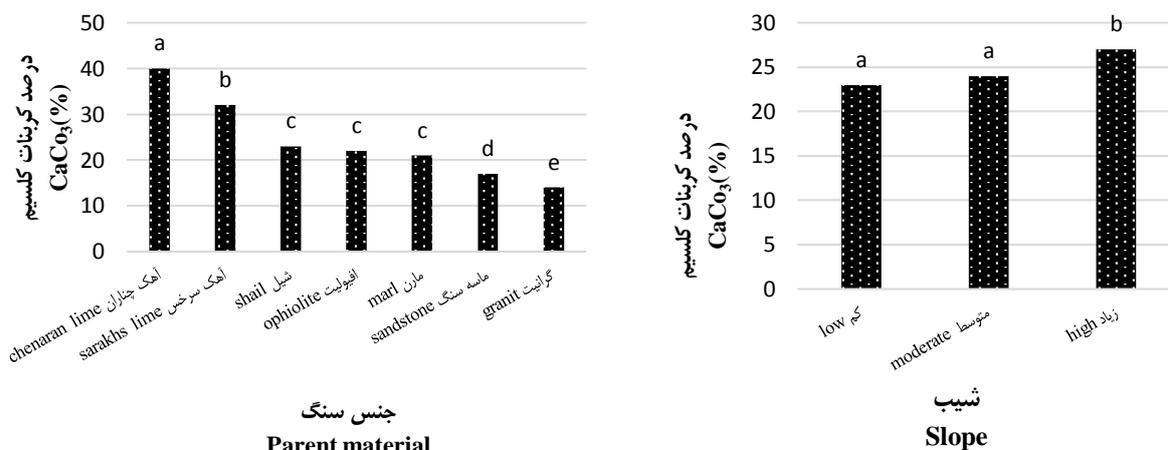
شکل ۴- تغییرات درصد سیلت در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف

Figure 4- Variation of silt percent in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۵- تغییرات درصد ماده آلی در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)

Figure 5 - Variation of organic matter percent in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۶- تغییرات درصد کربنات کلسیم در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 6- Variation of calcium carbonate percent in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )

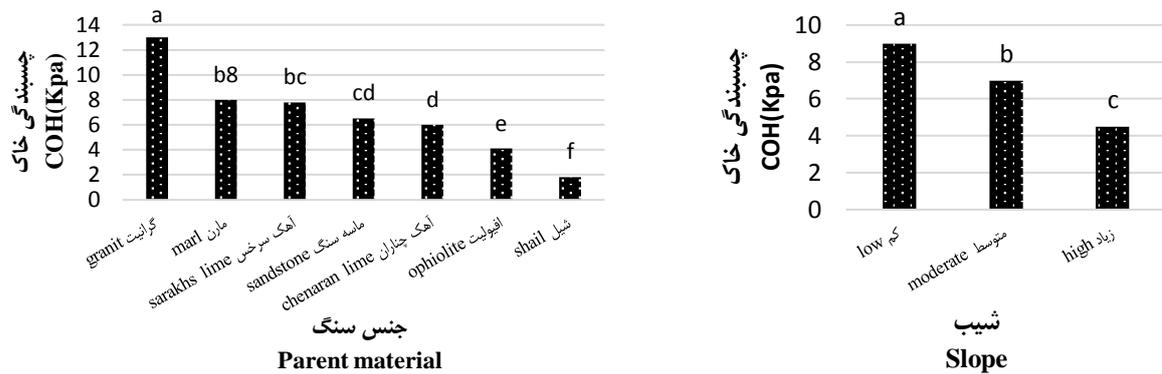
#### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر مقاومت فروری خاک

یکی از پارامترهایی که نشان‌دهنده مقاومت فشاری خاک می‌باشد، پارامتر مقاومت فروری خاک است. مقاومت فشاری خاک عبارت است از ظرفیت تحمل خاک، در مقابل نیروهای فشاری محوری مستقیم و هنگامی که حد مقاومت فشاری خاک فرا می‌رسد، خاک متلاشی خواهد شد.

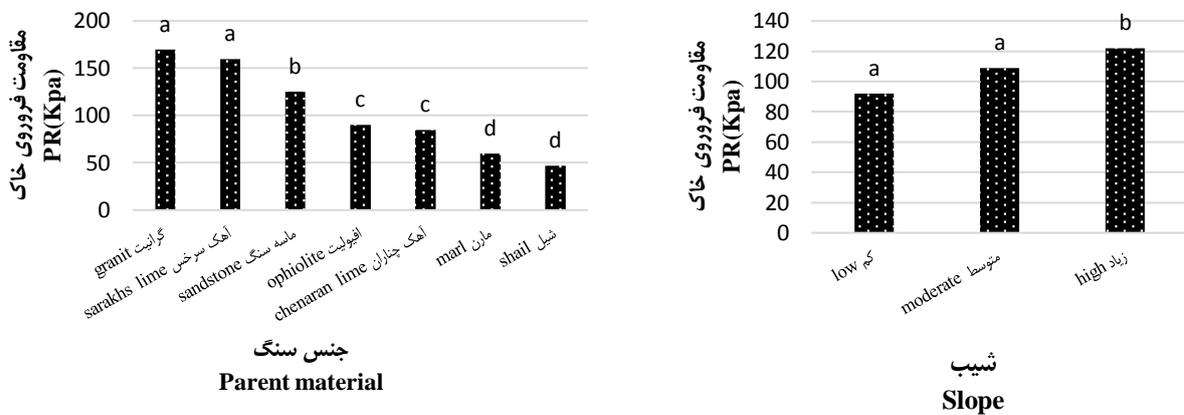
نتایج تجزیه واریانس مقاومت فروری خاک نشان داد این پارامتر در جنس سنگ‌ها و شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری در سطح یک درصد است ( $p < 0.001$ ). بیشترین مقاومت فروری در خاک متعلق به جنس سنگ گرانیت با میزان ۱۶۸/۱۲ کیلوپاسکال و کمترین مقدار آن متعلق به جنس سنگ شیل با میزان ۴۹/۰۲ کیلوپاسکال می‌باشد. همچنین بیشترین مقدار مقاومت فروری خاک در بین سه کلاس شیب مربوط به کلاس شیب بالا و کمترین آن نیز مربوط به کلاس شیب پایین می‌باشد (شکل ۸). نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت فروری خاک در جنس سنگ‌های مختلف با متغیر چسبندگی خاک مطابقت دارد، درحالی که در شیب‌های مختلف این دو متغیر کاملاً نتایج عکس همدیگر نشان دادند؛ به طوری که متغیر مقاومت نفوذ خاک با افزایش درصد شیب افزایش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند تفاوت در توزیع اندازه ذرات و کاهش عمق خاک با افزایش شیب باشد. نتایج به‌دست آمده، با نتایج چن و همکاران (Chen et al., 2022) که بیان کردند با افزایش درصد شیب میزان مقاومت فروری خاک افزایش می‌یابد، هم‌خوانی دارد.

#### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر چسبندگی خاک

بیشترین مقدار چسبندگی خاک به ترتیب در جنس سنگ‌های گرانیت، مارن، آهک سرخس، ماسه سنگ، آهک چناران، افیولیت و شیل مشاهده شد (شکل ۷). چسبندگی خاک یکی از ویژگی‌های ذاتی خاک می‌باشد که پارامتری از مقاومت برشی خاک است و به اصطلاح داخلی بین دانه‌های خاک بستگی ندارد. مقاومت برشی توده خاک، مقاومت داخلی واحد سطح آن خاک است که می‌تواند برای مقابله با گسیختگی یا لغزش در امتداد هر صفحه داخلی بروز دهد. بنابراین یکی از ویژگی‌های مهم خاک به‌ویژه در شیب دامنه چسبندگی خاک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد چسبندگی خاک در جنس سنگ‌ها و شیب‌های مختلف دارای تفاوت معناداری می‌باشد ( $p < 0.001$ )، به طوری که هرکدام از شیب‌ها با دو کلاس شیب دیگر دارای تفاوت معناداری از نظر این پارامتر می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از متغیر چسبندگی خاک نشان داد، بیشترین مقدار چسبندگی خاک در جنس سنگ گرانیت مشاهده شد، که دلیل آن می‌تواند درصد بالای ماده آلی در این جنس سنگ باشد که باعث پیوستگی و انسجام توده خاک می‌شود. در مقابل جنس سنگ شیل که دارای کمترین مقدار ماده آلی است، کمترین مقدار چسبندگی خاک را دارد و در صورت وجود رطوبت کافی، می‌تواند مستعد فرسایش توده‌ای باشد. همچنین چسبندگی خاک می‌تواند ناشی از تفاوت نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده رس‌ها باشد. نتایج تحقیقات وانگ و همکاران (Wang et al., 2018) نشان داد که با افزایش درصد شیب، مقدار متغیر چسبندگی خاک کاهش می‌یابد، که این نتیجه‌گیری با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.



شکل ۷- تغییرات چسبندگی خاک در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 7- Variation of Cohesion in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۸- تغییرات مقاومت فروروی خاک در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 8- Variation of penetration resistance in different slopes and types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )

۹.

همچنین از بین سه کلاس شیب، شیب متوسط دارای بالاترین مقدار هدایت اشباع می‌باشد. سعدی‌پور و همکاران (Saadipoor et al., 2017) در پژوهشی در منطقه خنج استان فارس به بررسی مهمترین عوامل موثر بر هدایت هیدرولیکی اشباع پرداختند و نتایج آنها نشان داد پارامترهای درصد شن، درصد رس، درصد کربنات کلسیم، درصد گچ و درصد ماده آلی بیشترین تاثیر را بر هدایت اشباع خاک دارد. با توجه به تفاوت پارامترهای ذکر شده در تمام جنس سنگ‌های مورد مطالعه انتظار می‌رود، متغیر هدایت اشباع نیز از نظر عامل سنگ‌شناسی دارای تفاوت معنی‌داری باشد. در مورد اثر شیب بر میزان متغیر هدایت اشباع ذکر این نکته ضروری است که نحوه آرایش ذرات خاک در اراضی شیب‌دار متفاوت از حالت افقی است و در واقع با افزایش شیب تا حدودی نظم قرار گرفتن ذرات بیشتر می‌شود، اما در شیب‌های بالاتر به علت عدم پایداری ذرات خاک از یک طرف و از طرف دیگر بدلیل کاهش

اثر درصد شیب و جنس سنگ بر هدایت هیدرولیکی اشباع هدایت هیدرولیکی اشباع توانایی انتقال آب در خاک در حالت اشباع است و یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌باشد که در تعیین سرعت نفوذ، مقدار نفوذ عمقی و دیگر فرآیندهای هیدرولوژیکی موثر است و به عوامل مختلفی مانند: بافت خاک و درجه نفوذپذیری آن، درصد رطوبت اولیه خاک، خصوصیات شیمیایی سیال عبوری، درجه اشباع و نسبت تخلخل بستگی دارد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری این متغیر نشان داد که جنس سنگ‌های مختلف از نظر هدایت اشباع با یکدیگر تفاوت معنی‌داری دارند ( $p < 0.01$ ). همچنین متغیر هدایت هیدرولیکی اشباع در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشد ( $P < 0.05$ ). بیشترین مقدار هدایت هیدرولیکی اشباع در جنس سنگ مارن با میزان ۱۵/۸۳ سانتی‌متر در ساعت و کمترین مقدار آن در جنس سنگ آهک چناران با مقدار ۶/۹۰ سانتی‌متر در ساعت می‌باشد (شکل

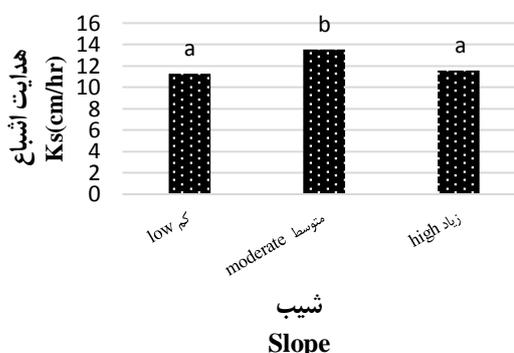
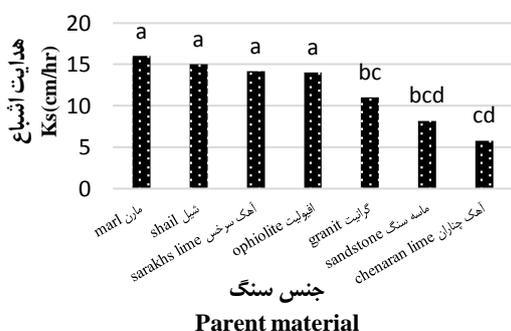
تفاوت معنی‌داری می‌باشد. همانطور که گفته شد عوامل متعددی بر ایجاد سله در سطح خاک موثر است که از مهمترین این عوامل درصد رس، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل موجود در خاک می‌باشد. با مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد رس با ضخامت سله‌سطحی به خوبی مشخص می‌شود که بین این دو پارامتر در جنس سنگ‌های مختلف هماهنگی خوبی وجود دارد.

سینگر و بیزونایس (Singer and Bissonais., 1998) به بررسی مهمترین عوامل موثر بر سله سطحی پرداختند و بیان کردند ویژگی‌هایی از قبیل ناچیز بودن ماده آلی، ساختمان ضعیف و پایداری کم خاکدانه‌ها از عوامل موثر بر ایجاد سله در سطح خاک در این مناطق می‌باشد. از آنجایی که درصد رس در شیب‌های مختلف دارای تفاوت معناداری نمی‌باشد، می‌توان عدم معناداری سله سطحی در شیب‌های مختلف را به این موضوع نسبت داد.

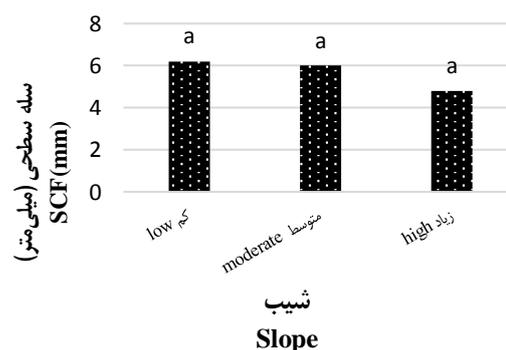
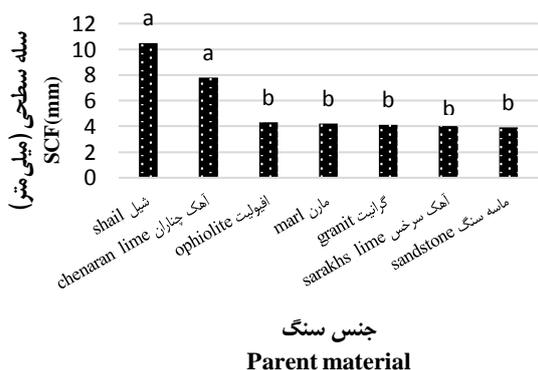
عمق خاک، هدایت اشباع کاهش می‌یابد. رئوف و همکاران (Raouf et al., 2010) کاهش هدایت هیدرولیکی اشباع را با افزایش درصد شیب تایید کردند.

### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر سله سطحی

عواملی که در تشکیل سله سطحی موثر می‌باشند شامل درصد رس موجود در خاک، ظرفیت نگهداری آب در خاک، چگالی ظاهری خاک، ماده آلی، ظرفیت تبادل کاتیونی و سطح ویژه ذرات است (Ramazani et al., 2018). از بین هفت جنس سنگ مورد مطالعه جنس سنگ شیل سرخس با میزان  $10/807$  میلی‌متر دارای بیشترین میزان سله سطحی می‌باشد در حالی که ماسه سنگ چناران با میزان  $3/985$  میلی‌متر دارای کمترین مقدار سله سطحی می‌باشد. از بین سه کلاس شیب نیز در شیب کم بیشترین مقدار سله سطحی مشاهده شده است (شکل ۱۰). عامل جنس مانند سایر پارامترها بر متغیر سله سطحی در سطح ۱ درصد موثر بوده است و در جنس سنگ‌های مختلف دارای



شکل ۹- تغییرات هدایت اشباع در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
Figure 9- Variation of saturated conductivity in different slopes types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۱۰- تغییرات سله سطحی در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
Figure 10- Variation of Surface crust factor in different slopes types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )

دارای بیشترین تعداد و جنس سنگ مارن با تعداد ۲۷/۷۰ قطره دارای کمترین مقدار می‌باشد (شکل ۱۲). اندازه گیری متغیر تعداد موثر قطره در شیب‌های مختلف نشان می‌دهد که میانگین تعداد موثر قطره نیز مانند متغیر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب میانه از دو کلاس شیب دیگر بیشتر می‌باشد که این تفاوت در سطح ۱ درصد معنی‌دار می‌باشد ( $p < 0.001$ ). میزان تخریب خاکدانه‌ها در برابر قطرات باران به قطر قطره باران، رطوبت پیشین خاک و پارامترهای ذاتی خاک از قبیل درصد ماده آلی و نوع بافت خاک بستگی دارد. طبیعی است هر چه ماده آلی در خاکی بیشتر باشد، ذرات خاک با نیروی بیشتری به هم چسبیده خواهند بود و انرژی لازم برای تخریب خاکدانه‌ها و یا به عبارتی تعداد قطره لازم برای از هم پاشیدن خاکدانه‌ها بیشتر خواهد بود. همچنین بوسیت و همکاران (Bossuyt et al., 2001) عامل درصد رس و سیلت را با خاصیت ثبات‌دهندگی ذرات خاک به یکدیگر، عامل مهمی در پایداری خاکدانه‌ها در برابر قطره باران در نظر گرفتند. بنابراین می‌توان تفاوت معنی‌دار پارامتر تعداد موثر قطره را در جنس سنگ‌های مختلف به تفاوت در بافت خاک و درصد ماده آلی نسبت داد. تفاوت میانگین متغیر تعداد موثر قطره در شیب‌های متفاوت نیز از تفاوت میانگین پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها پیروی می‌کند.

### نتیجه‌گیری

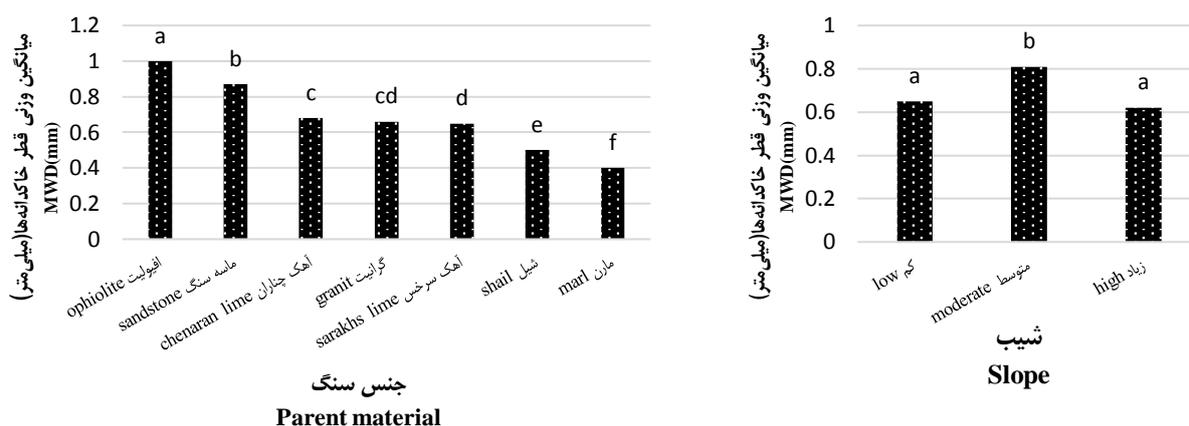
هدف از این پژوهش بررسی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جنس سنگ‌های مختلف در شیب‌های متفاوت بود. نتایج نشان داد برخی از این خصوصیات در طول دامنه دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای بودند. همچنین تمام پارامترهای مورد بررسی در جنس سنگ‌های مختلف دارای تفاوت معنی‌دار بودند. بر اساس نتایج به‌دست آمده درصد شن در طول دامنه دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای بود و با افزایش شیب بر میزان درصد شن افزوده می‌شود. به طور کلی تغییرات شیب نشان‌دهنده تغییرات بافت خاک نبود و پیشنهاد می‌شود برای بررسی بافت خاک در شیب‌های متفاوت، به‌طور گسترده‌تری مورد بررسی قرار گیرد. تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب‌های مختلف حساسیت این ویژگی مهم را به توپوگرافی تأیید می‌کند؛ به طوری که با افزایش شیب پایداری خاکدانه‌ها کاهش می‌یابد و پیشنهاد می‌شود برنامه‌های مدیریتی برای حفاظت از خاک برای جلوگیری از فرسایش در مناطق شیب‌دار مورد تأکید بیشتر باشد.

### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها

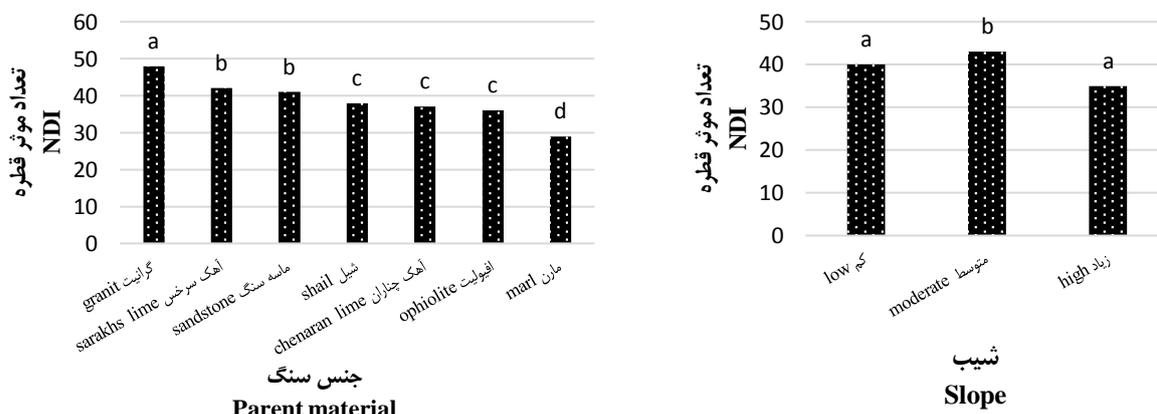
بیشترین مقدار میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جنس افیولیت با مقدار ۱/۰۰۵ میلی‌متر و کمترین مقدار آن در جنس سنگ مارن با مقدار ۰/۴۰۳ میلی‌متر می‌باشد. همچنین شیب متوسط از بین سه کلاس شیب، دارای میزان میانگین وزنی قطر خاکدانه بیشتری از دو کلاس شیب دیگر است و در تمام جنس سنگ‌های مورد مطالعه میزان میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب میانه از سایر شیب‌ها بیشتر بوده است (شکل ۱۱). تمام جنس سنگ‌ها از نظر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها با یکدیگر دارای تفاوت قابل ملاحظه‌ای می‌باشند به طوری که تقریباً هر جنس سنگ با سایر جنس سنگ‌ها از نظر این پارامتر دارای تفاوت معنی‌داری می‌باشد. پارامتر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها عامل مهمی از پایداری خاکدانه‌ها می‌باشد که به عواملی از قبیل بافت خاک، درصد ماده آلی و درصد کربنات کلسیم بستگی دارد و از آنجا که هر کدام از این متغیرها در جنس سنگ‌های مختلف دارای اختلاف معنی‌داری می‌باشد، این پارامتر نیز در جنس سنگ‌های مختلف تفاوت معناداری دارد. ملائی و همکاران (Molai et al., 2015) با بررسی عوامل موثر بر عامل میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها به این نتیجه رسیدند که درصد ماده آلی بیشترین تأثیر را بر میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها دارد. این نتایج با نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری ماده آلی در شیب‌های مختلف دقیقاً همخوانی دارد. نتایج این تحقیق درباره تفاوت میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در جنس سنگ‌های مختلف با نتایج اطمینان و همکاران (Etmian et al., 2011) و درباره اندازه‌گیری میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب‌های مختلف با تحقیقات وانگ و همکاران (Wang et al., 2023) همخوانی دارد.

### اثر درصد شیب و جنس سنگ بر پارامتر تعداد موثر قطره

پارامتر دیگری که نشان‌دهنده پایداری خاکدانه‌ها خصوصاً در برابر ضربه مستقیم قطره باران می‌باشد، توانایی مقاومت ذرات خاک در برابر باران است که به اختصار آن را NDI می‌نامند. ذرات خاک تحت شرایط مختلف مقاومت متفاوتی در برابر قطرات باران نشان می‌دهند این تفاوت می‌تواند با افزایش شیب، پوشش سطحی، ماده آلی، کربنات کلسیم معادل و ... قابل توجه باشد (Balyani et al., 2018) میانگین متغیر تعداد موثر قطره در جنس سنگ‌های مختلف دارای دامنه نسبتاً زیادی می‌باشد، به طوری که جنس سنگ گرانیت با تعداد میانگین ۴۸/۱۴ قطره



شکل ۱۱- تغییرات میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 11- Variation of the mean weight diameter of soil aggregates in different slopes types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )



شکل ۱۲- تغییرات تعداد موثر قطره در شیب‌ها و جنس سنگ‌های مختلف (حروف یکسان فاقد معنی‌داری در سطح ۵ درصد)  
 Figure 12- Variation of number drop impact of soil aggregates in different slopes types of stones (same letters was not significant at  $P < 0.05$ )

نشان داد؛ همچنین عامل توپوگرافی تغییرات قابل ملاحظه‌ای از درصد کرنات کلسیم معادل را منعکس می‌کند. پیشنهاد می‌شود اثر درصد کرنات کلسیم بر روی سایر ویژگی‌های خاک در پژوهش‌های بعدی بیشتر مورد بررسی قرار گیرد. بعنوان یک نتیجه‌گیری کلی و با توجه به اینکه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تا حدودی تحت تاثیر ماده مادری و شیب قرار دارند و همچنین با وجود اطلاعات زمین‌شناسی خوب در کشور می‌توان با بررسی جامع ویژگی‌های خاک تحت شیب و ماده مادری متفاوت، راهکارهای مدیریتی مناسب برای جلوگیری از تخریب و فرسایش خاک ارائه کرد.

بررسی ماده آلی در طول دامنه نیز نشان‌دهنده تغییرات قابل ملاحظه این ویژگی در شیب دامنه بود؛ به طوری که با افزایش شیب میزان ماده آلی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد و از آنجا که درصد ماده آلی در مناطق خشک و نیمه خشک پایین است، پیشنهاد می‌شود برای حفظ ماده آلی در قسمت‌های پایین شیب اقدامات لازم انجام شود. کمترین مقدار ماده آلی در جنس سنگ شیل مشاهده شد و پیشنهاد می‌شود برای مقابله با فرسایش خاک در این مناطق اقدامات مدیریتی لازم انجام شود. نتایج حاصل از اندازه‌گیری درصد کرنات کلسیم معادل در جنس سنگ‌های مختلف تفاوت قابل ملاحظه‌ای را

- Baliani, A., Vaezi, A.R., & Emami, H. (2018). Variability of splash erosion from slope gradient and soil properties. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 12(41), 95-104. (In Persian with English Abstract)
- Black, A.L., & Walkley, H. (1986). Bulk density. In: Editor Methods of soil analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Method. Agronomy Monograph. *Soil Science Society of America Journal and American Society of Agronomy*, 9(21), 374-380. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c18>
- Bossuyt, H., Denef, K., Six, J., Frey, S.D., Merckx, R., & Paustian, K. (2001). Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Applied Soil Ecology*, 16(3), 195-208. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00116-5)
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00002196200540050028x>
- Buraka, T., Elias, E., & Lelago, A. (2022). Soil organic carbon and its' stock potential in different land-use types along slope position in Coka watershed, Southern Ethiopia. *Heliyon*, 8(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10261>
- Chen, S., Zhang, G., Zhu, P., Wang, C., & Wan, Y. (2022). Impact of slope position on soil erodibility indicators in rolling hill regions of northeast China. *Catena*, 217, 106475. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106475>
- Etminan, S., Kianian, F., Khormali, F., & Habashi, H. (2011). Effect of soil properties with different parent materials on aggregate stability: in Shastkola watershed, Golestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(2), 39-58. (In Persian)
- Fryrear, D.W., Bilbro, J.D., Saleh, A., Schomberg, H., Stout, J.E., & Zobeck, T.M. (2000). RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of Soil and Water Conservation*, 55(2), 183-189.
- Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., & Parlange, J.Y. (1994). Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30(11), 2931-2935. <https://doi.org/10.1029/94WR01788>
- Kemper, W.D., & Rosenau, R.C. (1986). Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 425-442. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17>
- Kowalska, J.B., Zaleski, T., Józefowska, A., & Mazurek, R. (2019). Soil formation on calcium carbonate-rich parent material in the outer Carpathian Mountains—A case study. *Catena*, 174, 436-451. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.025>
- Loeppert, R.H., Hallmark, C.T., & Koshy, M.M. (1984). Routine procedure for rapid determination of soil carbonates. *Soil Science Society of America Journal*, 48(5), 1030-1033. <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800050016x>
- Liu, G., Xu, M., & Ritsema, C. (2003). A study of soil surface characteristics in a small watershed in the hilly, gullied area on the Chinese Loess Plateau. *Catena*, 54(1-2), 31-44. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00055-9)
- Lupi, A., Steinbach, H.S., Ciarlo, E., Romaniuk, R., Cosentino, V.R., Rimski-Korsakov, H., & Alvarez, C. R. (2021). Organic carbon stored in soils under different land uses and soil textures in southeast Argentinean Mesopotamia. *Geoderma Regional*, 27, e00435. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00435>
- Maleki, S., Khormali, F., Bodaghabadi, M.B., Mohammadi, J., Hoffmeister, D., & Kehl, M. (2020). Role of geomorphic surface on the above-ground biomass and soil organic carbon storage in a semi-arid region of Iranian loess plateau. *Quaternary International*, 552, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.11.001>
- Molaii, M., Bashari, H., & Basiri Mosadeghi, M.R. (2015). Evaluation of soil structure stability by sieve method in some pasture places of Isfahan province. *Journal of Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources, Water and Soil Sciences*, 18(70). (In Persian)
- Pajand, M.J., Emami, H., & Astarai, A. (2016). Relationship between topography and some soil properties. *Water and Soil*, 29(6), 1699-1710. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v29i6.44736>
- Ramazani, Z., Vaezi, A., Mohamadi, M.H., & Babayi, F. (2018). The combined effect of surface cell on hydraulic conductivity of soil saturation. *Iran Journal of Water and Soil Research*, 48(3), 565-572. (In Persian with English abstract)
- Raof, M., Nazemi, A.H., Sadroddini, A., & Maroofi, S. (2010). Estimation of saturated and unsaturated hydraulic conductivity of sloping lands in permanent and non-permanent states. *Journal of Water and Soil Science*, 20(4). (In Persian with English abstract)
- Saadipoor, Ch., Roodpeyma, M., Karima, A., Davatgar, N., & Salehdin M.S. (2017). Evaluation of spatial variation of soil saturated hydraulic conductivity using spatial statistic (case study: Laghar plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6). (In Persian with English abstract)
- Singer, M.J., & Bissonnais, Y.L. (1998). Importance of surface seal in the erosion of some soil from a Mediterranean climate. *Geomorphology*, 24(32), 79-85.
- Tang, K.L. (2004). *Soil and water conservation in China*. Science Press.
- Tazikeh, H., Khormali, A., & Barani Motlagh, M. (2018). The change and evolution of the soils formed from

- different sedimentary parent materials in Navadis Sheikh, Northeast of Bojnord. *Scientific Journal of Agriculture*, 40(1). (In Persian with English abstract)
24. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
  25. Wang, H., Zhang, G.H., Li, N.N., Zhang, B.J., & Yang, H.Y. (2018). Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China. *Geoderma*, 325, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.037>
  26. Wang, P., Su, X., Zhou, Z., Wang, N., & Zhu, B. (2023). Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China. *Catena*, 220, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106693>
  27. Woods, L.E., & Schuman, G.E. (1988). Cultivation and slope position effects on soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 52(5), 1371-1376. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050031x>
  28. Zare, M., Golkarian, A., & Emami, H. (2019). *Study the effect of rock and topography on soil moisture curve properties and soil structural stability indicators*. Thesis. Faculty of Natural Resources and Environment. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian with English abstract)



## The Mutual Effect of Cadmium and Magnetic Iron Nanoparticles in the Distribution of Chemical Forms of Cadmium in a Contaminated Soil

S. Nikkhosani Gol Tapeh<sup>1\*</sup>, S. Sadeghi<sup>2</sup>, M. Nooraien<sup>3</sup>, S. Zavareh<sup>4</sup>

Received: 22-12-2022

Revised: 17-02-2023

Accepted: 06-03-2023

Available Online: 06-03-2023

### How to cite this article:

Nikkhosani Gol Tapeh, S., Sadeghi, S., Nooraien, M., & Zavareh, S. (2023). The mutual effect of cadmium and magnetic iron nanoparticles in the distribution of chemical forms of cadmium in a contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 431-442. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80046.1235>

### Introduction

The contamination of agricultural soils with heavy metals is considered as a fundamental problem of industrial and non-industrial societies all over the world, which is increasing significantly with technological advances and is considered a serious threat to the environment, soil and human health. One of these heavy metals is cadmium, which has entered the environmental cycle due to various industrial activities such as metal smelting, battery manufacturing, paints, and plastic production. One of the suitable methods for cleaning the soil contaminated with heavy metals is to stabilize the elements by adding a modifier to the soil, which leads to a decrease in their mobility and bioavailability during the processes of absorption, oxidation and reduction, complexation or deposition. The use of iron nanoparticles is a new generation of environmental cleaning technology that can be an economic solution to some problems caused by pollutants, unlike traditional methods. Considering the importance of soil as a plant food holder and its special role in the food chain and the harmful effects of pollutants such as heavy metals in the soil, this research seeks to explore the potential of magnetic iron nanoparticles in remediating cadmium-contaminated soil. The study aims to investigate the effectiveness of these nanoparticles in reducing cadmium levels and their impact on the distribution of cadmium in different soil components.

### Materials and Methods

The experiments were carried out in the chemical and biological research laboratory of the Department of Soil Science and Engineering of Maragheh University. To conduct the experiment, a soil sample from Ajabshir city with a geographic location of 54 degrees 46 minutes 51.7 seconds east longitude and 37 degrees 24 minutes 34 seconds north latitude located in East Azarbaijan province with an altitude of 1451 meters above sea level, with this The target of extractable cadmium less than 1.16 mg/kg of dry and textured soil (loam) was selected. This experiment is factorial based on random design with two factors of heavy metal cadmium from cadmium sulfate source including cadmium concentrations at three levels of zero, 6 and 12 mg/kg of soil and the factor of magnetic iron nanoparticles at three levels of zero, 1 and 2% in The time was four weeks after the addition of cadmium treatments and it was implemented in three repetitions. After measuring some physical and chemical properties of soil, cadmium concentrations in different species and ionic fractions were measured according to the method provided by Tisser. Finally, the obtained data were analyzed using SPSS and MSTATC software and the means were compared with Duncan's multiple range test at the level of five and one percent probability and the results were interpreted.

1 and 2- Former M.Sc. Student and Assistant Professor Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [nikkhosani72@gmail.com](mailto:nikkhosani72@gmail.com))

3- Associate Professor, Department of Plant Breeding and Biotechnology, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

4- Associate Professor, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Maragheh, Maragheh, Iran

DOI: [10.22067/jsw.2023.80046.1235](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80046.1235)

## Discussion and Conclusion

By increasing the amount of cadmium treatment levels from 6 to 12 mg/kg, the amount of cadmium absorption in the exchange phase decreased. Therefore, the increase in the amount of cadmium levels in different levels of iron nanoparticles reduced the absorption of cadmium in the exchange phase, which in turn reduced the ability of the plant to absorb cadmium and removed cadmium from the plant. By increasing the amount of cadmium in the soil by 1%, nanoparticles increased the amount of cadmium extracted from the carbonate phase. Increasing the amount of cadmium added to the soil at different levels of nanoparticles, the amount of cadmium absorption extracted from the carbonate phase increased, and at the level of 12 mg cadmium/kg, the amount of cadmium extracted from the carbonate phase increased compared to the level of 6 mg cadmium/kg. In cadmium treatments at the level of 12 mg/kg, the amount of cadmium extracted from the phase of iron and manganese oxides were increased compared to cadmium at the level of 6 mg/kg, and in the same treatments at the level of 12 mg/kg, the amount of cadmium extracted was increased with the increase in the amount of nanoparticles. The results showed an increase in the phase of iron and manganese oxides, which may reduce the amount of cadmium available to the plant. In cadmium treatments at the level of 6 mg/kg at the level of 1% of nanoparticles, compared to the other two treatments, an increase in the amount of cadmium extracted from the oxide phase was observed. In the treatment of cadmium at the level of 12 mg/kg, the amount of cadmium extracted from the phase of organic matter increased compared to the treatment of cadmium at the level of 6 mg/kg. Indeed, the research findings reveal an interesting trend in the impact of increasing iron nanoparticles at both cadmium levels of 6 and 12 mg/kg. Specifically, the changes in the amount of cadmium extracted from the organic phase of the soil follow a consistent pattern. Initially, as the iron nanoparticles were introduced, the cadmium extraction from the organic materials decreased. However, at higher levels of nanoparticles, the cadmium extraction started to increase again. This trend suggests that the presence of a higher concentration of nanoparticles may play a role in stabilizing cadmium in the organic matter of the soil. As a result, it may reduce the accessibility of cadmium to plants. In the treatment of cadmium at the level of 12 mg/kg, the amount of cadmium extracted from the residual phase increased compared to cadmium at the level of 6 mg/kg. In the examination of cadmium extracted from the residual phase, it was found that, unlike other phases, the difference between treatments at zero cadmium level and other treatment levels of cadmium in the remaining phase was less compared to other phases, so that the amount of cadmium absorbed in the remaining phase 6 and 12 mg of cadmium per kilograms of soil have the lowest values among different absorption phases. Also, another noteworthy point about this examination was the trend of changes in extracted cadmium according to the levels of nanoparticles in all three levels of cadmium, so that with the increase of nanoparticles from zero to 1% in all levels of cadmium, there was a decreasing trend and with the increase of nanoparticles to two percent, an increasing trend was observed.

## Conclusion

The results showed that in general, with increasing the level of iron nanoparticles, treatment of 12 kg of cadmium, the amounts of residual cadmium, carbonate, organic and oxide phases increased. Increasing the level of cadmium in different levels of iron nanoparticles reduced the absorption of cadmium in the exchange phase, which reduces the ability of the plant to absorb cadmium and removes cadmium from the plant, so that in the treatment with cadmium at the level of 12 mg/kg, the amount of cadmium extracted from the exchange phase reduced. Also, in the cadmium treatment at the level of 6 mg/kg with increasing the amount of nanoparticles, the amount of cadmium extracted from the exchange phase first increased and then a slight decrease in the amount of absorbed cadmium was observed, while at the level of 12 mg of cadmium, the amount of cadmium increased, absorption reduced, and thus removing cadmium from the plant.

**Keywords:** Contaminated treatment, Exchange phase, Heavy metals, Magnetic iron nanoparticles

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص ۴۴۲-۴۳۱

## تاثیر نانو ذرات آهن مغناطیسی در توزیع شکل‌های شیمیایی کادمیوم در یک خاک آلوده

سودابه نیکخوئانی گل تپه<sup>۱\*</sup> - سیروس صادقی<sup>۲</sup> - مجتبی نورائین<sup>۳</sup> - سید سیامک زواره<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۱۵

### چکیده

ترکیبات آهن به شکل نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و یا مغناطیسی، به علت داشتن توانایی حذف یا کاهش اثر آلاینده‌های متعدد آلی و معدنی از جمله اصلاح کننده‌هایی هستند که برای کاهش آلودگی محیط زیست به‌ویژه در محیط‌های آبی به کار می‌روند. مطالعات کمی در مورد استفاده از نانو ذرات آهن مغناطیسی در اصلاح خاک‌های آلوده به فلزات سنگین صورت گرفته است، لذا این پژوهش با هدف بررسی کارایی نانو ذرات آهن مغناطیسی در تثبیت کادمیوم خاک انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه سطح کادمیوم صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و نانو ذرات آهن مغناطیسی در سه سطح صفر، ۱ و ۲ درصد در زمان چهار هفته با ۳ تکرار به انجام رسید. به منظور آلوده سازی خاک مورد نظر از نمک سولفات کادمیوم استفاده گردید و بعد از سپری شدن یک ماه، نانو ذرات آهن مغناطیسی در سه سطح مختلف به هر کدام از ترکیبات تیماری آلوده شده با کادمیوم اضافه و در زمان چهار هفته به صورت جداگانه مقدار کادمیوم استخراجی از فازهای مختلف خاک (تبادلی، کربناتی، اکسیدی، آلی و باقیمانده) به ترتیب اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که کاربرد نانو ذرات آهن مغناطیسی موجب کاهش معنادار کادمیوم در بخش تبادلی و افزایش معنادار کادمیوم در بخش‌های آلی، اکسیدی، کربناتی و باقیمانده گردید. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که افزودن نانو ذرات آهن مغناطیسی به خاک منجر به کاهش فراهمی عنصر کادمیوم در خاک‌های آلوده شده و براساس نتایج حاصل، کاهش دسترسی گیاه به عنصر کادمیوم پیش‌بینی می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی، فاز تبادلی، فلزات سنگین، نانو ذرات آهن مغناطیسی

### مقدمه

سنگین کادمیوم است که به دلیل فعالیت‌های مختلف صنعتی همچون صنایع ذوب فلزات، ساخت باتری، رنگ‌ها و همچنین تولید پلاستیک وارد چرخه محیط زیست شده است (Cook and Morrow, 1995). یکی از روش‌های مناسب برای پاکسازی خاک آلوده به فلزات سنگین، تثبیت عناصر توسط افزودن ماده اصلاح کننده به خاک است که از طریق فرآیندهای جذب، اکسیداسیون و احیا، کمپلکس یا رسوب دادن منجر به کاهش تحرک و زیست فراهمی آنها می‌شود (Kumpiene et al., 2006). پژوهشگران زیادی از نانو ذرات برای غیر متحرک کردن و کاهش دسترسی زیستی فلزات سنگین در خاک، آب و رسوبات آلوده در مقیاس آزمایشگاهی و مزرعه استفاده نموده‌اند (Farrokhanian

در شرایط کنونی جهان، محیط زیست تأثیرات غیر قابل انکاری بر سبک زندگی انسان‌ها، روابط اجتماعی بین جوامع، صنعت، کشاورزی، اقتصاد و روابط بین‌المللی کشورها گذاشته است (Erfan Manesh and Afyouni, 2015). آلودگی خاک‌های کشاورزی با فلزات سنگین به‌عنوان مشکل اساسی جوامع صنعتی و غیرصنعتی در سراسر جهان به شمار می‌آید که با پیشرفت‌های تکنولوژی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در حال افزایش است و تهدیدی جدی برای محیط، سلامت خاک و انسان محسوب می‌شود (Ceribasi and Yetis, 2001). یکی از این فلزات

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران  
\* - نویسنده مسئول: (Email: [nikkhosani72@gmail.com](mailto:nikkhosani72@gmail.com))

۳- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

۴- دانشیار، گروه شیمی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

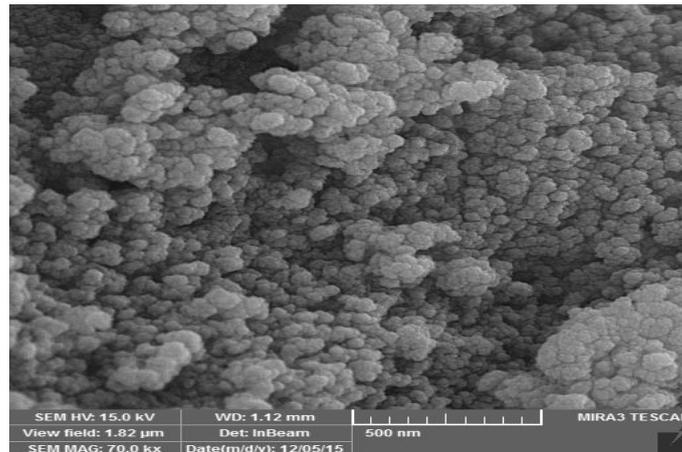
جذب با روش عصاره‌گیری با DTPA اندازه‌گیری شدند (Lindsay and Norvell, 1978). این آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح تصادفی با دو فاکتور فلز سنگین کادمیوم از منبع سولفات کادمیوم شامل غلظت‌های کادمیوم در سه سطح صفر، ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک (Burton et al., 1986) و فاکتور نانو ذرات آهن مغناطیسی در سه سطح صفر، ۱ و ۲ درصد در زمان چهار هفته پس از افزودن تیمارهای کادمیوم صورت گرفت و در سه تکرار به مرحله اجرا گذارده شد. در ابتدا خاک‌های تهیه شده توسط غربال ۲ میلی‌متری الک شدند. سپس جهت آلوده‌سازی خاک با عنصر کادمیوم، سه نمونه جداگانه از خاک مورد آزمایش را درون سه ظرف بزرگ و دربار به صورت جداگانه ریخته و از منبع سولفات کادمیوم ( $CdSO_4 \cdot 8H_2O$ ) به صورت محلول برای آلوده سازی و تهیه تیمارهای کادمیوم اقدام گردید. پس از اجرای آلوده‌سازی خاک‌ها در سطوح تیماری مورد نظر، خاک‌های آلوده جهت تهیه سطوح تیماری نانو ذرات آهن داخل ظروف پلی اتیلنی پر و به هر کدام از نمونه‌های خاک نانو ذرات آهن مغناطیسی در سه سطح تیماری صفر، ۱ و ۲ درصد و با اعمال سه تکرار اضافه و هم زده شدند تا نمونه‌های کاملا همگن و یکنواخت حاصل گردند. در نهایت در مدت زمان مشخص انتخابی میزان کادمیوم استخراج شده در پنج فرکشن اندازه‌گیری و قرائت گردید. در این زمان نیز چرخه خشک و مرطوب شدن (به‌طوری که هر سه روز یکبار خاک را مرطوب و سپس زمان داده تا خاک خشک گردد و این پروسه در چند مرحله طی یک ماه صورت گرفت) را بر روی هر کدام از نمونه‌های خاک درون ظروف پلی اتیلنی اعمال گردید.

نانو ذرات آهن مغناطیسی مصرف شده در این پژوهش توسط روش زواره و بهروزی که برگرفته از روش ژانگ (Zhang, 2003) است تولید شد. در این روش از کلرور آهن فریک به عنوان منبع آهن استفاده می‌شود مراحل ساخت به این صورت بود که ابتدا ۴۰ میلی‌لیتر محلول یک مولار کلرید آهن (III) آبدار ( $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ ) حل شده در ۲ مولار اسید کلریدریک (HCl) به ۱۰ میلی‌لیتر از محلول ۲ مولار کلرید آهن (II) آبدار ( $FeCl_2 \cdot 4H_2O$ ) حل شده در ۲ مولار اسید کلریدریک اضافه شد؛ سپس محلول حاصل به آرامی درون ۵۰۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۷ مولار آمونیاک ( $NH_3$ ) (در حالی که آمونیاک بر روی هم‌زن و با دور ثابت هم‌زده می‌شود) اضافه گردید. بعد از ۲۰ دقیقه هم‌زدن با دور ثابت، نانو ذرات به مدت ۵ دقیقه در پروپ اولتراسونیک قرار داده شد و به دنبال آن نانو ذرات توسط آهن‌ربا جدا سازی و با آب دوبار تقطیر شستشو داده شد. در نهایت نانو ذرات تهیه شده با الکل شستشو و در آون در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد خشک گردید. تصویر SEM و TEM نانو ذرات استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ و ۲ نمایش داده شده است.

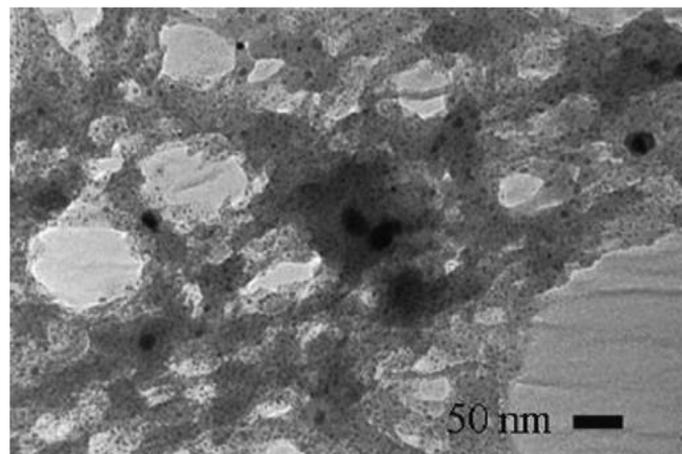
(Firoozi et al., 2017). بررسی منابع علمی نشان می‌دهد کاربرد نانو ذرات آهن نسل جدیدی از تکنولوژی پاکسازی محیط زیست است که می‌تواند بر خلاف روش‌های سنتی، راه حلی مناسب برای برخی مشکلات ناشی از آلاینده‌ها باشد (Zavareh and Behrozi, 2016). برخی از پژوهشگران تأثیر نانو ذرات آهن را در اصلاح خاک‌های آلوده بررسی نموده‌اند. در این رابطه می‌توان به پژوهش لیو و ژائو اشاره نمود که در آن افزودن نانو ذرات فسفات آهن به سه خاک اسیدی، قلیایی و خنثی زیست‌فراهمی سرب را به‌طور معناداری در این خاک‌ها کاهش داد (Liu and Zhao, 2007). هانیر و همکاران (Hanauer et al., 2011) گزارش کردند که کاربرد یک درصد از نانو آهن صفر ظرفیتی در دو خاک با pH معادل ۳/۱۹ و ۶/۹۹ با بافت سنگین، تحرک کادمیوم، مس و روی را به ترتیب به میزان ۵۱، ۲۱ و ۱۱ درصد کاهش داده است. همچنین مارزوک و همکاران (McBride, 1994) گزارش کردند که حداکثر دامنه ظرفیت جذب سرب و کادمیوم توسط نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به ترتیب ۲۵/۹۷ و ۹۳/۴۵ گرم بر کیلوگرم خاک است. به‌طور کلی نانو ذراتی که برای پاکسازی محیط زیست استفاده می‌شوند دارای خصوصیات منحصر به فردی از جمله قدرت کاهندگی بالا، غیر سمی بودن، واکنش‌پذیری و تحرک بالا هستند (Meyer et al., 2005). بنابراین با توجه به اهمیت خاک به‌عنوان نگه دارنده عناصر غذایی گیاهان و جایگاه ویژه آن در زنجیره تولید مواد غذایی و با توجه به اثرات مضر آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین بر روی خاک این پژوهش با هدف بررسی از کاربرد نانو ذرات آهن مغناطیسی در اصلاح خاک آلوده به کادمیوم و تأثیر آن بر نانو ذرات در توزیع کادمیوم در بخش‌های مختلف خاک انجام گردید.

## مواد و روش‌ها

آزمایشات این پژوهش در آزمایشگاه پژوهشی شیمی و بیولوژیکی گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه مراغه انجام شد. برای انجام آزمایش، یک نمونه خاک از شهرستان عجبشیر با موقعیت جغرافیایی طول شرقی  $37^{\circ} 24' 34''$  و عرض شمالی  $54^{\circ} 46' 7/51''$  استان آذربایجان شرقی با ارتفاع ۱۴۵۱ متر از سطح تراز دریا، انتخاب گردید، و با این هدف که کادمیوم قابل استخراج کمتر از ۱/۱۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک خشک (McBride, 1994) و دارای بافت (لومی) انتخاب گردید. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Or, 2002)، کربنات کلسیم معادل (CCE) به روش تیتراسیون (Klute, 1986)، کربن آلی به روش واکلی بلک (Nelson and Sommers, 1982)، pH در سوسپانسیون ۱:۲/۵ خاک و آب مقطر (McLean, 1982)، EC در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) به روش باور (Bower et al., 1954)، پتاسیم قابل جذب با روش استات آمونیوم یک نرمال و آهن، روی و کادمیوم قابل



شکل ۱- تصویر SEM مربوط به نانو ذرات مغناطیسی  
Figure 1- SEM image of magnetite nanoparticles



شکل ۲- تصویر TEM مربوط به نانو ذرات مغناطیسی  
Figure 2- TEM image of magnetite nanoparticles

$\text{NH}_2\text{OH.HCl}$  ۰/۰۴ مولار در ۲۵٪ اسید استیک اضافه و به مدت ۶ ساعت درون حمام روغن در دمای ۹۶ درجه قرار داده تا نمونه‌ها کاملاً حرارت و شیک گردند. هر نمونه به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ و محلول رویی جهت تعیین غلظت کادمیوم فاز اکسیدی استفاده گردید. روی خاک باقیمانده ۳ میلی‌لیتر استات سدیم ۰/۰۲ مولار و ۵ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ اضافه و دو ساعت درون حمام روغن در دمای ۸۵ درجه قرار داده و بعد به نمونه‌ها ۳ میلی‌لیتر آب اکسیژنه ۳۰٪ اضافه و این بار به مدت سه ساعت درون حمام روغن در دمای ۸۵ درجه قرار داده و شیک نموده. سپس ۵ میلی‌لیتر استات آمونیوم ۳/۲ مولار در ۲۰٪ آمونیاک به نمونه‌ها اضافه و در دمای ۲۵ درجه به مدت ۳۰ دقیقه شیک گردید. بعد نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ و محلول رویی جهت تعیین غلظت کادمیوم فاز آلی استفاده شدند. بخاطر اسید هیدروفلوریک استفاده شده در این مرحله، خاک باقیمانده درون لوله آزمایش شیشه‌ای

غلظت کادمیوم در گونه‌ها و فرکشن‌های مختلف یونی بر اساس روش ارائه شده توسط تسیر اندازه‌گیری شدند (Tessier *et al.*, 1979). مراحل انجام روش تیسر بدین صورت است که یک گرم خاک آلوده را درون فالكون ریخته و ۸ میلی‌لیتر محلول کلرور منیزیم یک مولار با pH معادل ۷ به هر نمونه اضافه و در دمای ۲۵ درجه به مدت یک ساعت در آنکوباتور شیکردار، شیک گردید. بعد نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ شده و محلول رویی جدا و برای تعیین غلظت کادمیوم تبدیلی استفاده شد. در ادامه بر روی خاک مرحله قبل ۸ میلی‌لیتر استات سدیم یک مولار ریخته و به مدت پنج ساعت در دمای ۲۵ درجه شیک گردید. هر نمونه‌ها به مدت پنج دقیقه سانتریفوژ و محلول رویی جهت تعیین غلظت کادمیوم فاز کربناتی استفاده گردید. در مرحله بعد به دلیل دمای بالا ۹۰ درجه، خاک باقیمانده از مرحله قبل درون فالكون را به لوله‌های آزمایش شیشه‌ای منتقل و ۲۰ میلی‌لیتر از ترکیب

## نتایج و بحث

نتایج برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد خاک مورد مطالعه دارای بافت لومی بوده و میزان pH آن برابر با ۸/۲ می‌باشد که نشانگر یک خاک قلیایی می‌باشد. خاک منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در حد شوری زیاد قرار دارد، لازم به ذکر است که در منطقه مورد مطالعه علت شوری می‌تواند از طریق طبیعی به علت نزدیک بودن منطقه به دریاچه ارومیه و شور بودن رسوبات اولیه تشکیل دهنده خاک‌ها (رسوبات دریاچه‌ای) باشد. و مقدار ظرفیت تبادل کاتیونی آن نیز برابر با ۱۲ سانتی‌مول بار مثبت بر کیلوگرم می‌باشد. مقدار کربن آلی آن برابر با ۰/۸ درصد و کربنات کلسیم معادل آن برابر با ۵/۹ درصد است. مقادیر سه عنصر مختلف روی، کادمیوم و آهن نیز در جدول ۱ ملاحظه می‌گردد.

را مجدداً به داخل فالكون هدایت و سپس روی خاک باقیمانده ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک و ۲ میلی‌لیتر اسید پرکلراید ریخته و در حمام آبی قرار داده تا نمونه‌ها در حالت بخار شدن و نزدیک خشک شدن برسند، سپس به نمونه‌ها ۱۰ میلی‌لیتر اسید هیدروفلوریک و ۱ میلی‌لیتر اسید پرکلراید ریخته تا نمونه‌ها به حالت بخار شدن تا نزدیک خشک شدن نمونه برسند. مجدداً ۱ میلی‌لیتر اسید پرکلراید به نمونه‌ها اضافه تا بخار شده و پودر سفید رنگ ظاهر گردد. به هر نمونه ۱ میلی‌لیتر اسید کلریدریک غلیظ اضافه و با ۲۵ میلی‌لیتر آب مقطر رقیق گردیدند. در نهایت نمونه‌ها پنج دقیقه سانتریفوژ و محلول رویی جهت تعیین غلظت کادمیوم فاز باقیمانده استفاده گردید.

در پایان، داده‌های به دست آمده با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و MSTATC تجزیه و تحلیل شده و مقایسه میانگین‌ها با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج و یک درصد تفسیر شدند. برای رسم نمودارها نیز از نرم‌افزار Excel استفاده گردید.

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی خاک مورد مطالعه

Table 1- Chemical and physical properties of the studied soil

بافت خاک Soil Texture	شن Sand %	سیلت Silt %	رس Clay %	کربن الی OC %	T.N.V %	CEC (cmol <sub>c</sub> /kg)	pH	EC dS/m	K mg/kg	Zn mg/kg	Cd mg/kg	Fe mg/kg
لومی	44	37	19	0.8	5.9	12	8.2	8.69	38.40	0.29	0.01	0.93

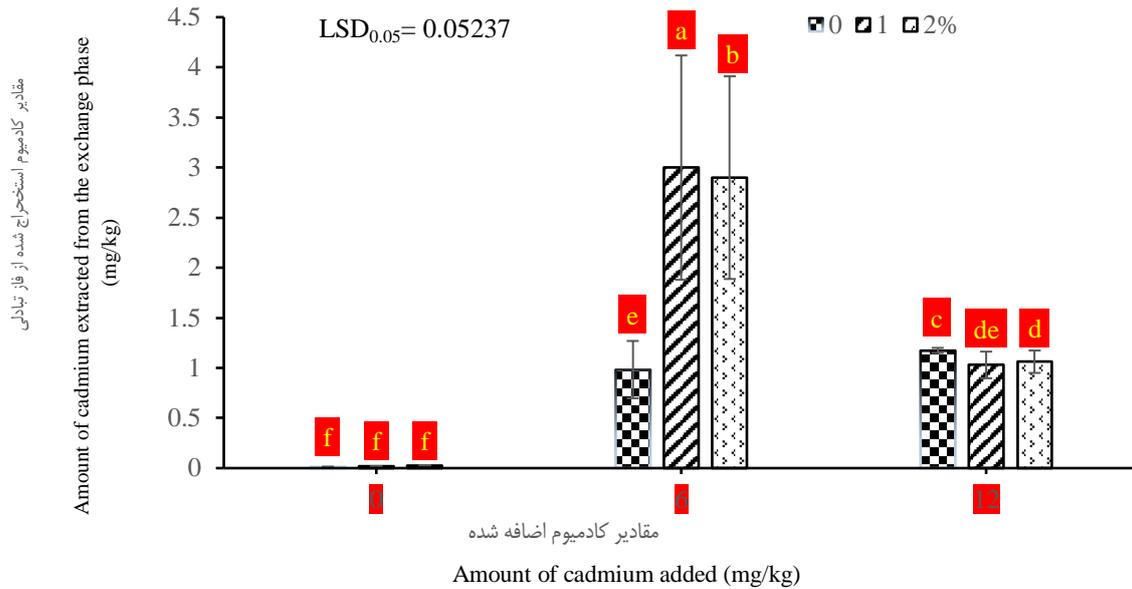
جدول ۲- تجزیه واریانس اثرات کادمیوم، نانو ذرات آهن بر روی مقادیر استخراج شده کادمیوم از پنج فاز مختلف

Table 2- ANOVA of the effects of cadmium, iron nanoparticles on the quantities of cadmium extracted from five different phases

منابع تغییرات Sources of Changes	درجه آزادی Degree of Freedom	میانگین مربعات Mean squares				
		جزء متبادل پذیر Interchangeable Component (mg/kg)	جزء متصل به فاز کربنات The Component Attached to the Carbonate Phase (mg/kg)	جزء متصل به اکسیدهای آهن و منگنز A Component Connected to Iron and Manganese Oxides (mg/kg)	جزء متصل به مواد الی A Component Bound to Organic Matter (mg/kg)	جزء باقیمانده Residual Component (mg/kg)
کادمیوم Cd	2	46.589**	175.814**	31.218**	2.726**	0.003**
نانو ذرات Nano Partical	2	4.577**	7.648**	1.303**	0.007**	0.000**
کادمیوم* نانو ذرات Cd*Nano Partical	4	10.994**	12.302**	0.737**	0.008**	0.000**
زمان Time	1	16.046**	5.489**	4.816**	1.392**	0.001**
خطا Error	36	0.077**	2.105**	0.018**	0.003**	0.000**
ضریب تغییرات % Coefficient of variation		4.07	9.77	2.35	3.02	10.76

\*\*معناداری در سطح آماری یک درصد، \* معناداری در سطح آماری پنج درصد و ns از لحاظ آماری غیر معنادار.

\*\*Significance at statistical level 1%, \*Significance at statistical level 5% and, ns non-statistically significant



شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی  
 Figure 3- Comparison of the average interactions of cadmium, nanoparticles on the amount of cadmium extracted from the exchange phase

را کاهش نداده بلکه منجر به افزایش آن شده که نشانگر تاثیر نامطلوب کاربرد نانو ذرات جهت کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم برای گیاه است، در صورتی که در سطح ۱۲ میلی گرم کادمیوم با افزایش سطح نانو ذرات به میزان ۱ و ۲ درصد مقدار کادمیوم جذبی به ترتیب ۱۲/۴ و ۹/۰۷ درصد کاهش یافت لذا باعث خروج کادمیوم از دسترس گیاه گردید. در کل با توجه به نتیجه حاصل از این نمودار می توان چنین بیان نمود که نانو ذرات در سطوح آلوده تر تاثیر مثبت بر کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم دارند.

این نتیجه با تحقیقات حمزه نژاد و همکاران (Hamzeh et al., 2018) مطابقت داشت. به طوری که این محققان گزارش کردند کاربرد نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی موجب کاهش معنادار عناصر در بخش های تبدالی می گردند. همچنین باقریفام و همکاران (Bagherifam et al., 2014) در بررسی غیرمتحرک نمودن آرسنیک توسط اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز در خاک آهکی دریافتند که افزودن این جاذبها به خاک آلوده، به شدت جزء قابل دسترس آرسنیک را کاهش می دهد. همچنین با افزایش درصد نانو ذرات مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی کمتر شده و در نتیجه کادمیوم از دسترس گیاه خارج شده است. که این موضوع با تحقیقات حمزه نژاد و همکاران (Hamzeh et al., 2018) مطابقت دارد، به طوری که آنها گزارش کردند که با افزودن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی مقدار سرب به طور معناداری در بخش تبدالی کاهش یافت. کانتین و همکاران (Contin et al., 2007) نیز در مطالعات خود نتیجه گرفتند، تیمار دو خاک آلوده زراعی و مرتعی با ترکیبات اکسی/هیدروکسیدهای آهن در شرایط هوازای تغییر چشم

#### کادمیوم استخراج شده از سطوح تبدالی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل کادمیوم، نانو ذرات بر مقادیر فرکشن ها (جزءهای) استخراج شده در سطح یک درصد معنادار است. شکل ۳ نمودار مقایسه میانگین کادمیوم استخراجی از فاز تبدالی برای اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات را نشان می دهد. بیشترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی مربوط به تیمار کادمیوم با سطح ۶ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و نانو ذرات در سطح ۱ درصد با میانگین ۲/۹۹۹ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد و کمترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی گرم بر کیلوگرم خاک و نانو ذرات در سطح صفر درصد با میانگین ۰/۹۸۳۳ میلی گرم بر کیلوگرم می باشد.

با افزایش مقدار سطوح تیمار کادمیوم از ۶ به ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم بر خلاف سطح صفر نانو ذرات، میزان جذب کادمیوم در فاز تبدالی کاهش پیدا می کند. پس افزایش مقدار سطوح کادمیوم در سطوح مختلف نانو ذرات آهن باعث کاهش جذب کادمیوم در فاز تبدالی شده که این امر باعث کاهش قابلیت جذب کادمیوم توسط گیاه می گردد و کادمیوم را از دسترس گیاه خارج می کند به گونه ای که در تیمارها با کادمیوم در سطح ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی نسبت به سطح صفر نانو ذرات کمتر شده است. همچنین در تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی گرم بر کیلوگرم با افزایش میزان نانو ذرات، مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز تبدالی ابتدا افزایش و سپس مقداری کاهش در میزان کادمیوم جذبی مشاهده شد که نشان می دهد حضور نانو ذرات در سطوح پایین آلودگی نه تنها میزان کادمیوم تبدالی

کادمیوم بر کیلوگرم بیشتر شده و کادمیوم کمتری در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. همچنین در تیمارهای کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با افزایش میزان نانو ذرات، مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز متصل به کربنات کمتر شده است. لذا با توجه به این نتایج، نظیر کادمیوم استخراجی از سطوح تبادل می‌توان گفت که تاثیر نانو ذرات در سطوح پائین آلودگی نه تنها باعث کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم نگردیده بلکه بر میزان کادمیوم قابل استفاده بر گیاه افزوده شده است. این نتیجه با تحقیقات منصورى و همکاران (Mansouri *et al.*, 2015) مطابقت دارد به طوری که این محققان گزارش کردند، عمدتاً کاربرد جاذب‌های نانو ذرات هماتیت و پلیمر اکریلیکی C در مقادیر ۰/۱ و ۰/۲ درصد در خاک‌های دارای غلظت بالای آرسنیک کل، سبب کاهش معنادار غلظت آرسنیک تبادل‌ی خاک نسبت به خاک‌های دارای غلظت پایین‌تر آرسنیک کل و یا بدون کاربرد جاذب شد. با افزودن نانو ذره آهن صفر ظرفیتی مقدار سرب کربناتی به‌طور معناداری کاهش یافت و از ۳۹/۹ به ۳۴/۳ درصد رسید. اما نانو ذره هماتیت کاهش معناداری در مقدار نسبی سرب کربناتی ایجاد نکرد. کاهش به‌وجود آمده در تیمار نانو ذره آهن صفر ظرفیتی ممکن است ناشی از هیدرولیز آهن صفر و در نتیجه کاهش شدید pH در مجاورت این ذرات باشد که موجب انحلال بخشی از فاز کربناته شده است (Sabouri *et al.*, 2014). در مطالعات دیگر نشان داده شد که کاربرد آهن موجب کاهش سرب در بخش کربناتی خاک می‌شود (Liu and Zhao, 2007; Brown *et al.*, 2003).

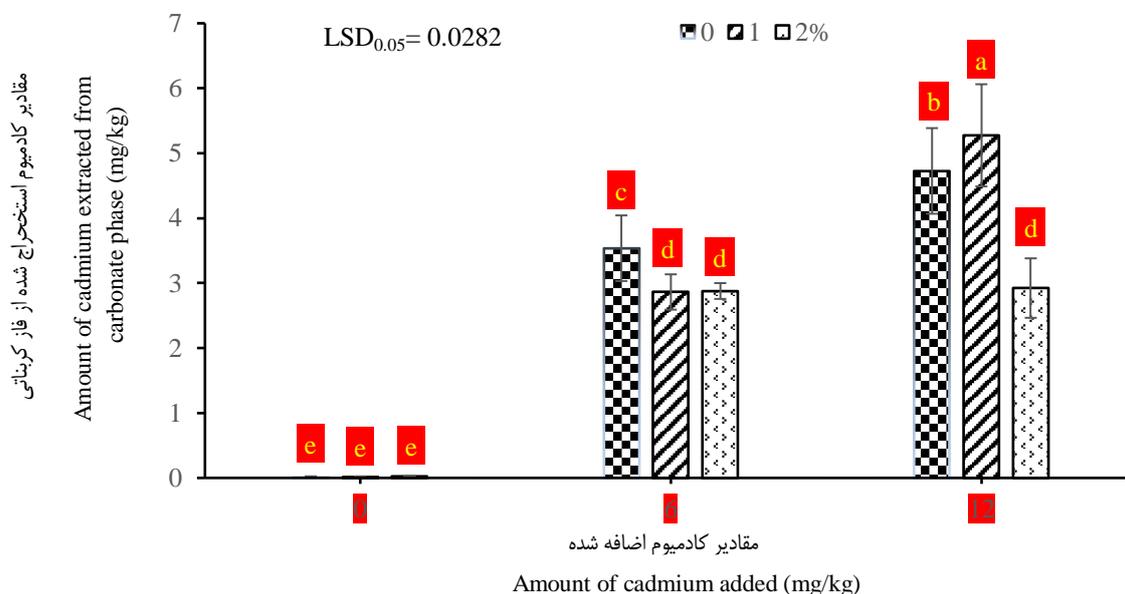
گیری بر مقدار تبدلی و قابل دسترس فلزات سنگین ایجاد نکرد.

#### کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثر متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی در سطح ۱ درصد معنادار می‌باشد. شکل ۴ نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی را نشان می‌دهد.

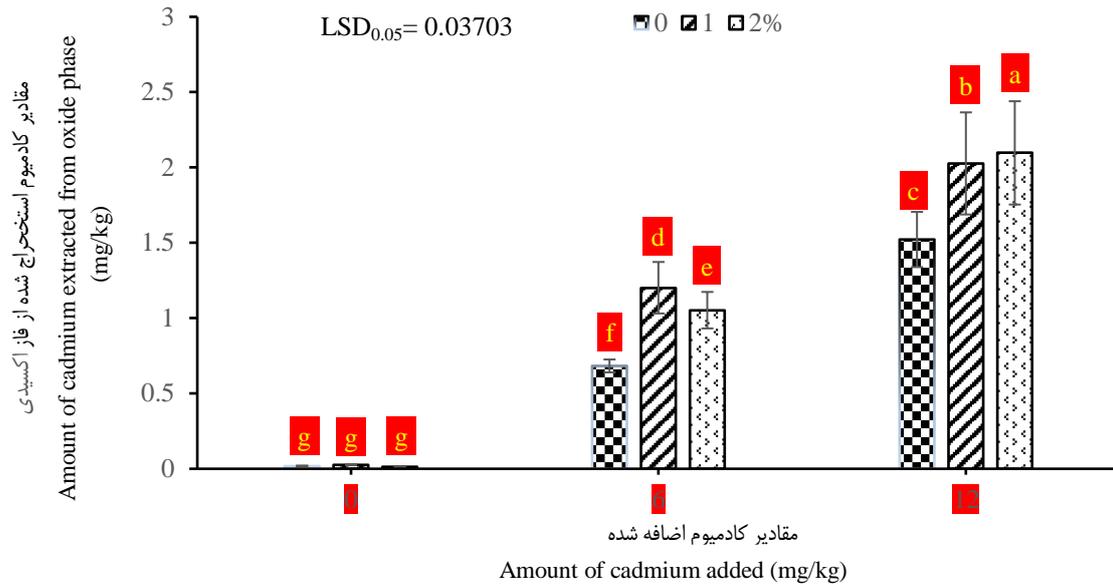
بیشترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۱ درصد نانو ذرات، با میانگین ۵/۲۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و کمترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۱ درصد نانو ذرات، با میانگین ۲/۸۶۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. با توجه به نمودار مشخص می‌گردد که با افزایش میزان کادمیوم خاک میزان ۱ درصد نانو ذرات باعث افزایش میزان کادمیوم استخراجی از فاز کربناتی شده که در این صورت کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم برای گیاه مهیا می‌گردد.

با افزایش مقدار کادمیوم افزوده شده به خاک در سطوح مختلف نانو ذرات مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی بیشتر شده ولی این افزایش بیشتر در سطح ۱۲ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم در سطوح صفر و به طور ویژه در یک درصد نانو ذرات مشاهده شده و مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی نسبت به سطح ۶ میلی‌گرم



شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز کربناتی

Figure 4- Comparison of the average interactions of cadmium, nanoparticles on the amount of cadmium extracted from the carbonate phase



شکل ۵- مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدهای آهن و منگنز  
 Figure 5- Comparison of the average interactions of cadmium and nanoparticles on the amounts of cadmium extracted from the oxides of iron and manganese phase

بودن نانو ذرات هماتیت (pH نانو ذرات معادل ۴/۱ است) بود. در پژوهش‌های براون و همکاران (Brown *et al.*, 2003) با افزودن کمپوست دارای آهن فراوان مقدار سرب در بخش اکسید آهن و منگنز افزایش یافت. در حالی که کامپین و همکاران (Kumpiene *et al.*, 2006) مشاهده کردند که افزودن آهن صفر ظرفیتی موجب کاهش آرسنیک در این بخش شد.

#### کادمیوم استخراج شده از فاز آلی

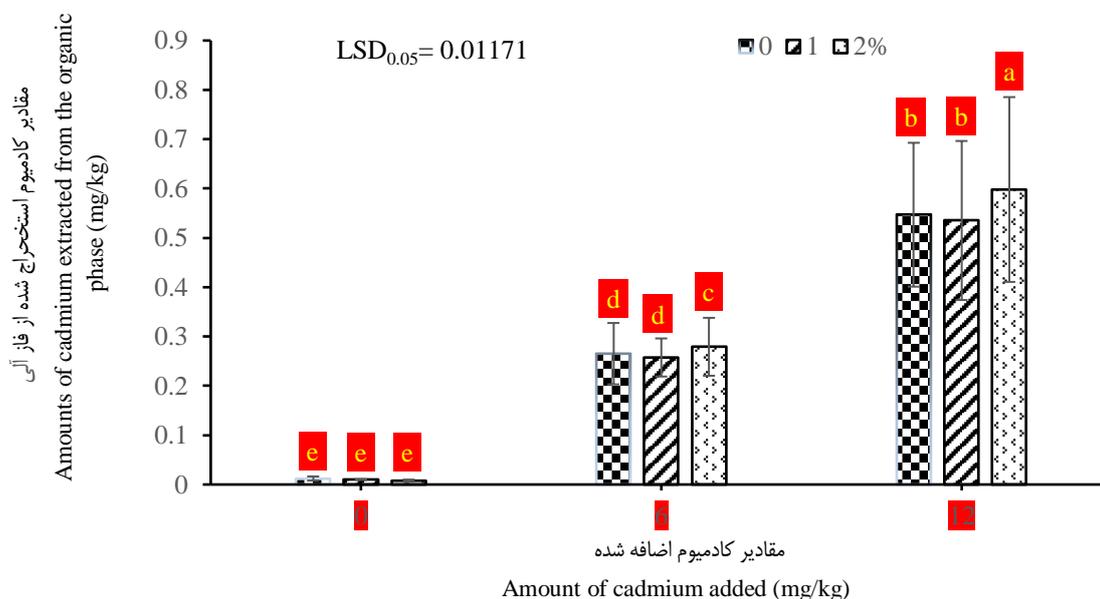
نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات آهن در سطح ۱ درصد اثر معناداری بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی داشتند. شکل ۶ نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات بر مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی را نشان می‌دهد.

بیشترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۲ درصد نانو ذرات، با میانگین ۰/۵۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۱ درصد نانو ذرات با میانگین ۰/۲۵۷۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. در تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی نسبت به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشتر شده است، در واقع با افزایش مقدار کادمیوم خاک مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز مواد آلی افزایش یافته و کادمیوم از دسترس گیاه خارج شده است. همچنین با افزایش نانو

بیشترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدهای آهن و منگنز مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۲ درصد نانو ذرات، با میانگین ۲/۰۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدهای آهن و منگنز مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با صفر درصد نانو ذرات، با میانگین ۰/۶۸۲۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. در تیمارهای کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدهای آهن و منگنز نسبت به کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشتر شده است و در خود تیمارها سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم نیز با افزایش مقدار نانو ذرات مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدهای آهن و منگنز افزایش یافته که این امر باعث کاهش مقدار کادمیوم از دسترس گیاه می‌گردد. در تیمارهای کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم در سطح ۱ درصد نانو ذرات نسبت به دو تیمار دیگر افزایش مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز اکسیدی مشاهده می‌شود. با توجه به روند نمودار می‌توان چنین بیان نمود که تاثیر نانو ذرات بر میزان کادمیوم جذبی در فاز اکسیدی روند افزایشی و در کل تاثیر مثبت بر کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم برای گیاهان را به دنبال داشت این در حالی است که نتایج تحقیقات صبوری و همکاران (Sabouri *et al.*, 2014) نشان داد که افزودن نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی تاثیر معناداری بر جذب سرب توسط اکسیدهای آهن و منگنز خاک نداشت، اما در تیمار نانو ذرات هماتیت مقدار سرب به طور معناداری کاهش یافته است و از ۴۶/۶ به ۴۴/۲ درصد رسید. احتمالاً یکی از دلایل این کاهش تغییرات موضعی pH خاک در اثر اسیدی

این در حالی است که در سطح یک درصد نانوذرات نسبت به سطح صفر در هر دو سطح ۶ و ۱۲ میلی‌گرم کادمیوم کاهش مشاهده شده که نشانگر تاثیر منفی نانو ذرات در سطح پائین بر روی میزان جذب در فاز آلی و در نتیجه نه تنها کاهش در قابلیت دسترسی کادمیوم توسط گیاهان داشته بلکه باعث افزایش قابلیت دسترسی کادمیوم شده است.

ذرات آهن در هر دو سطح ۶ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیوم، روند تغییرات مقدار کادمیوم استخراجی از فاز مواد آلی همناخت بوده که ابتدا کاهش و سپس در سطوح بالای نانو ذرات روند افزایشی مشاهده می‌گردد که این حاکی از تاثیر افزایش نانو ذرات بر تثبیت کادمیوم در سطوح مواد آلی و کاهش قابلیت دسترسی گیاه به کادمیوم می‌باشد، اما



شکل ۶- مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز به مواد آلی

Figure 6- Comparison of the average interactions of cadmium, nanoparticles on the amount of cadmium extracted from phase to organic matter

میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد. در تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده نسبت به کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم روند افزایشی مشاهده می‌گردد.

نکته قابل توجه در نمودار نسبت به نمودارهای قبل در این است که تفاوت تیمارها در سطح صفر کادمیوم با سایر سطوح تیماری کادمیوم در فاز باقیمانده نسبت به سایر فازها کمتر می‌باشد به طوری که میزان کادمیوم جذبی در فاز باقیمانده در دو سطح ۶ و ۱۲ میلی‌گرم کادمیوم بر کیلوگرم خاک کمترین مقادیر را در بین فازهای مختلف جذبی به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نکته قابل توجه دیگر در خصوص این نمودار روند تغییرات کادمیوم استخراجی با توجه به سطوح نانو ذرات در هر سه سطح کادمیوم می‌باشد به طوری که با افزایش نانو ذرات از صفر به ۱ درصد در کلیه سطوح کادمیوم یک روند کاهشی و با افزایش نانوذرات به دو درصد یک روند افزایشی در کلیه سطوح کادمیوم مشاهده می‌شود. در کل در این نمودار مشخص می‌گردد که بخش بسیار کوچکی از کادمیوم موجود در خاک در فاز باقیمانده ابقا شده و نیز اثر سطوح ۱ درصد نانو ذرات بر کاهش میزان کادمیوم قابل دسترس نسبت

صبوری و همکاران (Sabouri *et al.*, 2014) در تحقیقات خود گزارش کردند که به‌طور کلی ۱/۶ درصد از کل سرب خاک شاهد در بخش آلی قرار داشت که در تیمار نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به طرز معناداری افزایش یافته است، اما حضور نانو ذرات هماتیت تاثیر معناداری بر جذب سرب توسط مواد آلی خاک نداشت.

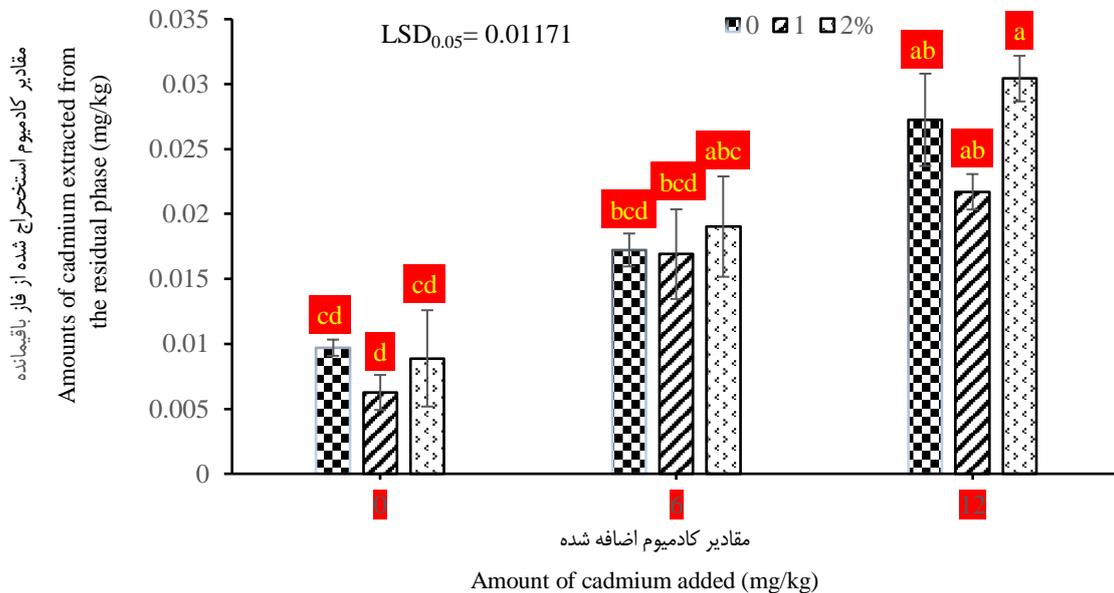
#### کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان داد که اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات در سطح ۱ درصد بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده معنادار می‌باشد. شکل ۷ نمودار مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده را نشان می‌دهد.

بیشترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۲ درصد نانو ذرات با میانگین ۰/۰۳۰۴۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم و کمترین مقدار کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده مربوط به تیمار کادمیوم در سطح ۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم با ۱ درصد نانو ذرات با میانگین ۰/۰۱۶۹۱

مشاهده می‌گردد به استثناء فاز تبادلی که این امر بیانگر این است که با افزایش مقدار کادمیوم فازهای خاکی در جهت کاهش قابلیت دسترسی کادمیوم برای گیاه عمل می‌نمایند.

به سطح ۲ درصد نانو ذرات کمتر و ابقا کادمیوم در سطح ۲ درصد در فاز باقیمانده بهتر عمل می‌نماید. در مقایسه کلی بین اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش مقدار کادمیوم تثبیت کادمیوم در فازهای تثبیت کننده افزایش چشمگیری



شکل ۷- مقایسه میانگین اثرات متقابل کادمیوم و نانو ذرات بر مقادیر کادمیوم استخراج شده از فاز باقیمانده

Figure 7- Comparison of the average interactions of cadmium, nanoparticles on the amount of cadmium extracted from the residual phase

این نتیجه با تحقیقات صبوری و همکاران (Sabouri *et al.*, 2014) مطابقت دارد به طوری که این محققان گزارش کردند که افزودن پودرهای آهن موجب تغییر مقدار نسبی سرب بخش باقیمانده نسبت به شاهد شد و مقدار نسبی سرب در بخش باقیمانده خاک به طور متوسط ۸/۳ درصد بود که در تیمار نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی و نانو ذرات هماتیت به ترتیب به ۱۳/۶ و ۱۰/۸ درصد افزایش یافت. این در حالی است که طبق تحقیقات حمزه نژاد و همکاران (Hamzeh *et al.*, 2018) کاربرد نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی تاثیر معناداری بر بخش باقیمانده نداشت.

نتیجه گیری در مقایسه کلی بین اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات می‌توان به

### نتیجه گیری

در مقایسه کلی بین اثرات متقابل کادمیوم، نانو ذرات می‌توان به

### منابع

1. Bagherifam, S., Lakzian, A., Fotovat, A., Khorasani, R., & Komarneni, S. (2014). In situ stabilization of As and Sb with naturally occurring Mn, Al and Fe oxides in a calcareous soil: bioaccessibility, bioavailability and speciation studies. *Journal of Hazardous Materials*, 273, 247-252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.054>
2. Bower, C.A., Reitemeier, R.F., & Fireman, M. (1954). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science*, 73(4), 251-261.
3. Brown, S., Chaney, R.L., Hallfrisch, J.G., & Xue, Q. (2003). Effect of biosolids processing on lead bioavailability in

- an urban soil. *Journal of Environmental Quality*, 32(1), 100-108.
4. Burton, K.W., King, J.B., & Morgan, E. (1986). Chlorophyll as an indicator of the upper critical tissue concentration of cadmium in plants. *Water, Air, and Soil Pollut*, 27, 147-154.
  5. Ceribasi, I.H., & Yetis, U. (2001). Biosorption of Ni(ii) and Pb(ii) by *Phanerochaete chrysosporium* from binary metal system-kinetics. *Water SA*, 27(1), 15-20.
  6. Cook, M.E., & Morrow, H. (1995). *Anthropogenic sources of cadmium in Canada, National Workshop on cadmium transport into plants*. Canadian Network of Toxicology Centres, Ottawa, Ontario, Canada. June 20-21.
  7. Contin, M., Mondini, C., Leita, L., & De Nobili, M. (2007). Enhanced soil toxic metal fixation in iron (hydr) oxides by redox cycles. *Geoderma*, 140(1-2), 164-175.
  8. Davis, R.D., Beckett, P.H.T., & Wollan, E. (1978). Critical levels of twenty potentially toxic elements in young spring barley. *Plant and Soil*, 49, 395-408
  9. Erfan Manesh, M., & Afyouni, M. (2008). *Environment, water, soil and air pollution*, Publications of Arkan Danesh, Isfahan. (In Persian)
  10. Farrokhian Firoozi, A., Amiri Mohammad, J., Hamidifar, H., & Bahrami, M. (2016). Degeneration of cadmium in soil using magnetite nanoparticles stabilized with sodium dodecyl sulfate. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*, 31(1), 241-253. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22067/jsw.v31i1.50713>
  11. Gee, G.W., & Or, D. (2002). *2.4 Particle-size analysis*. Methods of Soil Analysis. Part 4(598): 255-293.
  12. Hamzeh Nezhad, R., Sepehr, E., Samadi, A., Sadeghiani, M.H.R., & Khodavardilo, H. (2018). Investigation of the effect of zero valent iron (nZVI) nanoparticles on the mobility and chemical forms of cadmium and lead in soil. *Iranian Soil and Water Research*, 49(3), 559-549. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2018.228119.667634>
  13. Hanauer, T., Felix-Hanningsen, P., Steffens, D., Kalandadze, B., Navrozashvili, L., & Urushadze, T. (2011). In situ stabilization of metals (Cu, Cd, and Zn) in contaminated soils in the region of Bolnisi, Georgia. *Plant and Soil*, 341(1-2), 193-208. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0634-5>
  14. Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. pp: 635-660. In: A. Klute (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 1, Physical and Mineralogical Methods. ASA and SSSA, Madison, WI.
  15. Kumpiene, J., Ore, S., Renella, G., Mench, M., Lagerkvist, A., & Maurice, C. (2006). Assessment of zerovalent iron for stabilization of chromium, copper, and arsenic in soil. *Environmental Pollution*, 144(1): 62-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.010>
  16. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. *Soil Science Society of American Journal*, 42(3), 421- 428.
  17. Liu, R., & Zhao, D. (2007). In situ immobilization of Cu (II) in soils using a new class of iron phosphate nanoparticles. *Chemosphere*, 68(10): 1867-1876. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.010>
  18. Mansouri, T., Golchin, A., & Baba Akbari Sari, M. (2015). Reducing the mobility of arsenic in soil with the help of hematite nanoparticles and acrylic polymers. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 23(6), 79-99. (In Persian with English abstract)
  19. McBride, M.B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press. New York.
  20. McLean, E.O. (1982). Soil pH and lime requirement. pp: 199-224. In: A.L. Page (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. ASA and SSSA, Madison, WI.
  21. Meyer, D., Bhattacharyya, D., Bachas, L., & Ritchie, S. (2005). *Membrane-Based Nanostructured Metals for Reductive Degradation of Hazardous Organics*. In ACS symposium series (Vol. 890, pp. 256-261). Oxford University Press.
  22. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). Total carbon, organic carbon and organic matter. pp: 539-579. In: Page A.L. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. ASA and SSSA, Madison, WI.
  23. Rhoades, J.D. (1996). Electrical conductivity and total dissolved solids. In *Methods of Soil Analysis*, part 3, chemical methods.
  24. Sabouri, F., Fotovat, A., Astaraei, A., & Khorasani, R. (2014). Effect of iron nanoparticles on the distribution of chemical forms of lead in a calcareous soil. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 21(4), 118-99. (In Persian with English abstract)
  25. Tessier, A., Campbell, P.G.C., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51(7), 844-851.
  26. Zavareh, S.S., & Behrozi, Z. (2016). *Removal of phosphate from natural waters using copper-saturated magnetic chitosan nanocomposite*. The first seminar on applied chemistry in Iran. Faculty of Chemistry, University of Tabriz. (In Persian)
  27. Zhang, W.X. (2003). Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview. *Journal of Nanoparticle Research*, 5(3-4), 323-332.



## Spatial Soil Erosion Risk at the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran

S.H.R. Sadeghi<sup>1\*</sup>, M. Kalehhouie<sup>2</sup>, A. Noori<sup>3</sup>, N. Naderi Marangalo<sup>4</sup>, M. Havasi<sup>5</sup>, A. Payfeshoordeh<sup>6</sup>, M. Khairparast<sup>7</sup>, S. Mostafaei Younjali<sup>8</sup>, Z. Pirooznia<sup>9</sup>, M. Hamzeh Bibalani<sup>10</sup>

Received: 24-01-2023

Revised: 27-06-2023

Accepted: 08-07-2023

Available Online: 10-07-2023

### How to cite this article:

Sadeghi, S.H.R., Kalehhouie, M., Noori, A., Naderi Marangalo, N., Havasi, M., Payfeshoordeh, A., Khairparast, M., Mostafaei Younjali, S., Pirooznia, Z., & Hamzeh Bibalani, M. (2023). Spatial soil erosion risk at the Brimvand watershed in Kermanshah province, Iran. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 443-456. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80775.1247>

### Introduction

Soil erosion is considered as one of the critical threats to the conservation of water and soil resources. However, until now, its various components, including its spatial changes, have yet to be given due attention. In order to implement soil erosion control and conservation programs in the watershed, it is essential to have basic information leading to know and accurately identify the factors affecting the degradation of soil and water resources. Meanwhile, the CORINE model has been considered as one of the practical models for estimating soil erosion and displaying the spatial distribution of soil erosion with easy and accessible inputs. The CORINE model developed based on the Universal Soil Loss Equation (USLE) was therefore employed in the present study in the GIS environment to determine the potential and actual erosion risks of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran.

### Materials and Methods

The main associated factors of soil erosion, viz. soil erodibility and erosivity, such as slope, vegetation, depth, texture, and percentage of gravel, were collected, compiled, and ultimately classified in the ArcGIS software. The Fournier index (FI) and FAO-UNEP drought index (DI) were used to prepare the input maps. The Fournier index reflects the performance of the soil erosive agent. In other words, it shows the role of rainfall on soil erosion. The FAO-UNEP drought index shows the simultaneous performance of evaporation and precipitation on soil erosion of a region. The potential soil erosion risk was obtained by combining slope, erodibility, and erosivity layers. In addition, the actual soil erosion risk map was determined by combining the vegetation map and potential soil erosion risk.

### Results and Discussion

Based on the results of the vegetation distribution in the region, the use of rainfed and abandoned lands had the largest area in the watershed, with an occupation percentage of 65.48%. Furthermore, the rangeland and forest areas, with respective coverage of 29.65 and 4.87%, stood in the second and third priority from the viewpoint of the area. The region has varying slopes, but more importantly, it has a low slope. Soil texture, depth, and gravel

1- Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor 46417-76489, Iran

(\*- Corresponding Author Email: [sadeghi@modares.ac.ir](mailto:sadeghi@modares.ac.ir))

2- Former Ph.D. Student, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University.

3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 and 10- M.Sc. Students, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University

DOI: [10.22067/jsw.2023.80775.1247](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.80775.1247)

content significantly affect the area's erosion. The soil depth in a large part of the watershed, especially with a slope of less than 4% is more than 65 cm where it is mainly covered by abandoned and rainfed lands. In the studied area, the depth of the soil decreases with height increase, which indicates that the high slopes of the area are dominantly outcrops. Most of the area has gravel contents between 10 and 40%. The erosion potential of the region is not that much high because of the desired features of the affecting factors. According to the potential soil erosion risk, it was determined that about 65.57, 23.62, and 10.81% of the area were classified as intermediate, low, and high erosion potential, respectively. Further, the actual soil erosion risk was categorized as low, intermediate, and high with respective areal coverage of 53.83, 15.53, and 30.64%. It is therefore implied that the amount of erosion and sediment transfer will increase if the land cover in the watershed is declined. This indicates that the erosion rate was highest in hilly areas due to lack of vegetation and soil with loamy texture. Accordingly, to curb soil erosion and prevent its associated adverse effects in the Brimvand watershed, it is strongly suggested to use lands based on their capability and potential, maintain the present cover status, and carry out management plans to restore vegetation.

## Conclusion

Soil erosion remains one of the most critical challenges in watersheds, and its neglect can lead to various problems for the beneficiaries. In light of this, the present study aimed to address this issue by employing the CORINE model to assess potential and actual soil erosion in the Brimvand Watershed of Kermanshah Province, Iran. The research findings reveal the pivotal role of vegetation in mitigating soil erosion. Notably, areas with gentle slopes, which are inherently susceptible to erosion, benefit significantly from vegetation cover, leading to a noticeable reduction in erosion. However, the loss of this protective cover can trigger a rapid increase in soil erosion and subsequent loss of valuable soil resources. By shedding light on the spatial distribution of soil erosion, this study emphasizes the importance of preserving and promoting vegetation in the watershed to ensure its long-term sustainability and safeguard the well-being of those who depend on it. Therefore, land utilization should be planned based on capacity and potential of the land to curb erosion and avoid its detrimental impacts in the Brimvand Watershed. In addition, not only the current cover situation has to be maintained but also the vegetation conditions have to be improved through the implementation of managerial and reclamation plans leading to managing soil erosion.

**Keywords:** Erosion models, Land capability, Land degradation, Soil erosion map, Vegetation management

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۴۳-۴۵۶

## تغییرات مکانی خطر فرسایش خاک در حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه

سیدحمیدرضا صادقی<sup>۱\*</sup> - مهین کله هوئی<sup>۲</sup> - علی نوری<sup>۳</sup> - نسترن نادری مرنگلو<sup>۴</sup> - معصومه هواسی<sup>۵</sup> - آراسته پای فشرده<sup>۶</sup> - مهدی خیرپرست<sup>۷</sup> - سحر مصطفایی یونجالی<sup>۸</sup> - زینب پیروزیانیا<sup>۹</sup> - معصومه حمزه‌بی بالانی<sup>۱۰</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

### چکیده

فرسایش خاک یکی از تهدیدهای مهم برای حفاظت از منابع آب‌و خاک به شمار می‌رود. حال آن‌که تاکنون مؤلفه‌های مختلف آن از جمله تغییرات مکانی مورد توجه لازم قرار نگرفته است. هدف اصلی این پژوهش تعیین خطر فرسایش بالقوه و بالفعل حوزه آبخیز بریموند استان کرمانشاه با استفاده از مدل CORINE و در سامانه اطلاعات جغرافیایی بوده است. اطلاعات مورد نیاز مربوط به عوامل اصلی فرسایش خاک شامل فرسایش‌پذیری و فرساینده‌گی خاک از جمله شیب، پوشش گیاهی، عمق، بافت، درصد سنگریزه تهیه و در محیط ArcGIS تلفیق و طبقه‌بندی شد. در نهایت نقشه پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک به ترتیب از تلفیق نقشه‌های فرسایش‌پذیری، فرساینده‌گی و شیب تهیه شد. سپس نقشه فرسایش واقعی خاک از تلفیق نقشه پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک و پوشش گیاهی به دست آمد. مطابق نتایج مربوط به پراکنش پوشش گیاهی مختلف در منطقه، مجموع کاربری دیم و بایر با مساحت ۶۵/۴۸ درصد بیش‌ترین مساحت را به خود اختصاص داده است. علاوه بر آن، پوشش‌های مرتع و جنگل نیز با گستره سطحی ۲۹/۶۵ و ۴/۸۷ درصد، به ترتیب دومین و سومین مساحت از پوشش گیاهی در منطقه را داشتند. مطابق نقشه پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک مشخص شد که به ترتیب حدود ۶۵/۵۷، ۲۳/۶۲ و ۱۰/۸۱ درصد از وسعت منطقه در محدوده پتانسیل فرسایش متوسط، کم و زیاد قرار گرفته است. هم‌چنین فرسایش واقعی خاک به ترتیب ۵۳/۸۳، ۱۵/۵۳، ۳۰/۶۴ درصد در محدوده کم، متوسط و زیاد قرار دارد. بر همین اساس و در راستای مهار فرسایش و جلوگیری از اثرات منفی و توسعه آن در حوزه آبخیز بریموند، استفاده از اراضی متناسب با توانایی و استعداد آن‌ها، حفظ وضعیت پوشش فعلی و انجام طرح‌های مدیریتی باهدف احیا پوشش گیاهی پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** استعداد اراضی، تخریب زمین، مدل‌های فرسایش، مدیریت پوشش گیاهی، نقشه فرسایش

۱- استاد گروه مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

(\* - نویسنده مسوول: Email: sadeghi@modares.ac.ir)

۲- دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰- دانشجویان کارشناسی‌ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس

## مقدمه

خاک از مهم‌ترین منابع طبیعی هر منطقه محسوب و همواره متعاقب تقاضای روزافزون جوامع بشری، به دلیل نیاز به شهرسازی، معدن، گردشگری، دست‌خوش تغییرات قرار می‌گیرد. فرسایش خاک، یکی از عوامل مهم در تخریب خاک و یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیط‌زیستی است که منابع خاک و آب را به‌طور جدی تهدید می‌کند (Sadeghi, 2006; Borrelli et al., 2021)؛ به‌طوری که World Bank (2005) مقدار خسارت ناشی از مجموعه عوامل تخریب را در ایران حدود ۱۰ میلیارد دلار در سال برآورد کرده است که اهمیت فراوان اقتصادی تخریب خاک را نیز نشان می‌دهد. مقدار فرسایش آبی خاک کشور، بر اساس نقشه شدت فرسایش تهیه‌شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری تقریباً ۹۷۶ میلیون تن در سال برآورد شده است (Arabkhedri et al., 2018). در بسیاری از مناطق، فرسایش خاک باعث کاهش کیفیت و کمیت عناصر غذایی خاک شده (Quinton et al., 2010) و با افزایش تولید هزینه مواد غذایی، خسارات زیادی را به وجود می‌آورد (Telles et al., 2011).

به‌منظور اجرای برنامه‌های حفاظت و مهار فرسایش خاک در حوزه آبخیز، داشتن اطلاعات پایه در راستای شناخت و شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر تخریب منابع خاک و آب امری ضروری است (Sadeghi, 2010; Karimi et al., 2022). به همین دلیل، پژوهش‌گران برای تعیین میزان فرسایش خاک و تولید رسوب از مدل‌های متعددی از جمله WSM (Motalebnejad et al., 2016) RHEM (Faleh Giri et al., 2011)، AOF و MUSLE (Rahmati et al., 2014)، ICONA (Sadeghi et al., 2021) SLEMSA (Heydari et al., 2022)، USPED و G2 (Mohammadi et al., 2017; Rahmani et al., 2021)، RUSLE (Zakiri Nejad & Falah, 2022)، IntEro (Kalehhouei et al., 2019) و RUSLE و USPED (Mohammadi et al., 2018) در این زمینه استفاده کرده‌اند. اعتبارسنجی هر یک از مدل‌های موردنظر برای تطبیق نتایج با واقعیت امری ضروری است، که امروزه با توجه به پیشرفت فناوری و استفاده از سامانه‌های مختلف از جمله Google Earth با قابلیت دسترسی سریع به تمام نقاط منطقه مورد مطالعه و هزینه کم همراه با دقت بالا زمینه لازم برای اعتبارسنجی مدل‌های کیفی را فراهم کرده است (La Licata et al., 2023; Sadeghi et al., 2008; Najafi et al., 2021). در این بین، مدل یا روش CORINE<sup>۱</sup>، به‌عنوان یکی از مدل‌های

کاربردی تخمین فرسایش خاک و نمایش توزیع مکانی فرسایش خاک با ورودی‌های زودپافت و قابل‌دسترس موردتوجه قرار گرفته است. این مدل بر پایه معادله جهانی هدررفت خاک (USLE) توسعه‌یافته است. مفهوم مدل مذکور نخستین بار توسط Krikby در سال ۲۰۰۱ به‌کاربرده شده است. به‌منظور محاسبه فرسایش واقعی خاک، از عوامل فرسایش‌پذیری باران<sup>۲</sup>، فرسایش‌پذیری خاک<sup>۳</sup>، شیب و پوشش گیاهی یا کاربری اراضی استفاده می‌شود. این مدل می‌تواند فرسایش را با وضوح مکانی پیش‌بینی کند. اطلاعات پوشش گیاهی یک ورودی مهم در رویکرد مزبور محسوب می‌شود (Evrendilek et al., 2007).

مطالعات فراوانی در زمینه به‌کارگیری مدل CORINE برای محاسبه فرسایش خاک انجام شده است (Aydın and Tecimen, 2010; El-Nady et al., 2017; Kucsicsa et al., 2017; Yousif et al., 2020; Khallouf et al., 2021; Akbari et al., 2022) که می‌توان به برخی از این مطالعات اشاره نمود. بشیر و همکاران (Bashir et al., 2013) با استفاده از مدل CORINE در حوزه آبخیز راوال پاکستان بیان کردند که این مدل به همراه سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور برای ارزیابی فرسایش خاک کارآمد است. علاوه بر این گیوربیانو و همکاران (Gurebiyaw et al., 2018)، به ارزیابی میزان حساسیت خاک در برابر فرسایش با استفاده از مدل CORINE در یک آبخیز در اتیوپی پرداختند که نتایج حاکی از آن است که فقط بخش کوچکی از منطقه مورد مطالعه در طبقه خطر فرسایش متوسط تا زیاد واقع شده است. علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده از مدل می‌تواند در مناطق پرخطر در حفاظت آب‌و خاک نقش داشته باشد. انتظاری و غلام‌حیدری (Entezari and Gholam Heydari, 2014)، به بررسی شدت فرسایش و عوامل مؤثر در آن و مقایسه دو مدل SLEMSA و CORINE در حوزه آبخیز تنگ سرخ شیراز پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش مذکور نشان داد که مدل CORINE با توجه به این‌که به جزئیات بیش‌تری می‌پردازد از دقت بیش‌تری برخوردار بوده و شیب مهم‌ترین عامل در افزایش میزان فرسایش در آبخیز بوده است. در طی پژوهشی دیگر، اکبری و همکاران (Akbari et al., 2016)، خطر فرسایش خاک بر اساس مدل CORINE در منطقه نیمه‌بیابانی غرب استان گلستان را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که از نظر پتانسیل خطر، به ترتیب حدود ۲۳، ۵۴ و هفت درصد از منطقه دارای پتانسیل فرسایشی کم، متوسط و زیاد بوده است. از سویی دیگر، از نظر خطر واقعی نیز به ترتیب ۵۴، ۲۵ و دو درصد مساحت منطقه در خطر کم، متوسط و زیاد قرار داشته است. محمدی و همکاران

- 1- Soil erosion
- 2- Coordination of Information on the Environment
- 3- Rain Erosivity
- 4- Soil Erodibility

آن است که دی و مرداد به ترتیب سردترین و گرم‌ترین ماه سال بوده است. هم‌چنین کم‌ترین و بیش‌ترین تبخیر نیز به ترتیب در دی و تیر گزارش شده است. منطقه مورد مطالعه دارای انواع کاربری‌های اصلی عمدتاً شامل زراعت‌های آبی، دیم، مرتع و جنگل است. جهت شبکه زهکشی از شرق به غرب است. محدوده مورد مطالعه به لحاظ زمین‌شناسی و زمین‌ساختی در زاگرس چین‌خورده قرار می‌گیرد. تشکیلات و واحدهای سنگی و رسوبی موجود در منطقه مورد نظر، متعلق به کرتاسه تا عهد حاضر است. واحد تراس و پادگانه آبرفتی بلند (Qt2) با مساحت ۵۹۰۷/۲۳ هکتار معادل ۶۰/۵۶ درصد از کل آبخیز بیش‌ترین گسترش را در محدوده مورد مطالعه دارد و کم‌ترین گسترش نیز با مساحت ۱۲/۴۷ هکتار مربوط به واحد سنگ‌آهک دولومیتی (EL) است که تنها ۰/۱۳ درصد از کل محدوده را دربر می‌گیرد. شکل ۱، موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

### روش پژوهش

#### تهیه لایه‌ها و اطلاعات مورد نظر

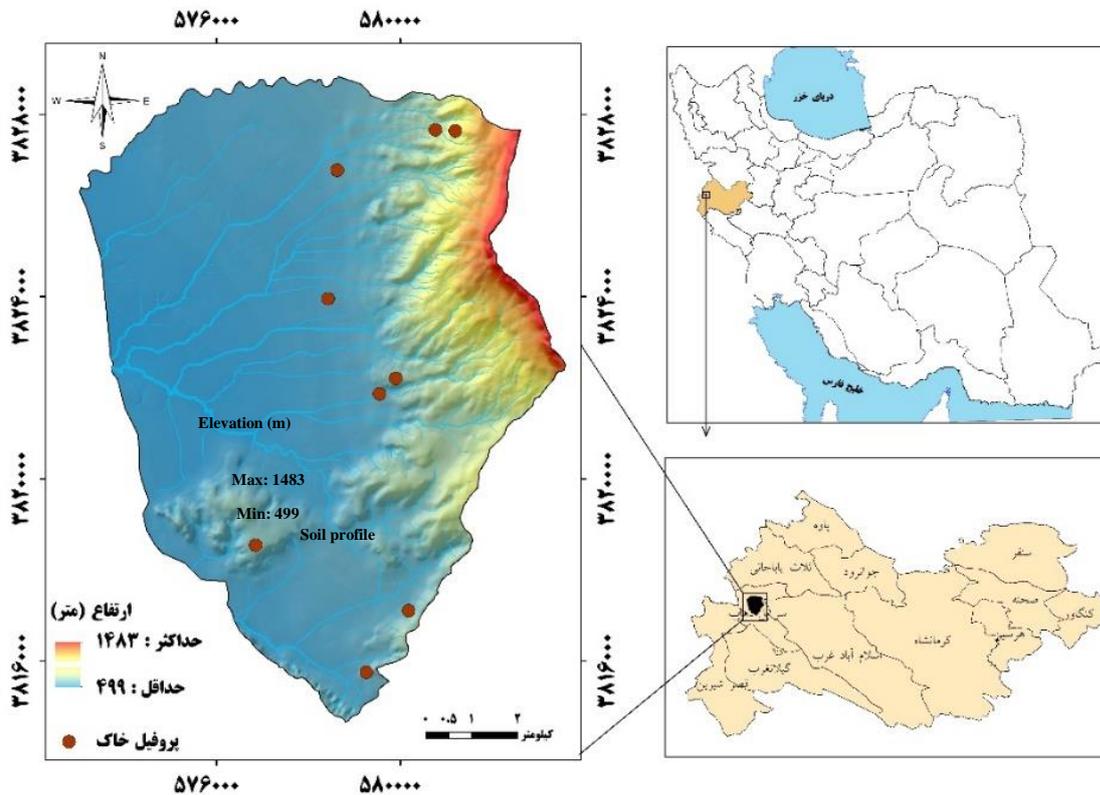
مطابق مراحل و روند اجرایی پژوهش و کاربست مدل موجود در شکل ۲، نخست لایه‌های اطلاعاتی با داشتن نقشه‌های پایه، اعم از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ و زمین‌شناسی رقمی شده با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ حوزه آبخیز بریموند به ترتیب از سازمان‌های جغرافیایی نیروهای مسلح، سازمان نقشه‌برداری کشور، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور اخذ شد. با استفاده از نقشه مدل رقمی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر، نقشه شیب تهیه شد. از آنجایی که برای برآورد میزان خطر فرسایش واقعی، نیازمند محاسبه میزان فرسایش بر پایه پوشش گیاهی منطقه است (Mokhtari et al., 2019; Asghari Saraskanrood et al., 2019)، از این رو، نقشه مورد نظر از اداره منابع طبیعی استان کرمانشاه تهیه و در سه طبقه پوشش گیاهی، حفاظت‌شده مانند جنگل‌ها، نیمه حفاظت‌شده مانند مراتع و فاقد حفاظت مانند اراضی بایر و مناطق زراعی و اراضی کشاورزی طبقه‌بندی شد. به منظور محاسبه شاخص فرسایش‌پذیری خاک، نقشه‌های بافت، عمق و سنگریزه خاک در نه نیم‌رخ حفر شده در محدوده مورد مطالعه در محیط سامانه ArcGIS 10 مطابق امتیازهای مورد نظر مدل طبقه‌بندی شد (CORINE, 1992; Aldabaa, 2020). لازم به ذکر است که مناطق با عمق خاک کم‌تر از ۱۰ سانتی‌متر روی لایه‌ای محدودکننده جزء اراضی متفرقه طبقه‌بندی شدند (Ayubi and Jalalian, 2010). علاوه بر آن، عمق خاک بیش‌ازحد آستانه مزبور نیز در سه گروه عمق خاک کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد.

(Mohammadi et al., 2016)، نیز مطالعه‌ای با تحلیل عوامل مؤثر بر وضعیت فرسایش و تولید رسوب در منطقه غرب اصفهان با استفاده از مدل CORINE انجام دادند. نتایج مطالعات نشان داد که سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور را برای ارزیابی خطر فرسایش خاک مناسب دانستند. صادق کمالی و همکاران (Sadegh Kamali et al., 2018)، با استفاده از مدل CORINE در حوزه آبخیز پروان، افغانستان نشان دادند که میزان شدت خطر فرسایش در منطقه مورد مطالعه زیاد است. تاریپناه و همکاران (Taripناه et al., 2020)، در پژوهشی به بررسی خطر پتانسیل واقعی فرسایش در منطقه خارستان، استان فارس با استفاده از مدل CORINE در تلفیق با سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش‌ازدور پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که در کل، منطقه مورد مطالعه از نظر خطر فرسایش بیش‌تر در طبقه متوسط تا زیاد قرار گرفته است و مناطق با خطر واقعی فرسایش کم و متوسط در بخش جنوبی، مرکزی و شرقی منطقه و مناطق با خطر واقعی زیاد در بخش جنوب شرقی، غرب و شمال غربی بوده است. اخیراً نیز اکبری و همکاران (Akbari et al., 2022)، خطر فرسایش خاک در شمال شرق ایران را بر اساس خطرهای بالقوه و بالفعل فرسایش خاک با استفاده از مدل CORINE ارزیابی کردند. تجزیه و تحلیل حساسیت نشان داد که خطر فرسایش بالقوه خاک بیش‌ترین حساسیت را به بافت، شیب و عمق خاک داشته است. هم‌چنین، عامل پوشش گیاهی نقش مهمی در تعیین خطر واقعی فرسایش خاک ایفا کرده است. در نهایت کارایی مدل CORINE در ارائه اقدامات مدیریتی برای مناطق در معرض تهدید فرسایش خاک تأیید شد. در چند دهه اخیر تهیه اطلاعات تفصیلی و درک صحیح سامانه‌های آبخیز و نیز شرایط حاکم بر چرخه هیدرولوژی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر برای مدیریت جامع و همه‌جانبه حوزه‌های آبخیز محسوب می‌شود (Kiani Harchegani et al., 2018). بدین سبب با توجه به اهمیت فرسایش خاک، این پژوهش باهدف بررسی کارایی مدل CORINE در حوزه آبخیز بریموند واقع در استان کرمانشاه به سبب وجود پیشینه پژوهشی مناسب و هم‌چنین دسترسی به اطلاعات مورد نیاز برنامه‌ریزی شد.

### مواد و روش

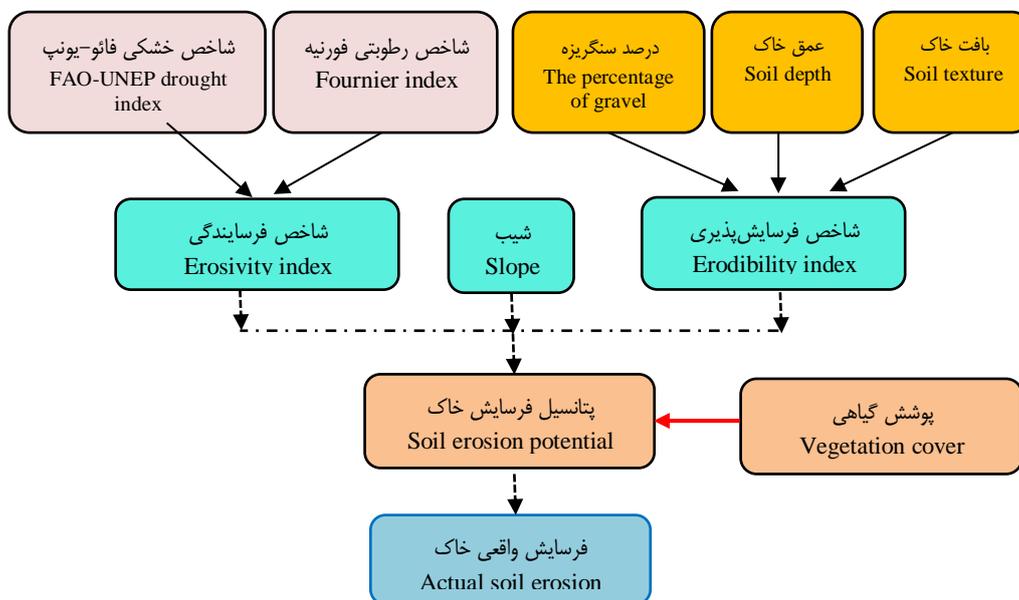
#### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز بریموند با مساحت ۹۷۵۴/۵ هکتار در استان کرمانشاه، شهرستان سرپل ذهاب، بخش مرکزی و در دهستان‌های دشت ذهاب و حومه سرپل و مساحت اندکی از جنوب شرقی حوزه در دهستان به شیوه پلاطی قرار گرفته است. حداکثر و حداقل ارتفاع محدوده به ترتیب ۱۴۸۲/۹ و ۴۹۸/۶ متر از سطح دریاست. میانگین سالانه دما و بارندگی در آبخیز مزبور ۱۹/۴ درجه سانتی‌گراد و ۴۵۴/۲ میلی‌متر است (Jalili et al., 2006; Sadeghi et al., 2009). رژیم‌های حرارتی، حاکی از



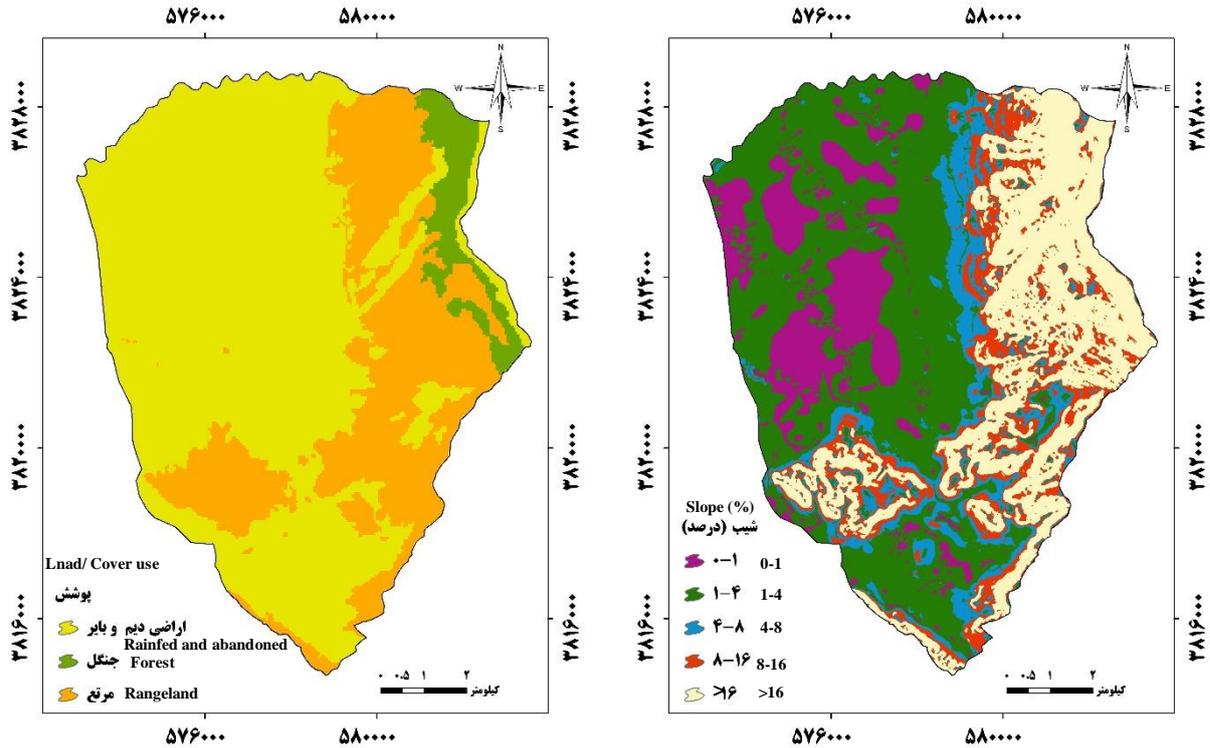
شکل ۱- موقعیت و شمای کلی حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه و ایران

Figure 1- Location and overview of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province and Iran



شکل ۲- نمایی از روند انجام مدل CORINE (Evrendilek et al., 2007)

Figure 2- A view of the process in the CORINE model (Evrendilek et al., 2007)

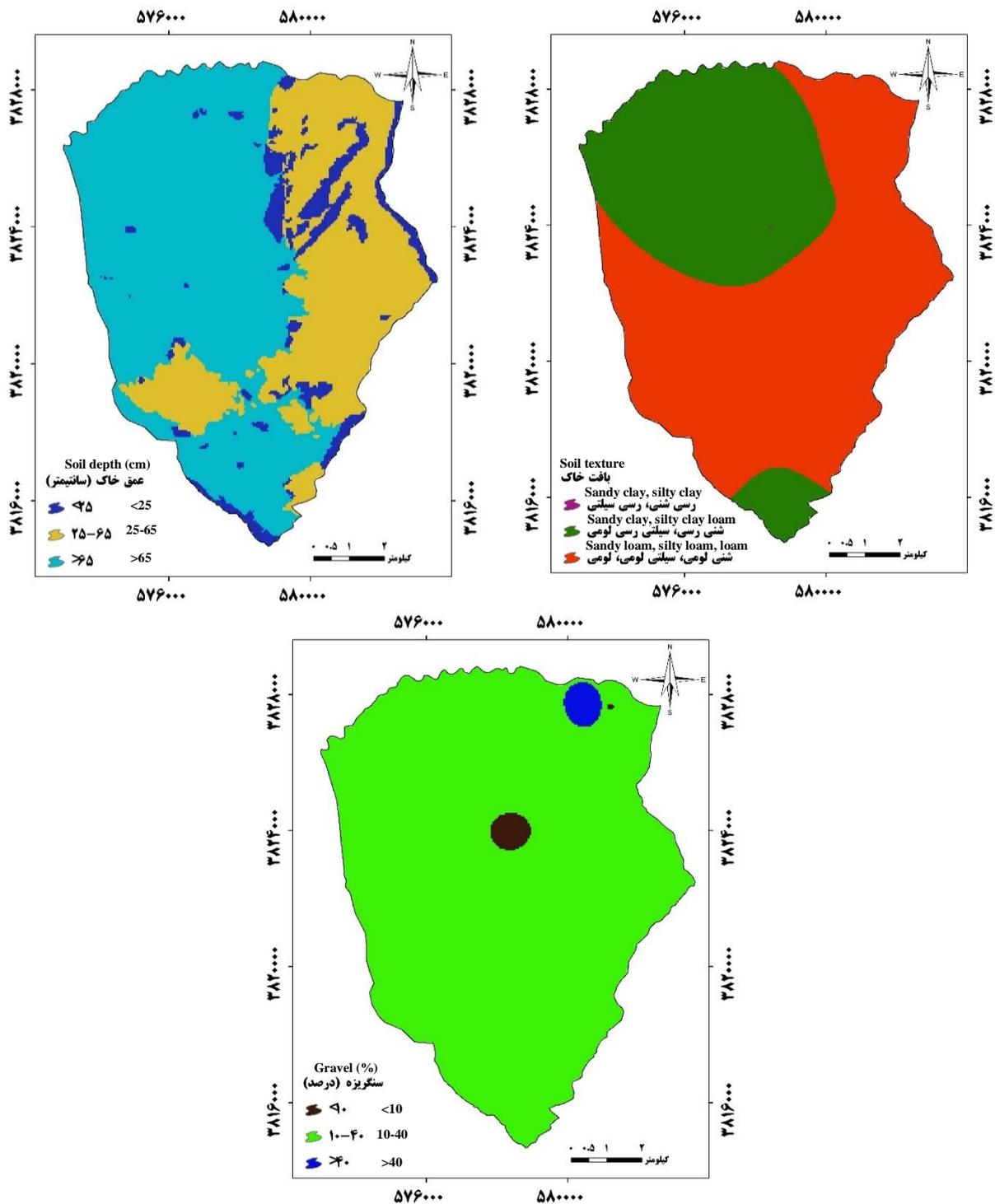


شکل ۳- نقشه شیب (راست) و پوشش گیاهی / زمین (چپ) حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه  
Figure 3- Slope (right) and land/cover (left) map of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran

رابطه (۲)  $DI = \frac{P}{ETP}$  در این رابطه  $p_i$  بارندگی مرطوب‌ترین ماه سال،  $P$  متوسط بارش سالانه (میلی‌متر) و  $ETP$  متوسط تبخیر و تعرق سالانه (میلی‌متر) است. پس از انجام محاسبات مربوط به شاخص فورنیه و شاخص خشکی، به‌منظور برآورد و تخمین میزان شاخص فرسایش‌دهندگی، با استفاده از ضرب ارزش‌های عددی با دستور تابع SPLINE موجود در سامانه ArcGIS شاخص فرسایش‌دهندگی به دست آمد (Giordano, 2009). در مرحله بعدی پتانسیل فرسایش خاک، با تلفیق نقشه‌های شیب، فرسایش‌پذیری و فرسایش‌دهندگی با دستور Raster calculator و سپس Reclassify در سامانه ArcGIS به دست آمد. درنهایت با توجه به همین مراحل، نقشه پتانسیل فرسایش خاک و پوشش گیاهی به‌منظور تهیه نقشه فرسایش واقعی خاک با یکدیگر تلفیق شدند. اعتبارسنجی توزیع مکانی فرسایش خاک در آبخیز مطالعاتی نیز با استفاده از ارزیابی‌ها و تحلیل‌های مقایسه‌ای چشمی تصاویر Google Earth صورت گرفت. طبیعی است که بازدید صحرائی بدون اندازه‌گیری نمی‌تواند به‌صورت کمی میزان فرسایش را تعیین و محاسبه کند.

مطابق طبقه‌بندی اداره کشاورزی ایالات‌متحده (USDA)، بافت خاک در سه گروه خاک با فرسایش‌پذیری کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی شد. همچنین مقدار سنگ‌ریزه خاک نیز به دو گروه خاک کاملاً پوشیده از سنگ‌ریزه و فاقد سنگ‌ریزه دسته‌بندی شد. درنهایت با تلفیق این سه نقشه، نقشه فرسایش‌پذیری خاک با دستور Raster calculator و سپس Reclassify در سامانه ArcGIS به دست آمد (Mingarro and Lobo, 2023). نقشه‌های شیب، پوشش سطح زمین، و بافت، عمق و سنگ‌ریزه سطحی خاک در شکل‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. سپس برای تهیه نقشه فرسایش‌دهندگی باران، از شاخص فورنیه (FI) و شاخص خشکی فائو-یونپ<sup>۱</sup> (DI) به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) استفاده شد (Dengiz & Akgül, 2005). شاخص فورنیه، منعکس‌کننده عملکرد عامل فرسایش‌دهنده خاک است. به‌عبارتی دیگر میزان نقش عامل بارش را در فرسایش‌دهندگی خاک نشان می‌دهد. شاخص خشکی فائو-یونپ بیانگر عملکرد هم‌زمان تبخیر و بارش در فرسایش‌دهندگی یک منطقه است (Sepehr and Honarmandnejad, 2012). به‌منظور محاسبه شاخص‌های موردنظر از آمار بارش و تبخیر و تعرق ایستگاه‌های هواشناسی طی یک دوره ۲۵ ساله منتهی به سال ۱۳۹۶ منطقه مورد مطالعه استفاده شد.

$$FI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۴- نقشه بافت (راست‌بالا)، عمق (چپ‌بالا) و سنگریزه (پایین) خاک حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه  
 Figure 4- Map of soil texture (top right), depth (top left) and gravel (bottom) of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran

فرسایش در نظر گرفت. به‌عبارت‌دیگر بازدیدهای صحرائی دلایل و شواهد لازم برای ارزیابی نسبی صحت نتایج به‌دست‌آمده را ارائه

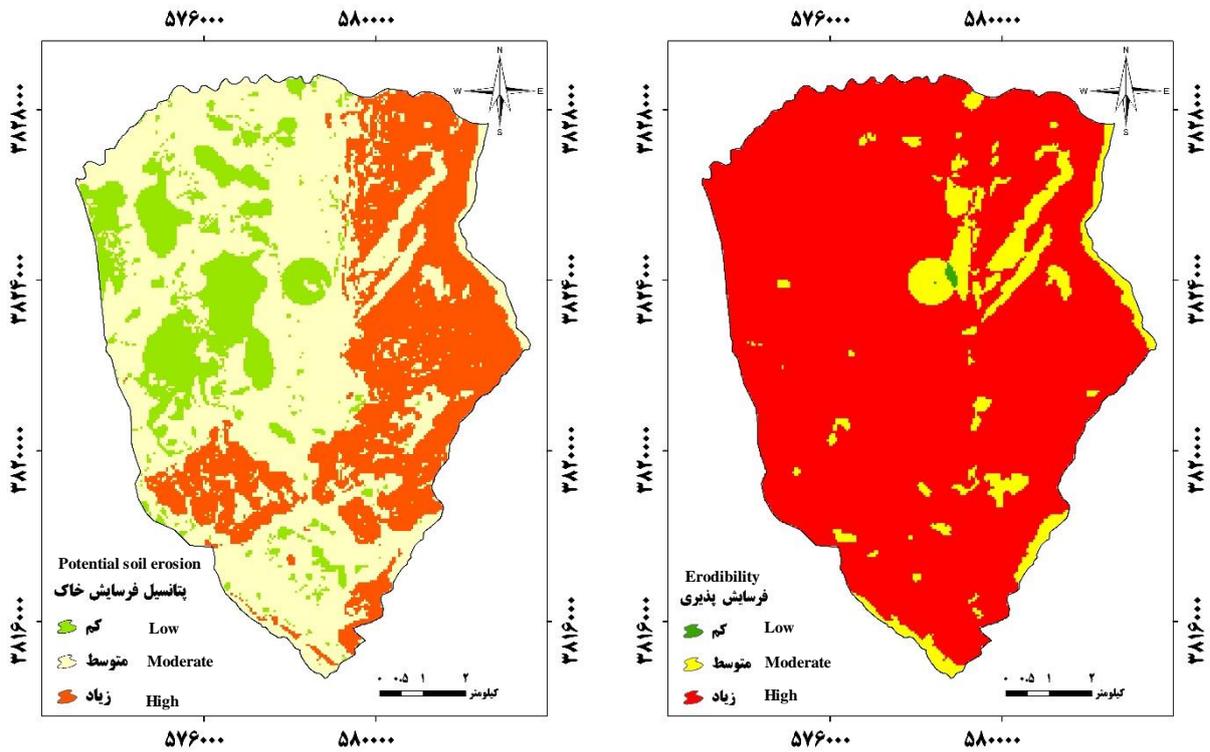
ولی باید در نظر داشت که داده‌های مشاهداتی در بازدیدهای صحرائی از داده‌های بااهمیتی هستند که باید در تعیین وضعیت

مورد مطالعه با افزایش ارتفاع از عمق خاک کاسته می‌شود که نشان‌دهنده سنگلاخی بودن منطقه در شیب‌های بالاست. مطابق شکل ۴، بیش از ۹۵ درصد منطقه دارای ۱۰ تا ۴۰ درصد سنگریزه است. بافت خاک، عمق و درصد سنگریزه تأثیر قابل توجهی در فرسایش‌پذیری منطقه دارند. بر همین اساس و مستند به شکل ۵ راست، پتانسیل فرسایش‌پذیری منطقه با توجه به ویژگی‌های مورد نظر بالاست. مطالعه اکبری و همکاران (Akbari et al., 2022)، در خاک‌های شمال شرق ایران نشان داد که عمق، بافت خاک و پوشش گیاهی تأثیر زیادی بر پتانسیل فرسایش‌پذیری خاک دارد که نتایج این پژوهش را تأیید می‌کند. پس از تلفیق لایه شیب، فرسایش‌پذیری و فرسایش‌پذیری مشخص شد که در مناطق کم شیب پتانسیل فرسایش خاک کم و متوسط و در ارتفاعات نسبت به سایر بخش‌ها زیاده‌تر است. به طوری که تقریباً ۶۵/۵۷٪ و ۲۳/۶۲٪ از ۱۰/۸۱ درصد از وسعت منطقه در محدوده پتانسیل فرسایش متوسط، کم‌زیاد قرار گرفته است (شکل ۵ چپ). شکل ۶ نیز بیانگر آن است که در شرایط فعلی وجود پوشش مناسب زراعی در اراضی با شیب کم با ایجاد یک لایه حفاظتی در سطح خاک از میزان فرسایش کاسته است، لذا با توجه به نقشه فرسایش واقعی خاک به ترتیب سطوح فرسایشی منطقه ۵۳/۸۳، ۱۵/۵۳، ۳۰/۶۴ درصد در محدوده کم، متوسط و زیاد قرار دارند. در صورت از بین رفتن پوشش سطح زمین در آبخیز به میزان فرسایش و انتقال رسوب افزوده خواهد شد. این امر نشان‌دهنده آن است که در مناطق دامنه‌ای به دلیل عدم استقرار پوشش گیاهی و خاک با بافت لومی میزان فرسایش بالاترین حد خود را داشته است. در مناطق با شیب زیاد ولی با پوشش جنگلی و مرتعی میزان فرسایش کم‌تر نسبت به سایر بخش‌های پرشیب آبخیز بوده است. از این رو وجود و استقرار پوشش گیاهی در منطقه نقش شایانی در کنترل فرسایش ایفا می‌کند، به طوری که پوشش جنگل زارهای بلوط اما پراکنده در ارتفاعات بالای منطقه مورد مطالعه باعث شده که میزان فرسایش واقعی خاک از زیاد به متوسط تغییر کند. مطالعه اکبری و همکاران (Akbari et al., 2016)، هم‌چنین نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع بر میزان فرسایش در مناطق بیابانی غرب استان گلستان افزوده شده است که ناشی از عدم استقرار پوشش گیاهی در ارتفاعات بالاست، اما در حوزه آبخیز بریموند، وجود پوشش جنگلی در ارتفاعات بالا و نقش مؤثر پوشش گیاهی در مهار فرسایش خاک از میزان فرسایش به نسبت سایر مناطق شیب‌دار کاسته است. نیک کامی و همکاران (Nikkami et al., 2002) و (Jalili et al., 2006)، به ترتیب در حوزه آبخیز دماوند استان تهران و بریموند استان کرمانشاه نشان دادند که با کاهش سطح مساحت اراضی آبی و باغی، میزان فرسایش افزایش داشته است، در حالی که افزایش سطح اراضی مرتعی منجر به بیش‌ترین کاهش در میزان فرسایش خاک شده است.

می‌دهد. در همین ارتباط می‌توان به روش‌های معمول مورد استفاده در مطالعات ژئومورفولوژی و روش ارزیابی چشمی (بصری) شدت فرسایش خاک با استفاده از جدول<sup>۱</sup> BLM اشاره نمود. از طرفی در حال حاضر سامانه خاصی در حوزه‌های آبخیز برای ارزیابی کمی مقادیر فرسایش خاک و تولید رسوب در کشور موجود نیست و لذا امکان مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌های توزیعی تنها می‌تواند بر اساس ارزیابی‌های کیفی مشاهداتی طی بازدیدهای صحرایی حاصل شود. بر همین اساس تجهیز و استفاده از شیوه‌های پایش زمینی و تخیه داده‌ها و اطلاعات صحرایی برای اطمینان از عملکرد مدل‌های مختلف در حوزه علوم خاک و آب تأکید می‌شود.

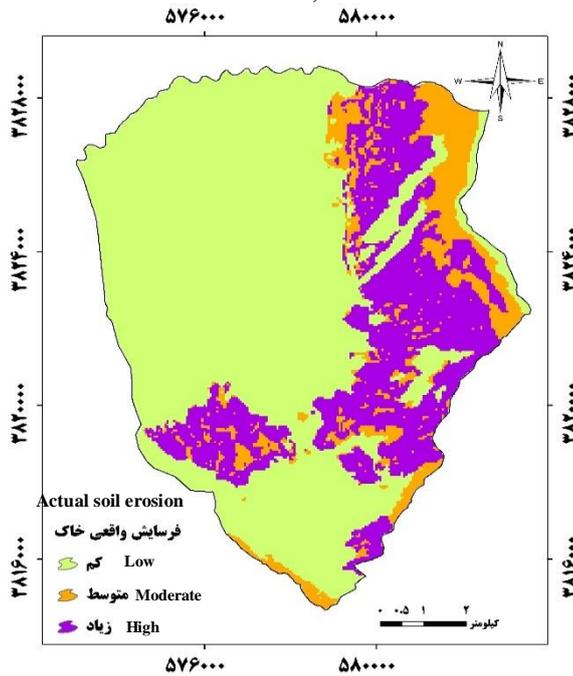
## نتایج و بحث

با توجه به مراحل اجرایی و کاربست مدل CORINE، نقشه‌های فرسایش‌پذیری، پتانسیل فرسایش خاک و فرسایش واقعی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌اند. هم‌چنین نمونه‌ای از نتایج اعتبارسنجی توزیع مکانی فرسایش خاک در آبخیز مطالعاتی در مقایسه با ارزیابی‌ها و تحلیل‌های چشمی تصاویر Google Earth در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که شیب و پستی و بلندی اراضی از جمله محدودیت‌هایی است که نوع بهره‌برداری اراضی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ به طوری که در اراضی با شیب بالا و پستی و بلندی زیاد، عملیات کشت و کار بسیار محدود و یا اصلاً ناممکن می‌شود. عملیات شخم، کشت و کار در این‌گونه اراضی منجر به فرسایش، تخریب و نابودی هرچه بیشتر اراضی می‌شود. مطابق شکل ۳ راست، حدود ۷۵ درصد منطقه دارای بخش‌های پرشیب و کم‌شیب است ولی عمدتاً دارای شیب کم است. پراکنش پوشش گیاهی (شکل ۳۲ چپ) مختلف در منطقه نیز نشان می‌دهد کاربری دیم و بایر با مساحت ۶۵/۴۸ درصد بیش‌ترین مساحت را به خود اختصاص داده است. علاوه بر آن، پوشش‌های مرتع و جنگل نیز با مساحت‌های ۲۹/۶۵ و ۴/۸۷ درصد، به ترتیب دومین و سومین مساحت از پوشش گیاهی در منطقه را دارند. اسفندیاری و همکاران (Esfandiari et al., 2014)، در حوزه آبخیز رود ورس در قزوین نشان دادند که اراضی بایر نقش زیادی در بروز فرسایش و رسوب دارند و عدم کنترل و استفاده غیراصولی از اراضی بایر و کشاورزی، روند افزایشی بر میزان تولید فرسایش و رسوب داشته است. بر اساس شکل ۴، خاک آبخیز دارای بافت لوم شنی، لوم سیلتی و لومی است و حدوداً به ترتیب هشت، ۳۵ و ۵۷ درصد مساحت آن در عمق‌های ۶۵-۲۵، ۲۵-۰ و کم‌تر از ۲۵ درصد قرار دارد. عمق خاک در بخش زیادی از نیمه غربی آبخیز با شیب کم‌تر از ۴ درصد و کاربری بایر و دیم، بیش از ۶۵ سانتی‌متر است. در منطقه



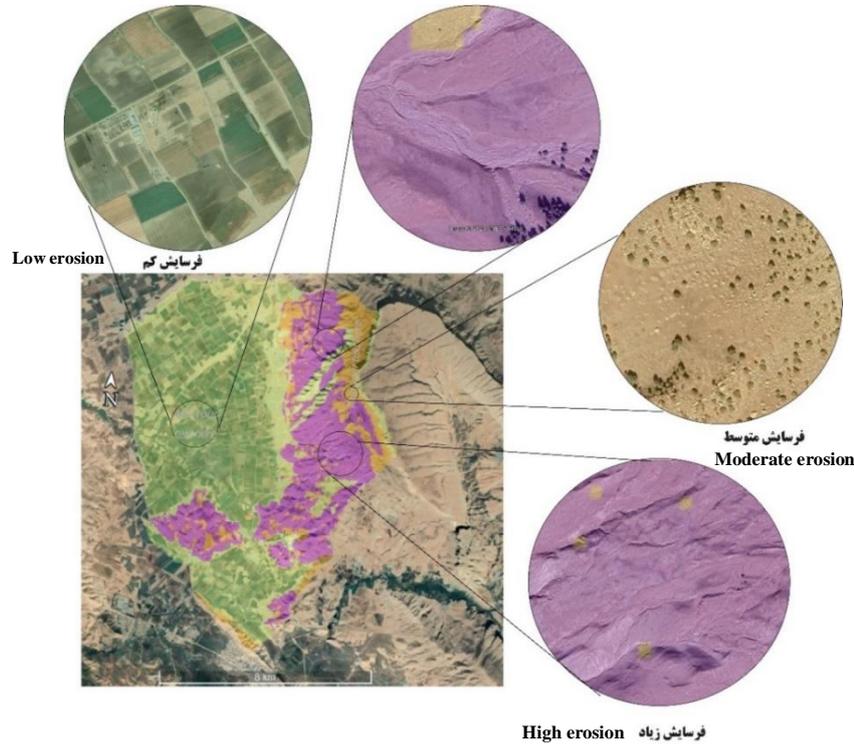
شکل ۵- نقشه فرسایش پذیری (راست) و پتانسیل فرسایش (چپ) خاک حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه

Figure 5- Map of erodibility (right) and soil erosion potential (left) of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran



شکل ۶- نقشه واقعی فرسایش خاک حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه

Figure 6- Actual soil erosion map of the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran



شکل ۷- تطابق تغییرات فرسایش خاک بر اساس مدل CORINE و Google Earth حوزه آبخیز بریموند در استان کرمانشاه  
 Figure 7- Matching soil erosion changes based on CORINE model and Google Earth in the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran

زراعت‌های آبی در مناطق با پتانسیل لغزشی و چرای دام بیش از ظرفیت مراتع است (Amanpour et al., 2022). با توجه به نوع خاک با بافت سبک و فرسایش‌پذیری بالا در حوزه آبخیز بریموند، نیاز به محافظت، مراقبت و حتی حفظ پوشش گیاهی از اصلی‌ترین عوامل در پایدارسازی وضعیت بوم‌شناسی و پایداری خاک و کاهش فرسایش در منطقه مورد مطالعه است، به طوری که در صورت استفاده بی‌رویه، با توجه به شکننده بودن بوم‌سازگان طبیعی منطقه در آینده‌ای نه‌چندان دور به یک کانون فرسایشی مهم تبدیل خواهد شد. در راستای مهار فرسایش و جلوگیری از اثرات منفی آن در حوزه آبخیز بریموند پیشنهاد می‌شود از اراضی در راستای توانایی و پتانسیل آن‌ها استفاده شد. همچنین وضعیت پوشش فعلی حفظ‌شده و با انجام طرح‌های مدیریتی و احیا، به استقرار پوشش گیاهی کمک تا فرسایش خاک مدیریت شود. اگرچه در جمع‌بندی بر ضرورت تجهیز سامانه‌های پایش مستمر و متناسب متغیرهای مختلف بوم‌سازگان در مقیاس آبخیز برای اطمینان کامل از نتایج به‌دست‌آمده و ارزیابی عملکرد مدل‌های تجربی برای بهبود بازدهی اقدامات مدیریتی مختلف حوزه منابع خاک و آب کشور تأکید می‌شود.

پژوهشگرانی (Dengiz and Akgül, Jordan et al., 2005) در تأیید یافته‌های پژوهش حاضر عنوان کردند که تغییر پوشش گیاهی و کاربری اراضی نقش قابل توجهی در فرسایش واقعی خاک بر عهده دارد. همچنین یوسفی و همکاران (Yousif et al., 2020) بیان داشتند که بافت خاک، پوشش زمین و عمق خاک در میان سایر عوامل نقش مؤثری در فرسایش خاک دارد، و تأکید داشتند که فعالیت‌های مبتنی بر کاربری مناسب برای به حداقل رساندن فرسایش خاک باید انجام شود.

پس از تجزیه و تحلیل نتایج کیفی مدل، به منظور هم‌خوانی نتایج مدل با شرایط فعلی با استفاده از سامانه Google Earth منطقه مورد مطالعه پیمایش شد. بازدید برخط انجام‌شده نشان داد در مناطقی که تحت کشت و کار قرار گرفته میزان فرسایش واقعی خاک کم‌تر بوده و از سویی دیگر در مناطق پرشیب فرسایش و اثرات آن کاملاً مشهود است. همچنین حضور گیاهان مرتعی و درختان جنگلی در قسمت‌های از منطقه باعث کاهش شدت فرسایش شده است (شکل ۷). بیش‌ترین عامل تشدیدکننده فرسایش در اکثر حوزه‌های آبخیز کشور، کاربری‌های غلط و غیراصولی و یا خارج از قابلیت اراضی مانند زراعت‌های دیم در مناطق شیب‌دار و

1. Aldabaa, A.A. (2020). Spatial soil erosion risk assessment using CORINE model: a case study in wadi el-Raml Watershed, north western coast, *Egypt. Plant Archives*, 20(1), 705-714.
2. Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Soil erosion risk assessment using the CORINE model (Case study: Semi-arid region in Golestan province). *Desert Ecosystem Engineering*, 5(12), 63-78. (In Persian with English abstract)
3. Akbari, M., Neamatollahi, E., Noughani, M.A., & Memarian, H. (2022). Spatial distribution of soil erosion risk and its economic impacts using an integrated CORINE-GIS approach. *Environmental Earth Sciences*, 81(10), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10405-w>
4. Amanpour, S., Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2022). Investigation of the effect of land use change on soil erosion and sediment production in Ramhormoz basin using object-oriented classification and RUSLE model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(3), 635-649. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2021.316628.668863>
5. Arabkhedri, M., Shadfar, S., Ardakani, A.J., Bayat, R., Khajavi, E., & Mahdian, M.H. (2018). Improving water erosion estimates for Iran. *Watershed Management Research*, 13(3), 13-27. (In Persian with English abstract)
6. Asghari Saraskanrood, S., Khodabandelo, B., Naseri, A., & Moradi, A. (2019). Extracting land use map based on a comparison between Pixel-Based and object-oriented classification methods case study: Zanjan city. *Sepehr*, 28(110), 195-208. (In Persian with English abstract)
7. Aydın, A., & Tecimen, H.B. (2010). Temporal soil erosion risk evaluation: a CORINE methodology application at Elmalı dam watershed, Istanbul. *Environmental Earth Sciences*, 61(7), 1457-1465.
8. Ayubi, Sh., & Jalalian, A. (2010). *Land evaluation*, Isfahan University of Technology Publications, page 89. (In Persian with English abstract)
9. Bashir, S., Baig, M.A., Ashraf, M., Anwar, M.M., Bhalli, M.N., & Munawar, S. (2013). Risk assessment of soil erosion in RAWAL Watershed using geoinformatics techniques, *Science International (Lahore)*, 25(3), 583-588.
10. Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J.A.A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerda, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., MariaDe Girolamo, A., DestaGessesse, G., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., Freppaz, M., & Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of the Total Environment*, 780, 146494.
11. CORINE (1992). CORINE: soil erosion risk and important land resources in the Southeastern regions of the European community. EUR 13233, Luxembourg, Belgium, 32-48.
12. Dengiz, O., & Akgül, S. (2005). Soil erosion risk assessment of the Gölbaşı environmental protection area and its vicinity using the CORINE model. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 29(6), 439-448.
13. El-Nady, M.A., & Shoman, M.M. (2017). Assessment of soil erosion risk in the basin of Wadi Maged in northern west coast of Egypt using CORINE model and GIS techniques. *Egypt. Journal of Soil Science*, 57(1): 31-45.
14. Entezari, M., & Gholam Heydari, H. (2014). Comparing the two models SLEMSA and Corine in the assessment of soil erosion. *The Journal of Spatial Planning*, 18(3), 1-20. (In Persian with English abstract)
15. Ekhtesasi, MR., & Sepehr, A. (2012). *Methods and models of desertification assessment and mapping*, Yazd University Press, first edition, 290p. (In Persian with English abstract)
16. Evrendilek, F., Berberoglu, S., Gulbeyaz, O., & Ertekin, C. (2007). Modeling potential distribution and carbon dynamics of natural terrestrial ecosystems: a case study of Turkey. *Sensors*, 7(10), 2273-2296.
17. Esfandiari, M., Moeini, A., & Moqadasi, R. (2014). Effect of land use and vegetation on erosion forms and sediment production (Case Study: Watershed Vers Qazvin province). *11(42): 51-62*. (In Persian with English abstract)
18. Faleh Giri, M., Talebi, A., Dasturani, M., & Rangavar, A.S. (2011). Investigation of efficiency of rangeland hydrology and erosion model (RHEM) in water erosion (Case study: Sangane watershed-Iran). *Journal of Watershed Management Research*, 2(4), 29-43. (In Persian with English abstract)
19. Jalili, KH., Sadeghi, S.H.R., & Nikkani D. (2006). Land use optimization of watershed for soil erosion minimization using linear programming (a case study of Brimvand Watershed, Kermanshah Province). *Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)*, 10(4), 15-27. (In Persian with English abstract)
20. Jordan, G., Van Rompaey, A., Szilassi, P., Csillag, G., Mannaerts, C., & Woldai, T. (2005). Historical land use changes and their impact on sediment fluxes in the Balaton basin (Hungary). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 108(2), 119-133.
21. Giordano, A. (2009). The CORINE project on soil erosion risk and land quality. *Land Use, Land Cover and Soil Sciences*, 3, 144.
22. Gurebiyaw, K., Addis, H.K., & Teklay, A. (2018). Assessment of spatial soil erosion susceptibility based on the CORINE model in the Gumara-Maksegnit Watershed, Ethiopia. *Journal of Natural Resources and Development*, 8, 38-45.
23. Heydari, M., Zahmatkesh Maromi, H., & Karam, A. (2022). Soil erosion hazard Zonation using SLEMSA model in

- the Ziarat catchment. *Researches in Earth Sciences*, 12(4), 50-67. (In Persian with English abstract)
24. Kalehhouei, M., Zabihi Seilabi, M., Sadeghi, P.S., Khaledi Darvishan, A., spalovich, V., & Sadeghi, S.H.R. (2019). *Application of the IntEro model for soil erosion estimation in the Shazand Watershed, Markazi Province, Iran*. The 15<sup>th</sup> National Watershed Science and Engineering Conference, Sari, Iran. (In Persian with English abstract)
  25. Karimi, Z., Sadoddin, A., & Sheikh, V. (2022). Effects of watershed management practices on the quadric services of Chehel-Chai Watershed, Golestan Province. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(4), 18-36. (In Persian with English abstract)
  26. Kiani Harchegani, M., Saeidi, P., & Sadeghi S.H.R. (2018). Analysis of Rating Loops of interrill erosion on Consecutive Storms under Laboratory Conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 293-302. (In Persian with English abstract)
  27. Khallouf, A., Talukdar, S., Harsányi, E., Abdo, H.G., & Mohammed, S. (2021). Risk assessment of soil erosion by using CORINE model in the western part of Syrian Arab Republic. *Agriculture and Food Security*, 10(1), 1-15.
  28. Kucsicsa, G., Popovici, E.A., Bălteanu, D., Grigorescu, I., Dumitraşcu, M., & Mitrică, B. (2019). Future land use/cover changes in Romania: regional simulations based on CLUE-S model and CORINE land cover database. *Landscape and Ecological Engineering*, 15(1), 75-90. <https://doi.org/10.18509/GBP.2020.93>
  29. La Licata, M., Bosino, A., Bettoni, M., & Maerker, M. (2023). Assessing landscape features and geomorphic processes influencing sediment dynamics in a geomorphologically highly active Mediterranean agroecosystem: The upper Val d'Arda case study (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology*, 433, 108724.
  30. Mingarro, M., & Lobo, J.M. (2023). European national Parks protect their surroundings but not everywhere: A study using land use/land cover dynamics derived from CORINE Land Cover data. *Land Use Policy*, 124, 106434. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106434>
  31. Mohammadi, Sh., Karimzadeh, H.R., & Habashi, Kh. (2016). *Assessment of soil erosion risk using CORINE model, case study: Manderjan area, west of Isfahan*. The 1<sup>st</sup> international Conference on Geographical Information System, Silk Road, Isfahan. (In Persian with English abstract)
  32. Mohammadi, S., Karimzadeh, H., Habashi, K. (2018). Assessment soil erosion and deposition in the Menderjan watershed using USPED and RUSLE models in the environment of geographical information system (GIS). *Desert Ecosystem Engineering*, 6(17), 43-56. (In Persian with English abstract)
  33. Mohammadi, S., Balouei, F., Haji, K., Khaledi Darvishan, A., & Karydas, C.G. (2021). Country-scale spatio-temporal monitoring of soil erosion in Iran using the G2 model. *International Journal of Digital Earth*, 14(8), 1019-1039.
  34. Mokhtari, D., Ebrahimi, H., & Salmani, S. (2019). Land subsidence susceptibility modeling using random forest approach (Case study: Tasuj plane catchment). *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 10(3), 93-105. (In Persian with English abstract)
  35. Motalebnejad, A., Jamali, A.K., Hasanzadeh, M., & Dashtakian, K. (2016). WSM Model Optimization in Soil Erosion and Sediment Estimating, by Coefficient Modifying and using Rainfall Simulator in Nir Watershed-Yazd Province. *Journal of Watershed Management Research*, 6(12), 82-89. (In Persian with English abstract)
  36. Najafi, S., Sadeghi, S.H.R., & Heckmann, T. (2021). Analysis of sediment accessibility and availability concepts based on sediment connectivity throughout a watershed. *Land Degradation & Development*, 32(10), 3023-3044. <https://doi.org/10.1002/ldr.3964>
  37. Nikkami, D. (2002). Optimizing the management of soil erosion in Damavand watershed. *Pajouhesh-VA-Sazandegi*, 54, 82-89. (In Persian with English abstract)
  38. Quinton, J. N., Govers, G., Van Oost, K., & Bardgett, R.D. (2010). The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. *Nature Geoscience*, 3, 311-314.
  39. Rahmani, A., Haqizadeh, A., Tahmasabpour, N., & Zainivand, H. (2017). *Introduction of USPED and G2 erosion models with the ability to estimate the amount of soil erosion in different time frames for watershed management*. The 13<sup>th</sup> National Watershed Science and Engineering Conference and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment with the focus on watershed management and protection of natural resources and environment, Ardabil. (In Persian with English abstract)
  40. Rahmati, S., Javadi Tabalvandani, M.R., Rangavar, A.S., & Faramarz, Z. (2014). Evaluating of efficiency and accuracy of USLE, AOF, MUSLE-S and MUSLE-E models on estimating of event-based erosion amount (Case study: Sanganeh Soil Conservation Research Institute of Mashhad). *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(4), 215-229. (In Persian with English abstract)
  41. Sadeghi, S.H.R. (2007). *Analysis of the relationship between erosion and soil hydrophobicity*. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Iranian Congress of Soil Sciences, Tehran University of Agriculture and Natural Resources, Karaj, 26-27 (In Persian with English abstract)
  42. Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S., & Onda, Y. (2008). Determinant factors of sediment graphs and rating loops in a reforested watershed. *Journal of Hydrology*, 356(3-4), 271-282.
  43. Sadeghi, S.H.R. (2010). *Study and measurement of water erosion*. Publications of Tarbiat Modares University. 200 p. (In Persian with English abstract)

44. Sadeghi, S.H.R., Jalili, Kh., & Nikkami, D. (2009). Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26, 186-193.
45. Sadeghi, S.H.R., Kolehhouie, M., Dadizade, Y., Kamari yekdangi, F., Zuoravand, G., Radkiyanpour, M., Saroune, F., Mostafaie Younjali, S., & Piri, S. (2021). Assessing soil erosion risk using application and field evaluation of the ICONA model in the Costal Sourak watershed in Hormozgan province, Iran. *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 2(4), 1-12. (In Persian with English abstract)
46. Sadegh Kamali, K., Moini, A., & Ahmadi, H. (2017). Investigating the effectiveness of the semi-quantitative CORINE model in predicting soil erosion (case study: Parwan watershed). The 13<sup>th</sup> National Watershed Science and Engineering Conference and the 3<sup>rd</sup> National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, Focusing on Watershed Management and Protection of Natural Resources and Environment, Ardabil. (In Persian with English abstract)
47. Sepehr, A., & Honarmandnejad S. (2012). Actual soil erosion risk mapping using modified CORINE method (Case study: Jahrom basin). *Geography and Environmental Hazards*, 1(3), 57-72. (In Persian with English abstract)
48. Taripanah, F., Ranjbar, Fordoei A., Vali, A., & Mokarram M. (2020). Soil Erosion Risk Assessment Using CORINE Model in Kharestan Watershed, Fars Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(29), 59-74. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.29.41>
49. Telles, T.S., Guimarães, M.D.F., & Dechen, S.C.F. (2011). The costs of soil erosion. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35, 287-298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200001>
50. World Bank. (2005). *Islamic Republic of Iran cost assessment of environmental degradation*. Report No. 32043-IR. Rural Development, Water and Environment Department, Middle East and North Africa Region.
51. Yousif, I., Tealab, E., Hady, A., & Aldabaa, A. (2020). Spatial soil erosion risk assessment using CORINE model: a case study in Wadi El-Raml Watershed, North Western Coast. *Egypt Plant Arch*, 20(1), 705-714.
52. Zakiri Nejad, R., & Falah, S. (2022). Evaluation of water erosion hazard map using the combination of the RUSLE model and Gully erosion density map in Alamarvdasht watershed of Fars province. Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 20-38. Dor: [20.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6](https://doi.org/10.1001.1.22517812.1402.13.1.4.6)



## Assessment of Pollution in the Central Soils of Khuzestan Province with Potentially Toxic Elements (PTEs) and their Origins

N. Sahraei<sup>1</sup>, A. Landi<sup>2</sup>, S. Hojati<sup>3\*</sup>, E. Pasolli<sup>4</sup>

Received: 19-02-2023

Revised: 19-03-2023

Accepted: 10-04-2023

Available Online: 11-04-2023

### How to cite this article:

Sahraei, N., Landi, A., Hojati, S., & Pasolli, E. (2023). Assessment of pollution in the central soils of Khuzestan province with potentially toxic elements (PTEs) and their origins. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 457-471. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81161.1254>

### Introduction

In recent years, soil contamination with potentially toxic elements (PTEs) has become a major problem in most parts of the world. PTEs are naturally generated from the pedogenesis in the soil and are formed mainly by rock weathering. Nevertheless, the natural content of metals, i.e., Cr, Zn, Ni, Pb, Cd, used to be low in the soil, but due to anthropogenic activities such as industrial emissions, atmospheric transportation, sewage irrigation, and application of pesticides and fertilizers, there is an increase in the content of PTEs. PTEs in soil are one of the most important environmental pollutants due to their toxicity, durability, easy absorption by plants and long half-life. Therefore, the assessment of soil health is very important for the sustainable development of agriculture and the rehabilitation of soils contaminated with PTEs. The present study was conducted to quantify PTEs pollution for soil environmental assessment using a flexible approach based on multivariate analysis and using pollution indicators in a part of the central lands of Khuzestan province.

### Materials and Methods

For this purpose, in February 2021, 200 surface soil samples (0-10 cm) were taken using stratified random sampling. The collected soil samples were cleaned by removing plant materials and other pebbles, and air dried, powdered, and sieved by using a 2 mm sieve size. The interest in soil's physical and chemical properties i.e., pH was determined with a digital pH meter. Soil textural particles were measured by the hydrometer method, soil organic carbon (SOC) content was estimated by following Walkley and Black method, bulk density (BD) was measured by the Clod method, and total metal content was determined using the aqua-regia solution digestion method and analyzed using Inductively Coupled Plasma-Optical Emission spectrometry (ICP-OEC). The level of Pb, Ni, Zn, Cr pollution was estimated based on environmental indicators including contamination factor (CF), enrichment factor (EF), geo-accumulation index (Igeo), pollution index of individual metals (PI), and modified pollution index of individual metals (MPI). Multivariate statistical methods including correlation analysis, cluster analysis (CA), and principal component analysis (PCA) were used to find the source of metals in the soil. All statistical methods were performed using SPSS (26 version) software.

### Results and Discussion

Measurement of soil pH showed that the soil of the studied area tends to alkalinity. Also, the soil texture in this area is loam. The results showed that the SOC in these soil samples is 0.71%, and the range of EC (between 0.18 and 60.5 dS/m) indicates the distribution of saline and non-saline soils in the studied area. The total average concentration of Zn, Ni, Cr, and Pb were 60.26, 50.96, 50.38, and 12.67 mg/kg, respectively. The order of average for heavy metals was Zn > Ni > Cr > Pb. The highest amount of standard deviation and concentration changes were

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Kuzestan, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [s.hojati@scu.ac.ir](mailto:s.hojati@scu.ac.ir))

4- Associate Professor, Department of Agricultural Sciences, University of Naples Federico II, Naples, Italy

DOI: [10.22067/JSW.2023.81161.1254](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.81161.1254)

observed in Zn and Pb elements. These two elements also showed a high degree of variation coefficient in the studied area, which can indicate the high impact of human activities on the content of these elements. The results obtained from the application of multivariate statistics showed that there is a positive correlation between the elements such as Zn, Ni, and Pb in the study area, indicating that these metals probably have the same source. Whereas the absence of correlation of Cr with these elements indicates a separate source for this element compared to Pb, Zn, and Ni. There was also a strong relationship among these elements based on the PCA and CA classification. Based on the multivariate statistical analysis the source of pollution for the metals studied was mainly from both anthropogenic and geogenic activities. The results showed that the soil samples taken from the study area are in the low pollution category based on the individual element indices of CF and Igeo, but in the moderate pollution class based on the EF index. In addition, the evaluation based on the cumulative and multi-element indices of PI and MPI showed that 100% of samples have high pollution.

## Conclusion

The present study concludes that the average values of Zn, Ni, Cr, and Pb were found to be below the guidelines set by the IEPA (Iran Environmental Protection Agency) as well as the Earth's crust values. The results indicate existing relationships among the studied variables, revealing that the heavy metals Zn, Ni, and Zn share the same source in the study area. Additionally, it was observed that the source of Cr is primarily geogenic in nature. These findings highlight the significance of utilizing multivariate statistical methods and pollution indicators in tandem, as they prove to be valuable tools for evaluating and quantitatively determining the potential pollution risk.

**Keywords:** Cr, Enrichment factor, Multivariate statistics, Ni, Pb, Zn

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد- شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۷۱-۴۵۷

## منشأیابی و ارزیابی آلودگی خاک‌های مرکزی استان خوزستان به برخی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی

نسیم صحرایی<sup>۱</sup> - احمد لندی<sup>۲</sup> - سعید حجتی<sup>۳\*</sup> - ادواردو پاسولی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱

### چکیده

فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی از مهم‌ترین آلاینده‌های محیطی هستند که در تمام جوامع صنعتی یافت می‌شوند از این رو ارزیابی وضعیت آلودگی خاک برای توسعه پایدار کشاورزی و احیا خاک‌های آلوده به فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی امری ضروری است. مطالعه حاضر با هدف کمی سازی آلودگی فلزات سرب، نیکل، کروم و روی برای ارزیابی زیست‌محیطی خاک با استفاده از شاخص‌های آلودگی و یک رویکرد انعطاف‌پذیر، بر اساس تحلیل چند متغیره در بخشی از اراضی مرکزی استان خوزستان انجام شد. به منظور برآورد میزان آلودگی خاک، ۲۰۰ نمونه از خاک سطحی (عمق صفر تا ۱۰ سانتی متری) تهیه گردید. پس از نمونه‌برداری و آماده‌سازی خاک‌ها، غلظت عناصر (روی، نیکل، سرب و کروم) با روش تیزآب سلطانی و دستگاه ICP-OES اندازه‌گیری و با استفاده از شاخص‌های زیست‌محیطی و تحلیل‌های مختلف آماری، میزان آلودگی در منطقه ارزیابی شد. نتایج نشان داد که میانگین غلظت فلزات مورد مطالعه روی، نیکل، کروم و سرب به ترتیب ۶۰/۲۶، ۵۰/۹۶، ۵۰/۳۸ و ۱۲/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود. مطابق نتایج تجزیه و تحلیل همبستگی پیرسون تمامی فلزات به جز کروم از همبستگی بالایی با یکدیگر برخوردار بودند، که نشان دهنده منابع مشابه برای این فلزات در منطقه می‌باشد. به علاوه بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره هر دو عامل انسان‌زاد و زمین‌زاد، منشأ فلزات مورد بررسی در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد. همچنین نتایج ارزیابی فاکتور آلودگی و شاخص زمین‌انباشتی نشان داد که فلزات روی، نیکل، کروم و سرب به صورت منفرد، آلودگی در خاک سطحی منطقه ندارند و شاخص غنی‌شدگی نیز سطح آلودگی متوسط را در منطقه نشان می‌دهد، این در حالی است که نتایج به دست آمده از شاخص‌های آلودگی اصلاح شده و جامع آلودگی نمره بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل چند متغیره، روی، سرب، شاخص غنی‌شدگی، کروم، نیکل

### مقدمه

گردد. به‌طور کلی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی با رسوب در خاک و جذب توسط پوشش گیاهی بر حاصلخیزی، توسعه گیاهان و بهره‌وری خاک تأثیر می‌گذارند. همچنین قرار گرفتن انسان در معرض این فلزات باعث اختلالات حاد و مزمن قلب و عروق و ابتلا به سرطان‌های مختلف می‌گردد (Huang et al., 2018).

تغییرات مکانی محتویات این فلزات در خاک سطحی ممکن است

در سال‌های اخیر، آلودگی خاک به فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی به یک مشکل اساسی در بسیاری از نقاط جهان تبدیل شده است. وجود این فلزات در خاک به دلیل سمیت، ماندگاری، جذب آسان توسط گیاهان و نیمه‌عمر طولانی می‌تواند عملکرد طبیعی خاک‌ها را از بین برده و باعث ایجاد تنش در محصولات زراعی و جلوگیری از رشد آن‌ها

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران  
(Email: s.hojati@scu.ac.ir)  
\* نویسنده مسئول:

۴- دانشیار گروه علوم کشاورزی، دانشگاه فدريكو دوم ناپل، ناپل، ایتالیا

تحت تأثیر مواد مادری خاک یا منابع انسانی باشد، به عبارت دیگر علاوه بر اینکه این فلزات به طور طبیعی در خاک وجود دارند، در اثر فعالیت‌های انسانی نیز به مقدار زیادی به خاک افزوده می‌شوند. فرسایش خاک و هوادهی سنگ‌ها در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، منابع طبیعی این دسته فلزات در خاک هستند (Stafilov et al., 2010). با این حال در بیشتر مناطق صنعتی و شهری، سهم فعالیت‌های انسانی در آلودگی خاک به فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی بیشتر از منابع طبیعی است (Adimalla and Wang, 2018). رشد سریع جمعیت و گسترش صنعت و کشاورزی در جهان، باعث تشدید پتانسیل آلاینده‌ی این فلزات در نتیجه فعالیت‌هایی مانند بهره‌برداری از معادن، پردازش و ذوب فلزات، تولید مواد شیمیایی و دارویی، گازهای گلخانه‌ای تولید شده توسط کارخانه‌ها و وسایل نقلیه، افزایش مصرف سموم و آفت‌کش‌ها، دفن زباله‌ها، رسوب گرد و غبار و ذرات معلق در هوا و آبیاری مزارع با آب‌های نامتعارف شده است (Adimalla, 2020).

با توجه به اینکه توزیع مکانی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک تا حد زیادی تحت تأثیر تغییرات سنگ مادر، خصوصیات محیطی و فرایندهای خاک‌شناسی قرار می‌گیرد (Rezapour et al., 2014)، تنها تعیین غلظت این فلزات در خاک، میزان آلودگی و اثرات تخریبی آن‌ها را در محیط را نشان نخواهد داد و کارایی لازم برای ارزیابی و مدیریت وضعیت آلودگی در خاک را ندارد. به این منظور پژوهشگران به منظور بررسی آلودگی و خطرات زیست‌محیطی ناشی از غلظت فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی از شاخص‌های آلودگی مانند فاکتور آلودگی<sup>۱</sup> (CF)، فاکتور غنی‌شدگی<sup>۲</sup> (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی<sup>۳</sup> (Igeo) و شاخص خطر زیست‌محیطی<sup>۴</sup> (RI) استفاده کرده‌اند (Ahmed et al., 2016; Kumar et al., 2018; Tian et al., 2017). برخی از محققان بیان داشته‌اند که شاخص‌های EF و Igeo مهم‌ترین شاخص‌های تک‌عنصری جهت ارزیابی نسبی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک‌های آلوده و بدون آلودگی هستند (Kumar et al., 2018; Sakram et al., 2015)، این در حالی است که شاخص‌های چند عنصری مانند شاخص آلودگی نمره<sup>۵</sup> (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده<sup>۶</sup> (MPI) می‌توانند اثرات هم‌افزایی فلزات مختلف را در نظر بگیرند.

یکی دیگر از راه‌های ارزیابی و مدیریت وضعیت آلودگی در یک منطقه تشخیص نوع و منشأ فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی در خاک می‌باشد. در چند دهه اخیر، توسعه رویکردهای آماری چند متغیره مبتنی بر GIS، تحقیقات را در مورد آلودگی خاک و اثرات آن بر سلامت انسان را متحول کرده است. این رویکردهای چند متغیره به طور گسترده‌ای جهت تقسیم منابع و توزیع فلزات آلاینده مورد توجه قرار محققان گرفته اند (Barakat et al., 2019; Keshavarzi and Kumar, 2019).

این راستا ایلپو و همکاران (Ielpo et al., 2017) برای یافتن منبع فلزات در خاک‌های کشاورزی منطقه جنوب ایتالیا از معادلات چند متغیره استفاده کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از سموم دفع آفات دلیل اصلی آلودگی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی زیاد در خاک‌های این منطقه است. سونگ و همکاران (Song et al., 2018) نیز در مطالعه‌ای از روش‌های چند متغیره و شاخص‌های آلودگی در خاک‌های کشاورزی چین استفاده کردند بر اساس نتایج مطالعه آن‌ها منابع طبیعی و استفاده از سموم شیمیایی و دفع آفات عامل اصلی ورود فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی زیاد مانند آرسنیک و کروم در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه آنان بودند. همچنین حتی (Hojati, 2017) در خاک‌های منتخب شمال استان خوزستان در مطالعه‌ای که به منظور ارزیابی آلودگی و توزیع منبع فلزات آرسنیک، سرب و مس با استفاده از شاخص‌های آلودگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۷</sup> (PCA) انجام داد به این نتیجه رسید که منشأ فلزات مس و سرب با غنی‌سازی متوسط تا زیاد در این منطقه، هر دو عامل منابع طبیعی و انسانی می‌باشد، این در حالی است که منشأ آرسنیک در این خاک‌ها عمدتاً تحت تأثیر منشأ لیتوژنیک قرار می‌گیرد. در مطالعه دیگری که توسط ال و ایل و همکاران (Al-Wabel et al., 2017) به منظور یافتن منبع و میزان آلودگی فلزات در زمین‌های کشاورزی عربستان سعودی و با استفاده از تکنیک‌های چند متغیره و شاخص‌های مختلف آلودگی صورت گرفت، فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از مواد شیمیایی از قبیل سموم دفع آفات و کود، منبع اصلی آلودگی این فلزات در اراضی کشاورزی معرفی شدند.

استان خوزستان در جنوب غربی ایران، یکی از مراکز مهم کشاورزی و صنعتی در کشور می‌باشد. کشاورزی گسترده و کاربرد سموم و آفت‌کش‌های شیمیایی، استفاده از کمپوست و لجن فاضلاب از یک سو و تعدد صنایع مستقر در منطقه از جمله صنایع مرتبط با فولاد، نفت و همچنین پدیده غالب گرد و غبار از سوی دیگر، اهمیت زیست‌محیطی و لزوم بررسی میزان آلودگی فلزات با پتانسیل آلاینده‌ی زیاد را در خاک‌های این منطقه دوچندان می‌کند. از این رو، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک به عناصر روی، نیکل، کروم و سرب، با استفاده از شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی و بهره‌مندی از روش‌های آماری چند متغیره به منظور شناسایی منابع احتمالی آلودگی و تعیین توزیع مکانی غلظت این عناصر در قسمتی از اراضی مرکزی استان خوزستان انجام گرفت.

5- Pollution index of individual metals

6- Modified pollution index of individual metals

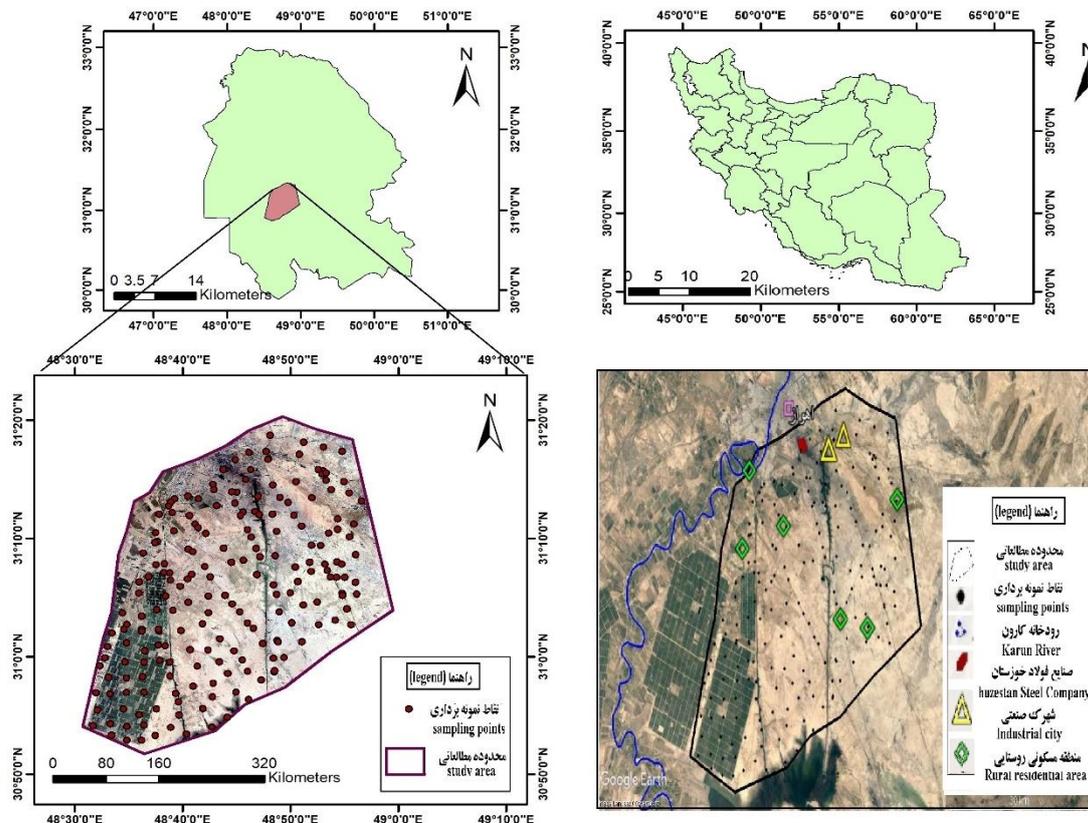
7- Principal Component Analysis (PCA)

1- Contamination Factor

2- Enrichment Factor

3- Geoaccumulation Index

4- Potential ecological risk



شکل ۱- موقعیت نقاط نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه  
Figure 1- Study area location and distribution of the soil samples

نمونه برداری به گونه ای تهیه شد که نشان دهنده تمامی خاک های اصلی و کاربری اراضی منطقه باشد. نمونه ها پس از جداسازی مواد گیاهی و سنگریزه ها، هوا خشک و از الک ۲ میلی متری عبور داده شدند. سپس توزیع اندازه آن ها به روش هیدرومتری (Gee and Boudier, 1986)، مقدار کربن آلی خاک به روش والکی و بلک (Walkley and Black, 1934)، pH در گل اشباع به وسیله pH سنج رقومی (Thomas, 1996)، EC در عصاره گل اشباع به وسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی و جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Black and Hartge, 1986) اندازه گیری گردید.

#### اندازه گیری غلظت فلزات با پتانسیل آلايندگي

غلظت فلزات مورد مطالعه شامل عناصر سرب، نیکل، کروم و روی با استفاده از دستگاه ICP-OES مدل Varian 710-ES برآورد شدند. عصاره گیری برای تعیین غلظت این فلزات از نمونه های خاک با استفاده از روش انحلال با تیزآب سلطانی انجام گردید. به این منظور با استفاده از اسید کلریدریک (۳۷ درصد) و اسید نیتریک (۶۵ درصد) نمونه ها

#### مواد و روش ها

##### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در جنوب غربی ایران با وسعت حدود ۱۵۵ هزار هکتار حد وسط عرض جغرافیایی "۳۰°۵۲'۳۰" تا "۳۱°۲۰'۲۰" شمالی و "۴۸°۵۸'۱۰" تا "۴۸°۳۰'۰۱" طول شرقی، در شرق رودخانه کارون و در ۱۵ کیلومتری جنوب شهر اهواز واقع شده است (شکل ۱). متوسط دمای سالانه ۳۱/۲ درجه سانتی گراد و میانگین بارش در منطقه ۲۱۳ میلی متر است. ارتفاع منطقه مورد مطالعه بین ۴ تا ۱۲۳ متر از سطح دریای آزاد می باشد. کشاورزی آبی، مراتع فقیر و سطوح توسعه یافته شهری، روستایی و صنعتی کاربری های غالب در منطقه هستند. زمین نمای غالب منطقه، دشت رسوبی سیلابی با مواد مادری آبرفتی می باشد (Abyaat et al., 2017).

##### مطالعات میدانی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی

در این مطالعه تعداد ۲۰۰ نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۱۰ سانتی متری به روش تصادفی طبقه بندی شده جمع آوری شدند. نقاط

هضم و پس از به حجم‌رسانی با آب مقطر، قرائت غلظت فلزات انجام شد (Black and Hartge, 1986).

### ارزیابی تعیین سطح آلودگی فلزات مورد بررسی

در این پژوهش برای تعیین شدت و سطح آلودگی خاک به فلزات مورد بررسی از فاکتور آلودگی (CF)، فاکتور غنی‌شدگی (EF)، شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo)، شاخص جامع آلودگی نمره (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI) استفاده گردید.

### فاکتور آلودگی (CF)

فاکتور آلودگی (CFmetal) یک شاخص ساده و تک مقیاس است که به منظور تعیین آلودگی خاک به فلزات دارای پتانسیل آلودگی استفاده می‌شود. بر اساس این فاکتور مقدار فلزات در نمونه‌ها نسبت به مقدار طبیعی آن سنجیده می‌شود و میزان آلودگی خاک تعیین می‌گردد. این فاکتور با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود:

$$\text{CFmetal} = \frac{\text{Cmetal}}{\text{Cbackground}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه (۱)، Cmetal غلظت عنصر در سطح خاک و Cbackground غلظت عنصر در زمینه می‌باشد. در این پژوهش میانگین غلظت هر عنصر در پوسته زمین به عنوان غلظت زمینه‌ای (طبیعی) در نظر گرفته شد. بر اساس این شاخص، خاک‌ها از نظر درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلودگی به چهار کلاس: آلودگی کم:  $CF < 1$ ، آلودگی متوسط:  $1 < CF < 3$ ، آلودگی زیاد:  $3 < CF < 6$  و آلودگی خیلی زیاد:  $CF \geq 6$  گروه‌بندی می‌شوند (Hakanson, 1980).

### فاکتور غنی‌شدگی (EF)

فاکتور غنی‌شدگی (EF)، سطح آلودگی فلزات در خاک را نشان می‌دهد و شاخصی برای ارزیابی میزان تأثیر فعالیت‌های انسانی بر آلودگی خاک توسط فلزات دارای پتانسیل آلودگی و جدا کردن منابع طبیعی و انسانی این فلزات می‌باشد. فاکتور غنی‌شدگی (EF) بر اساس رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$\text{EF} = \frac{(\text{Cx/R})_{\text{sample}}}{(\text{Cx/R})_{\text{Reference}}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه (۲)، Cx غلظت فلز مربوطه و R غلظت فلز مبناست. عبارت Sample مقادیر خاکی هر یک از متغیرهای موجود و عبارت Reference نیز به مقادیر متناظر این متغیرها در خاک‌های آلوده نشده اشاره دارد. در این تحقیق، غلظت فلزات مورد مطالعه با توجه به غلظت آهن نرمال شدند. علت انتخاب آهن به عنوان عنصر مبنای این است که تصور می‌شود غلظت آن در خاک، مستقل از غلظت فلزات دیگر بوده و در نتیجه از آن‌ها تأثیر نمی‌پذیرد. درجه آلودگی فلزات سنگین، بر اساس فاکتور غنی‌سازی در ۳ سطح تعریف می‌شود:  $EF < 1/5$  به منشأ عمدتاً پوسته یا هوازدگی طبیعی اشاره دارد، درحالی‌که  $1/5$

$EF > 10$  نشان‌دهنده آلودگی انسانی است و  $EF > 10$  به معنای غنی‌سازی قابل توجه است (Ye et al., 2011). بر این اساس درجه آلودگی خاک‌ها به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را می‌توان به پنج دسته طبقه‌بندی کرد. کلاس آلودگی کم  $EF < 2$ ، کلاس آلودگی متوسط ( $2 < EF < 5$ )، کلاس آلودگی زیاد ( $5 < EF < 20$ )، کلاس آلودگی بسیار زیاد ( $20 < EF < 40$ ) و کلاس آلودگی به شدت زیاد  $EF \geq 40$  (Bhuiyan et al., 2010).

### شاخص زمین‌انباشتگی

شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) یکی دیگر از رویکردهای معمول در ارزیابی میزان آلودگی خاک توسط فلزات دارای پتانسیل آلودگی می‌باشد که در سال ۱۹۶۹ توسط آقای مولر ارائه شده است. روش محاسبه آن مطابق با رابطه ۳ است:

$$\text{Igeo} = \log_2 \left( \frac{\text{Cn}}{1.5\text{Bn}} \right) \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه (۳)، Igeo شاخص تجمع و یا شدت آلودگی در خاک، Cn میزان غلظت عنصر مورد نظر در نمونه خاک و Bn میزان غلظت همان عنصر در محیط مرجع (شیل) می‌باشد. ضریب ۱/۵ ضریب تصحیح تأثیر لیتوژنیکی مقدار غلظت زمینه می‌باشد. این شاخص درجه آلودگی به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را در قالب ۷ کلاس، بر اساس مقادیر کمی برآورده شده، ارزیابی می‌نماید.  $Igeo \leq 0$  غیر آلوده؛  $0 < Igeo \leq 1$  کمی آلوده تا کمی آلوده؛  $1 < Igeo \leq 2$  کمی آلوده؛  $2 < Igeo \leq 3$  کمی آلوده تا خیلی آلوده؛  $3 < Igeo \leq 4$  خیلی آلوده؛  $4 < Igeo \leq 5$  خیلی آلوده تا به شدت آلوده و  $Igeo > 5$  به شدت آلوده (Loska et al., 2004).

### شاخص جامع آلودگی نمره و شاخص آلودگی اصلاح شده

شاخص PI برای اندازه‌گیری کیفیت خاک مهم است. برتری که این شاخص نسبت به شاخص‌های دیگر دارد این است که این شاخص، ریسک آلودگی تمام فلزاتی که در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرند را نشان می‌دهد. شاخص نمره مطابق رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\text{PI}_{\text{nemerow}} = \sqrt{\frac{\text{CFav}^2 + \text{CFmax}^2}{2}} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در رابطه (۴)، CFmax و CFav به ترتیب میانگین و حداکثر مقدار CF هستند. بر اساس این شاخص میزان آلودگی خاک‌ها به فلزات دارای پتانسیل آلودگی را می‌توان در یکی از کلاس‌های زیر طبقه‌بندی نمود:  $PI < 0/7$ ،  $0/7 < PI < 1$ ،  $1 < PI < 2$ ،  $2 < PI < 3$  و  $PI \geq 3$  که به ترتیب نشان‌دهنده عدم آلودگی، کمی آلوده، به طور متوسط آلوده، بسیار آلوده و آلودگی شدید می‌باشد (Keshavarzi and Kumar, 2019).

شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI) دیگر شاخص چند عنصری است که مبتنی بر فاکتور غنی‌شدگی است که توسط و همکاران (Brady et al., 2015) پیشنهاد گردید این شاخص از معادله ۵ محاسبه می‌شود:

فلزات در نمونه‌های خاک سطحی برای کلیه عناصر مورد بررسی کم‌تر از محدوده دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و مقادیر پوسته زمین بود (Mirsal, 2008). میانگین غلظت فلزات روند نزولی روی < نیکل < کروم < سرب را نشان داد. بیشترین مقدار انحراف معیار و تغییرات غلظت در عناصر روی و سرب مشاهده شد. (Yongming et al., 2006) بیان داشتند ضریب تغییرات فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی متأثر از منابع طبیعی تقریباً کم است، این در حالی است که این ضریب در فلزات سنگین ناشی از فعالیت‌های انسانی زیاد است، در نتیجه ضریب تغییرپذیری بالای عناصر سرب و روی را می‌توان نشان‌دهنده تأثیر زیاد فعالیت‌های انسانی بر محتوای این عناصر در منطقه دانست. غلظت سرب در نمونه‌های بررسی شده بین ۰/۸ تا ۱۰۰/۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم متغیر بود، مقدار بسیار بالای ضریب تغییرات برای فلز سرب ( $CV > 70$ ) بیانگر توزیع ناهمگن آن در مکان‌های مختلف منطقه می‌باشد (Zhang et al., 2015). منابع طبیعی سرب در خاک مربوط به ترکیب مواد مادری خاک از جمله کانی‌های رسی، مواد آلی، اکسیدهای منگنز و هیدروکسیدهای آهن و آلومینیوم است، این در حالی است که عمدتاً منابع انسانی سرب شامل معادن فلزات، باتری‌های فرسوده، رنگ‌های قدیمی با پایه سرب، ترافیک و فاضلاب‌ها می‌باشد (Salminen et al., 2005). با توجه به اینکه بیشترین آلودگی سرب در محدوده شمالی منطقه و در نزدیکی فعالیت‌های صنعتی از جمله صنایع فولاد خوزستان و همچنین در مسیر جاده‌ها به دلیل تردد ماشین‌آلات منطقه مشاهده گردید، می‌توان بیان کرد فعالیت‌های انسانی نقش مهمی در افزایش میزان سرب در خاک‌های منطقه دارا می‌باشند. بر اساس نتایج جدول ۲، غلظت روی در نمونه‌های مورد بررسی بین ۳۴/۵ تا ۲۹۴/۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم با میانگین ۶۰/۲۶ بود. پراکنش آلودگی روی در شمال منطقه مطالعه و در مجاورت مناطق صنعتی به خصوص صنایع فولاد خوزستان، بیشتر از سایر نقاط بود. (Salminen et al., 2005) بیان داشتند که میزان روی در خاک با ماهیت سنگ مادری، بافت خاک، ماده آلی و اسیدیته خاک در ارتباط است، همچنین منابع انسانی روی شامل فعالیت‌های صنعتی مانند معدن‌کاری، پرداخت فولاد و زغال سنگ است. میانگین غلظت نیکل در منطقه مورد بررسی ۵۰/۹۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ضریب تغییرات این فلز ۳۱ درصد بود. نیکل نسبت به سرب و روی دارای تغییرات غلظت کمتری در منطقه بود و بیشترین غلظت نیکل نیز در نزدیکی مناطق صنعتی دیده شد.

$$\text{MPI} = \sqrt{\frac{\text{EF}_{\text{Fav}}^2 + \text{EF}_{\text{max}}^2}{2}} \quad \text{رابطه ۵:}$$

که در آن  $\text{EF}_{\text{Fav}}$  و  $\text{EF}_{\text{max}}$  مقادیر متوسط و حداکثر  $\text{EF}$  هستند. این شاخص ۵ کلاس آلودگی را نشان می‌دهد:  $\text{MPI} < 1$ ،  $1 < \text{MPI} < 2$ ،  $2 < \text{MPI} < 3$ ،  $3 < \text{MPI} < 5$ ،  $5 < \text{MPI} < 10$  و  $\text{MPI} > 10$  که به ترتیب نشان‌دهنده عدم آلودگی، آلودگی کم، آلودگی متوسط، آلودگی متوسط تا زیاد، آلودگی زیاد و آلودگی شدید است (Keshavarzi and Kumar, 2019).

### منابع فلزات سنگین

برای یافتن منبع فلزات در خاک از روش‌های آماری چند متغیره مانند آنالیز همبستگی پیرسون<sup>۱</sup>، تحلیل خوشه‌ای<sup>۲</sup> (CA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی<sup>۳</sup> (PCA) استفاده شد. تحلیل خوشه‌ای با استفاده از روش Wards و فاصله اقلیدسی به‌عنوان معیار تشابه انجام و نتایج در قالب دندروگرام ارائه شد. همچنین تجزیه مؤلفه‌های اصلی با استفاده از چرخش واریماکس<sup>۴</sup> و با در نظر گرفتن مقادیر ویژه بزرگ‌تر از واحد برای شناسایی مؤلفه‌های اصلی انجام شد. کلیه روش‌های آماری در محیط نرم‌افزار SPSS نسخه شماره ۲۶ بررسی شدند (Kumar et al., 2016).

### بحث و نتیجه‌گیری

#### توصیف آماری

خلاصه آمار توصیفی برخی ویژگی‌های خاک در جدول ۱ ارائه شده است. مطابق با نتایج به‌دست آمده خاک‌های منطقه مورد مطالعه با مقدار میانگین کربن آلی ۰/۷۱ در زمره خاک‌های فقیر از لحاظ ماده آلی محسوب می‌گردند. از سوی دیگر دامنه تغییرات pH خاک‌های منطقه در محدوده خنثی تا کمی قلیایی است (۹-۷/۱) و دامنه هدایت الکتریکی در خاک‌های منطقه (بین ۰/۴۱ تا ۳۰۶/۵ دسی‌زیمنس بر متر) نشان‌دهنده توزیع خاک‌های شور و غیر شور در منطقه می‌باشد. بافت غالب خاک‌های منطقه مورد بررسی، لوم است. بر اساس طبقه‌بندی (Wilding, 1985) در منطقه مورد مطالعه میزان ضریب تغییرات شن، رس، کربن آلی و هدایت الکتریکی خاک در کلاس تغییرپذیری بالا، طبقه‌بندی می‌گردند. ضریب تغییرپذیری بالا در برخی از این ویژگی‌ها می‌تواند ناشی از تغییر کاربری اراضی، هوازگی و فرسایش، فعالیت‌هایی مانند عملیات حفاری و یا دیگر عوامل تغییردهنده شرایط خاک باشد (Amuno et al., 2013).

در جدول ۲ خلاصه آمار توصیفی فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی در منطقه مورد مطالعه آورده شده است. بر این اساس، میانگین غلظت این

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های خاک (عمق خاک ۰-۱۰ سانتی‌متر)

Table 1- Descriptive statistics of the soil properties (0-10 cm soil depth) (N = 200)

ویژگی‌های خاک Soil properties	حداقل Min	حداکثر Max	میانگین Mean	انحراف معیار Std.dev	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	ضریب تغییرات CV(%)
درصد شن Sand (%)	9.00	98.00	34.17	13.32	1.59	4.19	38.98
درصد سیلت Silt (%)	1.00	75.00	45.00	12.80	-0.17	0.18	28.40
درصد رس Clay (%)	1.00	51.00	20.82	10.80	0.27	-0.64	52.00
درصد کربن آلی Soil Organic C (%)	0.24	1.70	0.71	0.37	7.59	85.41	52.00
جرم مخصوص ظاهری Bulk Density (gr/cm <sup>3</sup> )	0.98	1.76	1.24	0.11	1.06	3.48	8.62
رسانایی الکتریکی Electrical Conductivity (dS/m)	0.41	306.00	13.53	32.86	6.90	51.51	242.86
واکنش خاک pH	7.10	9.00	7.84	0.32	0.57	0.55	4.08

## همبستگی بین فلزات سنگین و ویژگی‌های خاک

نتایج همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های خاک و عناصر مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده است. روابط بین ویژگی‌های خاک و فلزات در خاک، اطلاعات مهمی درباره منابع این عناصر و مسیرهای آن‌ها در محیط‌زیست ارائه می‌دهد (Dragović *et al.*, 2008). نتایج به‌دست آمده بیانگر همبستگی منفی کروم با رس و pH در سطح آماری ۰/۰۵ نشان می‌باشد، همچنین فلز نیکل همبستگی منفی با ذرات شن و همبستگی مثبت با سیلت در سطح آماری ۰/۰۱ داشت. (Suresh *et al.*, 2012) در مطالعه‌ای مشابه علت همبستگی مثبت نیکل با سیلت را در نوع کاتیون‌های موجود در سطح این ذره و مقدار فلزات در خاک دانستند.

پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد آلودگی نیکل در خاک به‌طور کلی ناشی از مواد شیمیایی کشاورزی یا رسوب ناشی از فعالیت‌های صنعتی است (Maas *et al.*, 2010). کمترین مقدار ضریب تغییرات در منطقه مربوط به فلز کروم (۸/۷۹ درصد) بود در نتیجه می‌توان گفت فلز کروم توزیع همگنی در منطقه مورد مطالعه دارد. (Baltas *et al.*, 2020) در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های استان سینوب ترکیه گزارش دادند عدم وجود تغییرات زیاد یک عنصر در یک منطقه بیانگر محدود بودن عوامل دخیل در تغییر غلظت این فلز در منطقه می‌باشد و می‌توان بیان کرد که غلظت این فلز بیشتر تحت تأثیر منابع زمین‌زاد است. همچنین ضریب تغییرات بالای برخی از ویژگی‌های خاک و تغییرات زیاد این ویژگی‌ها در خاک منطقه را نیز، می‌توان دلیل دیگر عدم یکنواختی توزیع فلزات با پتانسیل آلاینده‌گی در منطقه دانست (Cerqueira *et al.*, 2012 Arenas-Lago *et al.*, 2014).

جدول ۲- آمار توصیفی عناصر در منطقه مورد مطالعاتی (بر حسب میلی‌گرم بر کیلوگرم)

Table 2- Descriptive statistics of studied elements (mg/kg)

عنصر Element	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Standard deviation	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis	ضریب تغییرات CV (%)	میانگین پوسته زمین Earth's crust average
روی (Zn)	34.5	294.3	60/26	25.43	5.97	44.40	42.00	75
کروم (Cr)	2.5	86.40	50.38	4.48	2.31	10.50	8.79	100
نیکل (Ni)	40.60	75.00	50.96	12.67	-0.17	0.60	31.00	80
سرب (Pb)	0.80	100.50	7.08	15.85	4.40	23.45	182.45	14

CV: Coefficient of variability

جدول ۱- همبستگی بین ویژگی‌های خاک و فلزات سنگین  
Table 3- Pearson's correlation analysis of soil properties and heavy metal concentration

جرم مخصوص ظاهری (BD)	کربن آلی (SOC)	رس (Clay)	سیلت (Silt)	شن (Sand)	رسانایی الکتریکی (EC)	واکنش خاک (pH)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
روی (Zn)										1
کروم (Cr)									0.07	1
نیکل (Ni)								0.242**	0.059	1
سرب (Pb)							0.394**	0.193	0.395**	1
واکنش خاک (pH)						1	0.007	-0.151*	-0.069	-0.022
رسانایی الکتریکی (EC)					1	0.177*	-0.031	0.048	-0.085	-0.006
شن (Sand)				1	-0.080	-0.261**	-0.011	-0.267**	0.091	-0.045
سیلت (Silt)			1	-0.595**	0.345**	-0.364**	0.108	0.267**	0.058	-0.019
رس (Clay)		1	-0.375**	-0.466**	0.052	0.072	-0.127	0.006	-0.156*	0.068
کربن آلی (SOC)	1	-0.131	0.189	-0.043	0.047	-0.159	-0.113	-0.058	0.015	-0.127
جرم مخصوص ظاهری (BD)	0.174*	-0.071	0.040	0.051	0.053	-0.031	-0.045	0.149*	-0.121	-0.075

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

\* and \*\* indicates significant at  $P < 0.05$  and at  $P < 0.01$ , respectively. SOC: Soil Organic C; EC: Electrical Conductivity

اختصاص داد و بارگذاری مثبت بالا با سیلت و بارگذاری متوسط با نیکل نشان داد. مؤلفه سوم دارای بارگذاری مثبت بر روی شن و کروم بود و ۱۶/۶۴ درصد از واریانس کل را توضیح داد و مؤلفه چهارم با ۱۱/۲۵ درصد از واریانس کل، دارای حداکثر بارگذاری روی جرم مخصوص ظاهری بود. مؤلفه اول شامل عناصر روی، سرب و نیکل را با توجه به اینکه غلظت‌های بالای این عناصر در نزدیکی مناطق صنعتی در مقایسه با سایر نقاط دیده می‌شود، می‌توان به عنوان مؤلفه تحت تأثیر عملکرد انسانی دانست. این در حالی است که رودریگز و همکاران (Rodríguez *et al.*, 2008) بیان داشتند مواد مادری و فرآیندهای پدوژنیک عوامل اصلی در میزان و توزیع نیکل و کروم در خاک هستند، از این رو با توجه به اینکه فلز نیکل دارای بارگذاری مثبت و متوسط در هر دو مؤلفه اول و مؤلفه دوم داشت و توزیع غلظت یکنواخت‌تری نسبت به روی و سرب در منطقه داشت، می‌توان بیان داشت فلز نیکل تحت تأثیر عملکرد هر دو عامل زمین‌زاد و انسان‌زاد می‌باشد. در همین راستا هرمزی و همکاران (Hormozi Nejad *et al.*, 2017) نیز در مطالعه ای مشابه در خاک‌های اطراف صنایع فولاد خوزستان گزارش دادند فلزات آهن و نیکل تحت تأثیر عملکرد هر دو عامل طبیعی و انسانی، فلزات روی، سرب و منگنز تحت تأثیر عامل انسان‌زاد و فلز کروم هم احتمالاً دارای منشأ طبیعی در این منطقه است. نتایج به دست آمده از تجزیه و تحلیل خوشه‌ای (CA) همانند نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) بود و آن را تایید می‌کند (شکل ۲). این نتایج دو خوشه اصلی را

در سطح آماری ۰/۰۱ همبستگی معنی‌داری بین عناصر روی-سرب، روی-نیکل و سرب-نیکل مشاهده شد. اما فلز کروم، همبستگی مثبت معنی‌داری با دیگر عناصر نشان نداد. بر اساس مطالعه (Thollkappian *et al.*, 2018) ضریب همبستگی مثبت بین فلزات سنگین در خاک ممکن است نشان‌دهنده منبع مشترک و یا قرار گرفتن در معرض پدیده‌های ژئوشیمیایی مشابه در طی زمان باشد. همچنین (Damian *et al.*, 2012) بیان داشتند همبستگی ضعیف بین فلزات دارای پتانسیل آلاینده‌ی، بیشتر مربوط به مواد سازنده خاک می‌باشد.

#### تجزیه و تحلیل آماری چند متغیره ویژگی‌های خاک

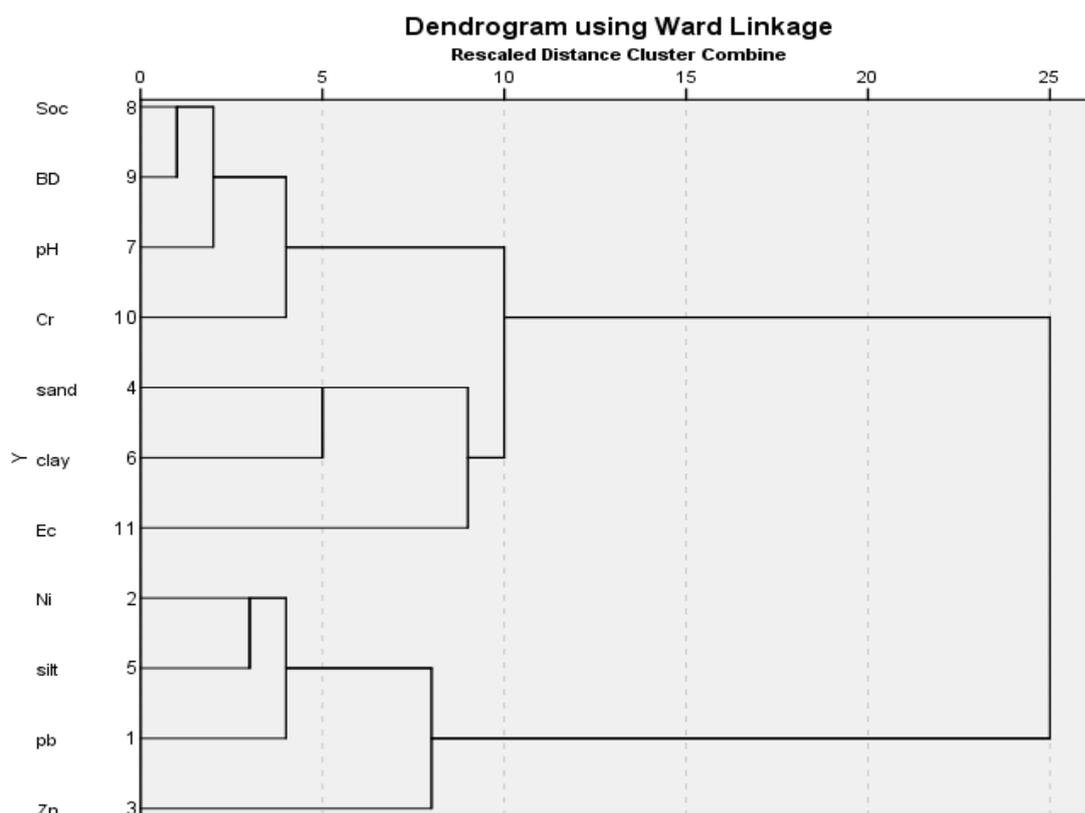
تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) از روش‌های آماری چند متغیره است که برای ارزیابی میزان آلودگی فلزات و شناسایی منبع احتمالی فلزات مورد بررسی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۴). نتایج این تحلیل نشان داد که مؤلفه اول تا چهارم پس از چرخش واریانس، ۷۲٪ از کل واریانس موجود را در نمونه‌های خاک با مقادیر ویژه بیشتر از یک را به خود اختصاص می‌دهند. در چرخش واریانس مقادیر عامل‌های با فاکتور وزنی بیش‌تر از ۰/۷۱ قابل توجه و مقادیر کمتر از ۰/۳۱ ضعیف در نظر گرفته می‌شوند (Yinxian *et al.*, 2011). بر همین اساس، مؤلفه اول با ۲۳/۴۸ درصد از واریانس کل، دارای عامل وزنی مثبت و همبستگی بالا با عناصر روی، سرب و همبستگی متوسط با نیکل داشت. مؤلفه دوم ۲۰/۷۶ درصد از کل واریانس را به خود

عنصری به صورت حداقل، حداکثر و میانگین نمایش داده شده است. با توجه به این داده‌ها، میانگین فاکتور آلودگی (CF) در همه نمونه‌ها کمتر از ۱ و در محدوده آلودگی کم می‌باشد. از نظر شاخص CF تنها ۱/۵ درصد از نمونه‌ها آلودگی شدید و ۱۰ درصد دارای آلودگی متوسط به عنصر روی بودند و در سایر نمونه‌ها آلودگی مشاهده نگردید. همچنین ۲ درصد از نمونه‌های خاک از نظر عنصر سرب دارای آلودگی شدید و ۸ درصد دارای آلودگی متوسط بودند. با توجه به طبقه‌بندی این شاخص ۱۰۰ درصد نمونه‌های خاک از نظر عناصر کروم و نیکل در طبقه با آلودگی کم قرار دارند. علاوه بر این، متوسط مقدار شاخص غنی‌شدگی (EF) برای فلزات سرب (۱/۹۳)، نیکل (۲/۶۱)، روی (۳/۵۰) و کروم (۲/۰۷) به دست آمد، این نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه میانگین تغییر فاکتور غنی‌شدگی دارای روند: سرب > کروم > نیکل > روی می‌باشد. با توجه به میانگین این شاخص، سطح غنی‌شدگی برای عناصر روی، کروم و نیکل متوسط و برای فلز سرب کم می‌باشد.

نشان می‌دهد که فلز کروم، pH، کربن آلی، شن، رس، جرم مخصوص ظاهری و EC در یک خوشه و عناصر روی، سرب، نیکل و سیلت خوشه دیگر را تشکیل می‌دهند. خوشه اول شامل ویژگی‌هایی است که عمدتاً متأثر از مواد مادری و فرآیندهای خاک‌سازی می‌باشند، در نتیجه می‌توان بیان کرد فلز کروم در منطقه دارای منشأ زمین‌زاد می‌باشد و فلزات روی و سرب با توجه به نحوه پراکنش و افزایش در مجاورت مناطق صنعتی و جاده‌های پر حمل‌ونقل در منطقه، بیشتر تحت تأثیر عامل انسان‌زاد می‌باشند. که این نتایج به‌خوبی با تحلیل همبستگی پیرسون مطابقت دارند.

### ارزیابی آلودگی فلزات سنگین

در این مطالعه از شاخص‌های ژئوشیمیایی تک عنصری CF، EF، Igeo و شاخص‌های ترکیبی PI و MPI برای درجه‌بندی سطوح آلودگی خاک‌های منطقه استفاده شد. در جدول ۵ مقدار شاخص‌های تک



شکل ۲- تحلیل خوشه‌ای ویژگی‌های مختلف خاک در منطقه مورد مطالعه

Figure 2- Cluster analysis of different soil properties in the study area

جدول ۴- تجزیه مؤلفه‌های اصلی در نمونه‌های خاک سطحی

Table 4- Principal component analysis of the surface soil properties (0-10 cm soil depth)

	روی (Zn)	کروم (Cr)	نیکل (Ni)	سرب (Pb)	اسیدیته (pH)	رسانایی الکتریکی (EC)	شن (Sand)	سیلت (Silt)	رس (Clay)	کربن آلی (SOC)	جرم مخصوص ظاهری (BD)
مؤلفه اول PC1	<b>0.714</b>	0.134	<b>0.604</b>	<b>0.836</b>	0.034	0.035	-0.097	0.119	-0.031	-0.175	0.019
مؤلفه دوم PC2	-0.101	0.145	<b>0.343</b>	0.081	-0.641	0.051	-0.626	<b>0.877</b>	-0.225	0.391	0.044
مؤلفه سوم PC3	-0.080	<b>0.402</b>	-0.161	0.160	0.023	0.315	<b>0.724</b>	0.028	-0.966	0.281	0.170
مؤلفه چهارم PC4	-0.093	-0.599	0.251	-0.133	0.188	0.117	-0.033	0.029	0.073	0.311	<b>0.792</b>

Results of principal components analysis in the soils studied

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی در خاک‌های مورد بررسی

مؤلفه‌های اصلی (Principal components)	مؤلفه اول PC1	مؤلفه دوم PC2	مؤلفه سوم PC3	مؤلفه چهارم PC4
مقادیر بردار ویژه >1 (Eigen value >1)	2.580	2.131	1.637	1.230
واریانس (Variance)	23.484	20.760	16.639	11.247
درصد تجمعی (Cumulative variance)	23.484	44.246	11.247	72.132

تشخیص داده شدند، بیشترین میزان زمین انباشتگی نیز در نزدیکی شهرک‌های صنعتی و به خصوص صنایع فولاد خوزستان دیده شد. به‌طورمیانگین شاخص زمین انباشتگی روند سرب <کروم >روی > نیکل را نشان داد. مقایسه میانگین شاخص زمین انباشتگی موجود در **جدول ۵** با طبقه‌بندی مولر نشان می‌دهد خاک منطقه نسبت به فلزهای مورد مطالعه کاملاً غیر آلوده است.

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین بر اساس دو شاخص ترکیبی (PI) و (MPI) در **جدول ۶** ارائه شده است. بر اساس مقدار عددی میانگین شاخص‌های (PI) و (MPI) کلاس آلودگی شدید را در خاک‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهند؛ که بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

با این حال مقدار میانگین فاکتور غنی‌شدگی کلیه عناصر مورد مطالعه در منطقه بیشتر از ۱/۵ بود که این امر نشان‌دهنده سهم زیاد فعالیت‌های انسانی در آلودگی محیطی است (Rashed, 2010). غنی‌شدگی فلزات مورد بررسی در برخی نمونه‌های خاک سطحی را می‌توان به فعالیت‌های انسانی از جمله فعالیت‌های صنعتی در منطقه، حمل‌ونقل و ترافیک و کاربرد سموم دفع آفات، کود و غیره مربوط دانست. محاسبه و بررسی شاخص زمین انباشتگی نشان داد که بیشتر نمونه‌های جمع‌آوری شده از منطقه مورد نظر در کلاس غیر آلوده قرار دارند و تنها ۲ درصد از نمونه‌های خاک از نظر عنصر روی و نیکل، کمی آلوده بودند، همچنین در ۱۰ درصد از نمونه‌های خاک انباشتگی متوسط فلز سرب دیده شد و بقیه نمونه‌ها فاقد انباشتگی عناصر با پتانسیل آلاینده‌گی

جدول ۵- آمار توصیفی برخی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در منطقه مورد مطالعه

Table 5- Descriptive statistics of some indices of heavy metal pollution in the study area

عنصر	شاخص آلودگی (CF)			شاخص غنی‌شدگی (EF)			شاخص زمین انباشت (Igeo)		
	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میانگین Mean
	روی (Zn)	0.49	4.21	0.86	1.81	18.90	3.50	-1.11	1.41
کروم (Cr)	0.02	0.86	0.50	0.10	4.16	2.07	-5.75	-0.64	-1.51
نیکل (Ni)	0.50	0.94	0.64	1.86	4.64	2.61	-0.74	0.14	-0.42
سرب (Pb)	0.02	7.18	0.50	0.09	21.87	1.93	-6.05	2.33	-2.48

جدول ۶- مقادیر شاخص‌های شاخص جامع آلودگی نمره (PI) و شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI)

Table 6- The values of Nemerow Comprehensive Pollution Index (PI) and Modified Pollution Index (MPI)

شاخص جامع آلودگی نمره (PI)				
شاخص جامع آلودگی نمره (PI)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
9.59	5.09	0.77	0.71	2.99
شاخص آلودگی اصلاح شده (MPI)				
شاخص کلی آلودگی اصلاح شده (MPI)	سرب (Pb)	نیکل (Ni)	کروم (Cr)	روی (Zn)
42.83	22.86	3.77	3.29	12.91

مرکزی استان خوزستان انجام گرفت. بر اساس نتایج، متوسط غلظت کل عناصر سرب، کروم، نیکل و روی، در خاک‌های منطقه مورد مطالعه، کمتر از دستورالعمل سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران و میانگین متوسط پوسته زمین مشاهده گردید. همچنین نتایج ماتریس ضربه همبستگی پیرسون نشان داد که فلزات سرب، نیکل و روی همبستگی مثبتی با یکدیگر داشته و همچنین غلظت فلز نیکل با محتوای سیلت خاک همبستگی مثبتی دارد. از نتایج CA و PCA، مشخص شد که هر دو عامل طبیعی و انسانی سهم بالایی در توزیع غلظت فلزات مورد بررسی در خاک‌های سطحی منطقه دارند. بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد که خاک‌های منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های تک عنصری CF و Igeo در کلاس آلودگی کم و بر اساس شاخص EF در کلاس غنی‌شدگی متوسط قرار می‌گیرند. این در حالی است که نتایج شاخص‌های تجمعی و یکپارچه PI و MPI حاکی از آلودگی شدید نمونه‌های خاک منطقه به عناصر انتخابی بود. این نتایج نشان داد استفاده هم‌زمان از روش‌های آماری چند متغیره و شاخص‌های آلودگی می‌تواند به منظور ارزیابی کمی و تعیین پتانسیل آلودگی مفید باشد.

### سپاسگزاری

هزینه‌های اجرای این پژوهش توسط معاونت پژوهشی، فناوری و ارتباط با جامعه دانشگاه شهید چمران اهواز (پژوهانه شماره SCU.AS1401.50) پرداخت شده است.

در همین راستا تحقیقات (Jiang et al., 2014) و (Zheng et al., 2015) نیز نشان داد که شاخص‌های ترکیبی از جمله شاخص آلودگی نمره به دلیل جامع بودن و عدم تمرکز بر آلودگی یک عنصر خاص، در پهنه‌بندی و ارزیابی شدت آلودگی و بررسی کیفیت اراضی از کارایی بالاتری برخوردار هستند. (Siyahati Ardakani et al., 2019) نیز در منطقه صنعتی اردکان با هدف ارزیابی اثر توسعه صنایع فولاد بر تجمع برخی عناصر کمیاب، به مقایسه عملکرد شاخص‌های تک عنصری و ترکیبی پرداختند و نتیجه گرفتند که شاخص‌های ترکیبی از جمله شاخص بار آلودگی در ارزیابی آلودگی و کیفیت خاک منطقه از کارایی بالاتری برخوردار بود. به‌طور کلی بررسی شاخص‌های آلودگی نشان داد که خاک‌های سطحی منطقه مورد مطالعه بر اساس شاخص‌های تک عنصری (CF و Igeo) به فلزات روی، نیکل، کروم و سرب، آلوده نیستند اما غنی‌شدگی متوسط این عناصر در خاک سطحی منطقه وجود دارد، با این حال نتایج به دست آمده از شاخص‌های ترکیبی آلودگی اصلاح شده و جامع آلودگی نمره بیانگر شدت بالای آلودگی تجمعی این فلزات در منطقه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی آلودگی خاک به عناصر روی، نیکل، کروم و سرب با استفاده از شاخص‌های مختلف زیست‌محیطی و بهره‌مندی از روش‌های آماری چند متغیره جهت شناسایی منابع احتمالی آلودگی و تعیین توزیع مکانی غلظت این عناصر در قسمتی از اراضی

### منابع

- Abyat, A., Azhdari, A., Jodaki, M., and Darvishi Khatoni, J. (2017). Study and separation of Quaternary sedimentary environments in Khuzestan plain. *Advanced Applied Geology*, 7(3): 49-64. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22055/aag.2017.21931.1702>.
- Al-Wabel, M.I., Sallam, A.E.A.S., Usman, A.R., Ahmad, M., El-Naggar, A.H., El-Saeid, M.H., and Al-Romian, F.A. (2017). Trace metal levels, sources, and ecological risk assessment in a densely agricultural area from Saudi Arabia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(6): 252. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5919-1>.
- Adimalla, N. (2020). Heavy metals pollution assessment and its associated human health risk evaluation of urban soils from Indian cities: a review. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1): 173-190.
- Adimalla, N., and Wang, H. (2018). Distribution, contamination, and health risk assessment of heavy metals in surface soils from northern Telangana, India. *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 684. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4028-y>.
- Ahmed, F., Fakhruddin, A.N.M., Imam, M.D., Khan, N., Khan, T.A., Rahman, M.M., and Abdullah, A.T.M. (2016).

- Spatial distribution and source identification of heavy metal pollution in roadside surface soil: a study of Dhaka Aricha highway, Bangladesh. *Ecological Processes* 5:2.
6. Amuno, S.A. (2013). Potential ecological risk of heavy metal distribution in cemetery soils. *Water, Air and Soil Pollution* 224 (2):1435.
  7. Arenas-Lago, D., Vega, F.A., Silva, L.F.O., and Andrade, M.L. (2014). Copper distribution in surface and subsurface soil horizons. *Environmental Science and Pollution Research*, 21:10997–11008.
  8. Baltas, H., Sirin, M., Gokbayrak, E., and Ozcelik, A.E. (2020). A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop province, Turkey. *Chemosphere*, 241: 125015. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125015>.
  9. Barakat, A., Ennaji, W., Krimissa, S., and Bouzaid, M. (2019). Heavy metal contamination and ecological-health risk evaluation in peri-urban wastewater-irrigated soils of BeniMellal city (Morocco). *International Journal of Environmental Health Research*. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1595540>.
  10. Bhuiyan, M.A.H., Parvez, L., Islam, M., Dampare, S.B., and Suzuki, S. (2010). Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh. *Journal of Hazardous Materials*, 173:384–392.
  11. Black, G., and Hartge, K. (1986). Bulk density. *Methods of Soil Analysis. Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*.
  12. Brady, J.P., Ayoko, G.A., Martens, W.N., and Goonetilleke, A. (2015). Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(5): 306.
  13. Cerqueira, B., Vega, F.A., Silva, L.F., and Andrade, L. (2012). Effects of vegetation on chemical and mineralogical characteristics of soils developed on a decantation bank from a copper mine. *Science of the Total Environment*, 421:220–229.
  14. Damian, F., Damian, G., Lăcătușu, R., Macovei, G., Iepure, G., Năprădean, I., Chira, R., Kollar, L., Rață, L., and Zaharia, D.C. (2008). Soils from the Baia Mare zone and the heavy metals pollution. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 3(1): 85-98.
  15. Dragović, S., Mihailović, N., and Gajić, B. (2008). Heavy metals in soils: distribution, relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources. *Chemosphere*, 72 (3): 491–495.
  16. Gee, G.W. and Bauder, J.W. (1986). Particle size analysis, In A. Klute (Ed), *Methods of Soil Analysis. Part I, American Statistical Association and Soil Science Society of America (ASA) Monograph*.
  17. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 14(8):975– 1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
  18. Hojati, S. (2017). Pollution assessment and source apportionment of arsenic, lead and copper in selected soils of Khuzestan Province, southwestern Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 10:528. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3316-2>.
  19. Hormozi Nejad, F., Rastmanesh, F., and Zarasvandi, A. (2017). Contamination assessment of heavy metals in the soils around Khouzestan Steel Company (KSC) (Ni, Mn, Pb, Fe, Zn, Cr). *Journal of Economic Geology*, 8(2):429-415. (In Persian with English abstract).
  20. Huang, Y., Chen, Q., Deng, M., Japenga, J., Li, T., Yang, X., and He, Z. (2018). Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in Southeast China. *Journal of Environmental Management*, 207:159–168.
  21. Ielpo, P., Leardi, R., Pappagallo, G., and Uricchio, V.F. (2017). Tools based on multivariate statistical analysis for classification of soil and groundwater in Apulian agricultural sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(16):13967–13978.
  22. Jiang, X., Lu, W., Zhao, H., Yang, Q., and Yang, Z. (2014). Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6):1599-610.
  23. Keshavarzi, A., and Kumar, V. (2019). Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research*, 29(5): 1–17. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1555638>.
  24. Kumar, V., Sharma, A., and Thukral, A.K. (2016). Assessment of soil enzyme activities based on soil samples from the Beas river bed, India using multivariate techniques. *Malaysian Journal of Soil Science*, 20:135–145.
  25. Kumar, V., Sharma, A., Bhardwaj, R. M., and Thukral, A. K. (2018). Temporal distribution, source apportionment, and pollution assessment of metals in the sediments of Beas River, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(8): 2162–2181.
  26. Loska, K., Wiechula, D., and Korus, I. (2004). Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, 30 (2):159–165.
  27. Maas, S., Schei, R., Benslama, M., Crini, N., Lucot, E., Brahmia, Z., and Giraudoux, P. (2010). Spatial distribution of heavy metal concentrations in urban, suburban and agricultural soils in a Mediterranean city of Algeria. *Environmental Pollution*, 158: 2294– 2301.

28. Mirsal, I.A. (2008). Soil pollution: origin, monitoring and remediation. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70777-6>
29. Nemerow, N.L. (1991). Stream, lake, estuary, and ocean pollution. New York (USA): John Wiley and Sons, Inc.
30. Qingjie, G., Jun, D., Yunchuan, X., Qingfei, W., and Liqiang, Y. (2008). Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3):230–241.
31. Rashed, M.N. (2010). Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3):739–746.
32. Rezapour, S., Golmohammad, H., and Ramezanpour, H. (2014). Impact of parent rock and topography aspect on the distribution of soil trace metals in natural ecosystems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(7): 2075–2086.
33. Rodriguez, R., and Redman, R. (2008). More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*. 59: 1109–1114. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm342>.
34. Salminen, R., Batista, M., Bidovec, M., Demetriades, A., DeVivo, B., DeVos, W., Duris, M., and Tarvainen, T. (2005). FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1 : Background Information, Geochemical Atlas of Europe Part 2 Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, EuroGeoSurveys.
35. Sakram, G., Machender, G., Dhakate, R., Saxena, P. R., and Prasad, M. D. (2015). Assessment of trace elements in soils around Zaheerabad Town, Medak District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Earth Sciences*, 73: 4511–4524.
36. Siyahati Ardakani, G., Mirsanjari, M., Azimzadeh, H., and Solgi, E. (2019). Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Topsoil Around Major Industries of Ardakan City. *Toloo-e-Behdasht Journal*, 17(6): 95-100. (In Persian with English abstract).
37. Song, T., Su, X., He, J., Liang, Y., and Zhou, T. (2018). Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in agricultural soils in Xinglonggang, Northeastern China. *Human and Ecological Risk Assessment*, 24(2): 509–521.
38. Walkley, A. and Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1): 29-38.
39. Stafilov, T., Sajin, R., Boev, B., Cvetkovic, J., Mukaetov, D., Andreevski, M., and Lepitkova, S. (2010). Distribution of some elements in surface soil over the Kavadarci region, Republic of Macedonia. *Environmental Earth Sciences*, 61(7):1515–1530.
40. Suresh, G., Sutharsan, P., Ramasamy, V., and Venkatachalapathy, R. (2012). Assessment of spatial distribution and potential ecological risk of the heavy metals in relation to granulometric contents of Veeranam lake sediments, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 84: 117–124. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.06.027>.
41. Tian, K., Huang, B., Xing, Z., and Hu, W. (2017). Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China. *Ecological Indicators*, 72: 510–520.
42. Tholkappian, M., Ravisankar, R., Chandrasekaran, A., Jebakumar, J.P.P., Kanagasabapathy, K.V., Prasad, M.V.R., and Satapathy, K.K. (2018). Assessing heavy metal toxicity in sediments of Chennai Coast of Tamil Nadu using Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectroscopy (EDXRF) with statistical approach. *Toxicology Reports*, 5:173–182.
43. Thomas, G.W. (1996). Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis. Madison (WI): American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
44. Turekian, K., and Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Geological Society of America Bulletin* 72: 175-192/
45. Wang, Y., Hu, J., Xiong, K., Huang, X., and Duan, S. (2012). Distribution of heavy metals in core sediments from Baihua Lake. *Procedia Environmental Sciences*, 16:51–58.
46. Wilding, L. P. (1985). Spatial variability: its documentation, accomodation and implication to soil surveys. In *Soil spatial variability*, Las Vegas NV, 30 November-1 December 1984.
47. Yalcin, M.G., Battaloglu, R., and Ilhan, S. (2007). Heavy metal sources in Sultan Marsh and its neighborhood, Kayseri, Turkey. *Environmental Geology*, 53(2): 399-415.
48. Ye, C., Li, S., Zhang, Y., and Zhang, Q. (2011). Assessing soil heavy metal pollution in the water-level-fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Hazardous Materials*, 191(3): 366-372.
49. Yinxian, S., Junfeng, J., Zhongfang, Y., Xuyin, Y., Changping, M., Ray, F., and Ayoko, G. (2011). Geochemical behavior assessment and apportionment of heavy metal contaminants in the bottom sediments of lower reach of Changjiang River, *Catena*, 85:73 – 81
50. Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C., and Posmentier, E.S. (2006). Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, 355 (1– 3): 176– 186
51. Zhang, C., Yang, Y., Li, W., Zhang, C., Zhang, R., and Mei, Y. (2015). Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China. *Environmental Monitoring and Assessment*,





## Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

N. Torabinezhad<sup>1</sup>- A. Zarrin<sup>2\*</sup>- A.A. Dadashi-Roudbari<sup>3</sup>

Received: 23-02-2023

Revised: 09-05-2023

Accepted: 10-05-2023

Available Online: 10-05-2023

### How to cite this article:

Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A.A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the standardized evapotranspiration-precipitation index (SPEI). *Journal of Water and Soil*, 37(3), 473-486. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257>

### Introduction

Drought is a costly natural hazard with wide-ranging consequences for agriculture, ecosystems, and water resources. The purpose of this research is to determine the characteristics of drought and its types in Iran during the last four decades. Drought turns into different types in the water cycle and imposes many negative consequences on natural ecosystems and different socio-economic sectors. According to International Disaster Database (EM-DAT), drought accounts for 59% of the economic losses caused by climate change. Many parts of the world have experienced extensive and severe droughts in recent decades. In Iran, droughts have occurred frequently during the last four decades and have become more severe in the last decade.

### Materials and Methods

In this research, we used precipitation, temperature, wind speed, and sunshine hours of 49 synoptic meteorological stations during 1981-2020. Drought has been investigated with The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) in four scales of 3, 6, 12, and 24 months, which represent meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic droughts. To calculate the SPEI, the precipitation variable (P) is analyzed with the cumulative difference between P and potential evapotranspiration (PET). In other words, surplus/deficit climate water balance (CWB) is considered. The FAO Penman-Monteith method was used to calculate PET. Then, using the RUN theory, the characteristics of drought, including its magnitude, duration, intensity, and frequency, were determined for all four investigated scales.

### Results and Discussion

The results showed that the frequency of drought events fluctuates from a minimum of 12.13% to a maximum of 18.13% in different regions of the country during 1981-2020. The climatological study of drought characteristics shows that the most frequent drought events occurred in the west, southwest, and southern coasts of the Persian Gulf and northwest of Iran compare to other regions of the country. This is while the duration of the drought period is longer in the eastern and interior regions of Iran. Examining the types of droughts shows that more than 60% of the droughts occurring in Iran are moderate droughts. Moderate and severe droughts are mostly seen in the west, southwest, and northwest of Iran. The duration of Iran's drought varies from at least 3 months in meteorological drought to more than 8 months in socio-economic drought. Therefore, droughts are more frequent in the western regions and longer in the eastern regions. The intensity of drought is also higher in the eastern and interior regions than in the western and northwestern regions of Iran. The decadal changes of drought show that the duration and magnitude of drought in Iran have increased and the severity of the drought has decreased during recent decades.

### Conclusion

The intensity, magnitude, and duration of the drought period in Iran increased with the increase of the

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

(\*- Corresponding Author Email: [zarrin@um.ac.ir](mailto:zarrin@um.ac.ir))

DOI: [10.22067/jsw.2023.81322.1257](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257)

investigated scales from 3 months to 24 months. Examining the average frequency of drought showed that as we move from meteorological drought to socio-economic drought, the frequency of drought increases, which confirms the previous findings. The eastern and southeastern parts of Iran have experienced a longer duration and larger magnitude of drought than the western and northwestern Iran, which can be caused by the climate conditions of this region, i.e., high temperature and evapotranspiration and less precipitation, and seasonality.

The maximum magnitude of drought in Iran is related to socio-economic drought (SPEI-24) followed by hydrological drought (SPEI-12). This characteristic has increased especially in the last two decades (2001-2020) compared to the previous decades (1981-2000). This is while the magnitude of meteorological (SPEI-3) and agricultural (SPEI-12) droughts do not increase much in the last two decades compared to the previous decades.

Anthropogenic activities play a more prominent role in increasing the magnitude of socio-economic (SPEI-24) and hydrological (SPEI-12) droughts than natural forcing. With the construction of many dams and the digging of countless deep wells, as well as changing the direction of rivers, the water cycle has been completely affected by human activities during the last four decades in Iran. Obviously, anthropogenic activities play an important role in increasing the magnitude of hydrological and socio-economic droughts. In contrast, meteorological and agricultural droughts have not shown many changes in Iran.

The results of the decadal average of drought intensity showed that this characteristic of drought in the last decade (2011-2020) has decreased compared to previous decades (1981-2010). On the other hand, as mentioned earlier, the magnitude and duration of drought, especially for hydrological and socio-economic droughts, have increased in the last two decades (2001-2020). Therefore, the reason for the decrease in the severity of the drought has a statistical explanation before it has a climatic reason because the severity of the drought is calculated by dividing the magnitude of the drought by its duration.

**Keywords:** Characteristics of drought, Drought, Iran, RUN theory, Types of droughts

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۸۶-۴۷۳

## بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

نسترن ترابی نژاد<sup>۱</sup> - آذر زرین<sup>۲\*</sup> - عباسعلی داداشی رودباری<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰

### چکیده

خشکسالی یک مخاطره طبیعی پرهزینه با پیامدهای گسترده بر کشاورزی، اکوسیستم و منابع آب است. هدف از این پژوهش بررسی مشخصه‌های خشکسالی و انواع آن در ایران طی چهار دهه گذشته است. برای این منظور از داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۲۰ استفاده شده است. خشکسالی با شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) در چهار مقیاس ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته است. سپس با استفاده از تئوری Run مشخصه‌های خشکسالی شامل بزرگی، طول دوره، شدت و فراوانی آن برای هر چهار مقیاس مورد بررسی محاسبه شد. نتایج نشان داد که در دوره چهار ساله مورد بررسی فراوانی رخداد خشکسالی از حداقل ۱۲/۱۳ درصد تا حداکثر ۱۸/۱۳ درصد از کل ماه‌ها در مناطق مختلف کشور در نوسان است. بررسی اقلیم‌شناسی مشخصه‌های خشکسالی در پهنه ایران نشان می‌دهد که فراوانی خشکسالی در غرب، جنوب‌غرب، سواحل خلیج فارس و شمال‌غرب ایران بیش‌تر از سایر مناطق کشور است. این در حالی است که طول دوره خشکسالی در مناطق شرقی و مرکزی ایران بالاتر است. بررسی انواع خشکسالی نشان می‌دهد که بیش از ۶۰ درصد از خشکسالی‌های رخ داده در ایران از نوع خشکسالی متوسط است. خشکسالی‌های متوسط و شدید در ایران بیش‌تر در غرب، جنوب‌غرب و شمال‌غرب ایران دیده می‌شوند. طول دوره خشکسالی ایران از حداقل ۳ ماه برای SPEI-3 تا بیش از ۸ ماه برای SPEI-24 در تغییر است. شدت خشکسالی نیز در مناطق شرقی و داخلی بیش‌تر از مناطق غربی و شمال‌غربی ایران است. تغییرات دهه‌ای خشکسالی نیز نشان می‌دهد که طی دهه‌های اخیر طول دوره و بزرگی خشکسالی در ایران افزایش یافته و شدت خشکسالی کاهش داشته است.

واژه‌های کلیدی: انواع خشکسالی، تئوری RUN، خشکسالی، مشخصه‌های خشکسالی، ایران

### مقدمه

های مختلف اجتماعی-اقتصادی پیامدهای منفی بسیاری را تحمیل می‌کند (Zhuang et al. 2022). بر اساس آمار پایگاه بین‌المللی بلایای طبیعی (EM-DAT, 2021)، خشکسالی ۵۹ درصد از خسارات اقتصادی ناشی از تغییر اقلیم را به خود اختصاص می‌دهد. بسیاری از نقاط جهان طی دهه‌های اخیر خشکسالی‌های زیادی را تجربه کرده‌اند (Cook et al., 2020). در ایران نیز خشکسالی طی چهار دهه گذشته

خشکسالی یکی از شایع‌ترین و زیانبارترین مخاطرات طبیعی است و پیامدهای منفی زیادی را در بخش‌های مختلف از جمله منابع آب (Pokhrel et al., 2021)، محیط زیست (Bachmair et al., 2016) و کشاورزی (Wu et al., 2020) به دنبال دارد. خشکسالی در چرخه آب به انواع مختلفی تبدیل می‌شود و بر اکوسیستم‌های طبیعی و بخش

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: Zarrin@um.ac.ir)

\*- نویسنده مسئول:

که آمار ایستگاه‌های هواشناسی در دسترس است به دفعات رخ داده و در دهه گذشته فراوانی آن بیش‌تر شده است.

رخدادهای خشکسالی در یک تعریف ساده و کلی به تغییرات در بی‌هنجاری‌های هیدرواقليمی مرتبط است (Heudorfer and Stahl, 2017). در طول رخداد خشکسالی، ویژگی‌های آن همانند زمان‌بندی مراحل مختلف خشکسالی (به عنوان مثال، شروع و پایان)، فراوانی، مدت، شدت و بزرگی انواع مختلف خشکسالی تغییر می‌کند. لذا بررسی صحیح خشکسالی باید دربرگیرنده انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن باشد تا بتوان شناختی صحیح نسبت به این پدیده داشت.

برای بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در مقیاس‌های زمانی-مکانی مختلف، معمولاً از شاخص‌های استاندارد استفاده می‌شود. برای این منظور طی دهه‌های گذشته شاخص‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص بارش استاندارد شده (SPI) (McKee et al., 1993)، شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010)، شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) (Palmer, 1965)، شاخص رطوبت خاک استاندارد شده (SSMI) و شاخص خشکسالی چند متغیره (MSDI) (Hao and AghaKouchak, 2013) اشاره کرد. از بین شاخص‌های خشکسالی مختلف، دو شاخص SPI و SPEI به عنوان پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، شاخص SPEI نسبت به شاخص SPI پاسخی سریع‌تر و روشن‌تر به تغییرات رطوبتی نشان می‌دهد و در نتیجه در اقلیم‌های خشک و فوق‌العاده خشک ایران به‌صورت دقیق‌تری خشکسالی را پیش می‌کند (Bazrafshan et al., 2017). بر این اساس در این پژوهش نیز از شاخص خشکسالی SPEI برای مطالعه خشکسالی در ایران استفاده شد. ایران یکی از کشورهای آسیب‌پذیر در مواجهه با خشکسالی‌هایی با شدت بالا است که خسارات اجتماعی-اقتصادی بزرگی را در چند دهه گذشته متحمل شده است که به‌طور مشخص در نیم قرن گذشته می‌توان به خشکسالی‌های سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۷۲، خشکسالی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۰ و خشکسالی گسترده ۱۴۰۰ اشاره کرد. بنابراین، شناخت مشخصه‌های خشکسالی برای ارائه راهبردهای سازگاری با خطرات خشکسالی ضروری است. تغییرات خشکسالی در توالی‌های مختلف زمانی منجر به پاسخ متفاوت سامانه اقلیم به خشکسالی می‌شود. بنابراین لازم است تا مقیاس‌های مختلف زمانی خشکسالی در کشور مورد بررسی قرار گیرد. مقیاس زمانی خشکسالی تعیین می‌کند که چه نوع خشکسالی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. بر اساس استاندارد ارائه شده از سوی سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، دوره‌های زمانی ۱ و ۳ ماهه خشکسالی هواشناسی یا کوتاه مدت، دوره ۶ ماهه خشکسالی کشاورزی و دوره ۱۲ ماهه و بیش‌تر خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و یا بلند مدت را برآورد می‌کنند (Svoboda et al., 2012). علاوه بر انواع خشکسالی، مشخصه‌های خشکسالی شامل طول دوره، بزرگی، شدت و

فراوانی می‌باشند که در درک وضعیت خشکسالی کمک می‌کنند. خشکسالی با توجه پیامدهای منفی بسیاری که در کشاورزی، منابع آب، محیط زیست، مهاجرت‌های اجباری و سایر بحران‌های اجتماعی-اقتصادی دارد مورد توجه بسیاری در سطح جهانی قرار گرفته است. بررسی پژوهش‌های انجام شده از خشکسالی با تاکید بر مشخصه‌های آن نشان می‌دهد که خشکسالی در سطح جهانی طی سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است (Cook et al., 2020). افزایش تبخیر-تعرق در نتیجه گرمایش جهانی نیز به عنوان یک محرک جدی در افزایش فراوانی خشکسالی در سطح جهانی معرفی شده است (Pour et al., 2020). بررسی‌های مشخصه‌های خشکسالی در سطح منطقه ای نیز افزایش این پدیده را تایید کرده است. به‌طوری که لی و همکاران (Li et al., 2020) افزایش کلی شدت و فراوانی خشکسالی را طی سال‌های ۲۰۱۵-۱۹۹۸ در چین نشان داده‌اند. روند افزایشی مشخصه‌های خشکسالی به ویژه برای فراوانی و طول دوره خشکسالی در سایر مناطق جهان همانند پاکستان (Ullah et al., 2022)، راجستان هند (Mehta and Yadav, 2022)، حوضه رودخانه یانگ تسه چین (Shi et al., 2022)، حوضه رودخانه دجله در کشور ترکیه (Gumus et al., 2023) و کشور چین (Zhao et al., 2023) نیز تایید شده است.

در سال‌های اخیر پژوهشگران مختلفی پدیده خشکسالی در ایران را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج مطالعات (Ghabaei et al., 2016; Bazrafshan, 2017; Sobhani et al., 2019; Zarei, 2019) حاکی از روند افزایش آن در مناطق مختلف کشور بوده است. پژوهش‌هایی همانند مساعدی و همکاران (Mosaedi et al., 2017) که مشخصه‌های خشکسالی را در ایران مورد بررسی قرار داده‌اند نشان داده‌اند که تغییراتی در مشخصه‌های خشکسالی با شاخص RDI و زمان رخداد آن در مقیاس ماهانه و بخصوص ماه‌های فصل بهار مشهود است. میان آبادی و همکاران (Mianabadi et al., 2022) خشکسالی‌های کوتاه مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) را با شاخص SPI در جنوب شرق ایران با استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (SPI-3، SPI-6 و SPI-9) با شدت کمتر کوتاه‌تر شده‌اند. در یک مطالعه دیگر اصفهانی و همکاران (Isfahani et al., 2022) نیز با بررسی مشخصه‌های خشکسالی در ایران با شاخص خشکسالی استاندارد چند متغیره (MSDI) نشان دادند که در مناطق جنوبی، جنوب شرقی، شمال شرق و برخی از مناطق غربی کشور طول دوره و بزرگی خشکسالی بیشینه است. برخی دیگر از پژوهش‌ها همچون کاظم زاده و همکاران (Kazemzadeh et al., 2022) به دلیل کمبود ایستگاه هواشناسی در ایران با استفاده از داده‌های مختلف ماهواره‌ای به شناسایی رخداد‌های خشکسالی پرداختند. آن‌ها نشان دادند که شدیدترین رخداد‌های خشکسالی هواشناسی شناسایی شده توسط شاخص‌های SPEI، SPI و MSPI در سال‌های

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

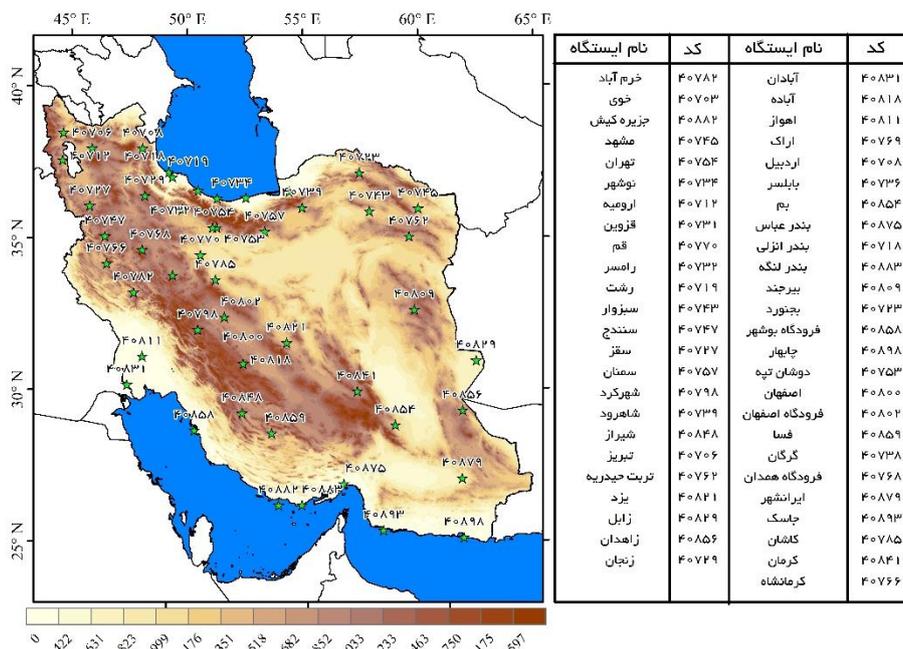
منطقه مورد مطالعه تحقیق حاضر کشور ایران است (شکل ۱). ایران کشوری با اقلیم غالب خشک و نیمه خشک است. با این حال، ایران دارای تنوع اقلیمی بسیار زیادی است، به طوری که از پهنه‌های بارانی و بسیار مرطوب سواحل جنوبی دریای خزر با بارش نزدیک به ۲۰۰۰ میلی‌متر تا مناطق بسیار خشک داخلی و جنوب‌شرقی با بارش حدود ۱۰۰ میلی‌متر متغیر است. از نظر توپوگرافی می‌توان گفت که ایران کشوری مرتفع است و دو رشته کوه البرز و زاگرس نقش مهمی را در شکل‌گیری اقلیم ایران داشته‌اند.

### داده‌های مورد استفاده

داده‌های روزانه بارش، دما، سرعت باد و ساعات آفتابی ایستگاه‌های همدید کشور طی دوره ۱۹۸۱-۲۰۲۰ در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل کیفی داده‌ها بر اساس کمترین داده‌های مفقود در سری زمانی برای دوره ۴۰ ساله بررسی شده است. برای این منظور ایستگاه‌هایی که بیش از ۱۰ درصد از کل سری زمانی روزانه آن‌ها (۱۹۸۱-۲۰۲۰) را داده‌های مفقود در بر گرفته است از مجموع داده‌ها حذف شدند.

۱۹۹۸-۲۰۰۱، ۲۰۰۸-۲۰۰۹، ۲۰۱۰-۲۰۱۲، و ۲۰۱۶-۲۰۱۷ بوده است.

بررسی منابع نشان می‌دهد که علیرغم انجام پژوهش‌های مختلف و پیشرفت‌های زیادی که در دهه‌های اخیر برای توسعه روش‌های بررسی خشکسالی انجام شده است، با این حال مطالعه‌ای که ترکیبی از انواع خشکسالی‌ها و مشخصه‌های آن را بررسی کرده باشد کماکان انجام نشده و یا در یک منطقه جغرافیایی بخصوص از کشور مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس مسئله اصلی این تحقیق بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران است. برای این منظور ابتدا انواع خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته، سپس نوع خشکسالی رخ داده از منظر خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت مشخصه‌های رخداد خشکسالی (شدت، بزرگی، فراوانی و طول دوره) مطالعه شده است. لذا در این تحقیق بررسی توأمان مشخصه‌های خشکسالی و نوع خشکسالی رخ داده برای خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) و بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24) در گستره ایران مورد توجه قرار گرفته است. انتظار می‌رود نتایج این بررسی در مدیریت خشکسالی در مناطق مختلف کشور مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های همدید مورد استفاده

Figure 1- The location of the study area with the synoptic stations

خشکسالی در شاخص SPEI در سه دسته خشکسالی متوسط (مقدار شاخص ۱- تا ۱/۴۹-)، خشکسالی شدید (۱/۵- تا ۱/۹۹-) و خشکسالی خیلی شدید (۲- و کمتر) تعریف می‌شوند (Vicente-Serrano et al., 2010). برای استخراج مشخصه‌های مختلف خشکسالی از تئوری (RUN) استفاده می‌شود (Yevjevich, 1967). بر اساس این تئوری یک رخداد خشکسالی زمانی شروع می‌شود که یک شاخص خشکسالی (در این تحقیق شاخص SPEI) به زیر آستانه مربوطه (آستانه خشکسالی ۱- است) برسد. زمانی که مقدار شاخص به طور مداوم زیر یک آستانه (یعنی مقدار منفی) باشد آن رخداد خشکسالی ادامه می‌یابد و زمانی که مقدار شاخص بالاتر از سطح آستانه (یعنی مقدار مثبت) باشد خشکسالی پایان می‌یابد. بر این اساس، طول یک رخداد خشکسالی، مدت خشکسالی (رابطه ۲)، مقدار شاخص انباشته شده زیر آستانه مربوطه در طول یک رخداد خشکسالی، بزرگی خشکسالی (رابطه ۳) و میانگین شاخص در یک رخداد خشکسالی، شدت خشکسالی (رابطه ۴) نامیده می‌شود.

$$DD = DTT - DIT \quad (2)$$

در رابطه ۲، DD مدت زمان رخداد خشکسالی، DTT زمان پایان خشکسالی و DIT زمان شروع خشکسالی است.

$$DS = \sum_i^n SPEI_i \quad (3)$$

در رابطه ۳، DS بزرگی خشکسالی، SPEI<sub>i</sub> مقدار شاخص SPEI و n تعداد کل ماه‌هایی با رخداد خشکسالی است.

$$DI = \frac{DS}{DD} \quad (4)$$

در رابطه ۴، DI شدت خشکسالی، DS بزرگی خشکسالی و DD طول دوره رخداد خشکسالی است.

به غیر از سه مشخصه اصلی خشکسالی که در روابط ۲ تا ۴ به آن اشاره شد مشخصه چهارمی نیز برای خشکسالی وجود دارد که معمولاً در یک دوره آماری از آن استفاده می‌شود. فراوانی خشکسالی به درصد رخداد خشکسالی اشاره دارد (رابطه ۵).

$$DF = \frac{DE}{N} \times 100 \quad (5)$$

در این رابطه DF فراوانی رخداد خشکسالی، DE ماه‌هایی با رخداد خشکسالی ( $SPEI \leq -1$ ) و N تعداد کل ماه‌ها است.

## نتایج و بحث

### انواع خشکسالی در ایران

نتایج نشان داد بالاترین درصد رخداد خشکسالی در ایران از نوع خشکسالی متوسط است که شاخص در آن از ۱- تا ۱/۴۹- در تغییر است. در متوسط پهنه‌ای ایران برای هر چهار شاخص SPEI-3، SPEI-6، SPEI-12 و SPEI-24 درصد خشکسالی در مجموع حدود ۱۶ درصد است. خشکسالی‌های خیلی شدید در ایران حداقل ۱/۲۳ درصد

فقدان آماری بیش از ۱۰ درصد در سری زمانی منتخب برای داده‌های بارش به دلیل حساسیت روند خطی سری‌های روزانه مناسب نمی‌باشد (Zolina et al., 2005). بر این اساس ۴۹ ایستگاه همدید که موقعیت آن‌ها در شکل ۱ آمده است مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از داده‌های دمای کمینه، دمای بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل با روش پنمن-مانتیت استفاده شد که در ادامه توضیح داده شده است.

### شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) برای تعیین کمیت خشکسالی استفاده می‌شود که توسط ویسنت سرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2010) توسعه داده شده است. برای محاسبه SPEI متغیر بارش (P) با تفاوت انباشته بین P و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر یعنی مازاد/کسری توازن آب اقلیمی (CWB) مورد توجه قرار می‌گیرد. برای محاسبه PET از روش پنمن-مانتیت فائو استفاده شده است. روش پنمن-مانتیت به طور جامع متغیرهای تأثیرگذار مختلف را در تبخیر-تعرق نظر می‌گیرد و کاربرد بسیار خوبی در مناطقی با شرایط اقلیمی پیچیده دارد (Li et al., 2022). روش پنمن-مانتیت با رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$PET_{PM} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

در این رابطه که  $R_n$  تابش خالص سطح است،  $U_2$  سرعت باد سطحی (متر/ثانیه) در ارتفاع ۲ متری،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار آب اشباع شده-دما و  $\gamma$  گرمای نهان بخار آب است (Li et al., 2022).

برای محاسبه شاخص خشکسالی SPEI از بسته آماری با همین نام در محیط R استفاده شده است. بر این اساس از ارائه روابط محاسباتی آن صرف‌نظر شده است. مقادیر مثبت/منفی SPEI شرایط مرطوب/خشک را نشان می‌دهد. در این مطالعه، مقدار آستانه ۱- برای تشخیص یک رخداد خشکسالی بر اساس تعریف زو و همکاران (Xu et al., 2015) استفاده شده است. همانطور که گفته شد از چهار مقیاس زمانی ۳ ماهه، ۶ ماهه، ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه برای بررسی خشکسالی در ایران استفاده شده است. این چهار مقیاس برای توصیف رخدادهای خشکسالی کوتاه مدت تا بلند مدت و یا خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند (Wang et al., 2016).

### استخراج مشخصه‌های خشکسالی مبتنی بر تئوری (Run)

بررسی مشخصه‌های خشکسالی (به عنوان مثال، شدت و مدت) و انواع مختلف آن برای توصیف رخداد خشکسالی استفاده می‌شود. انواع

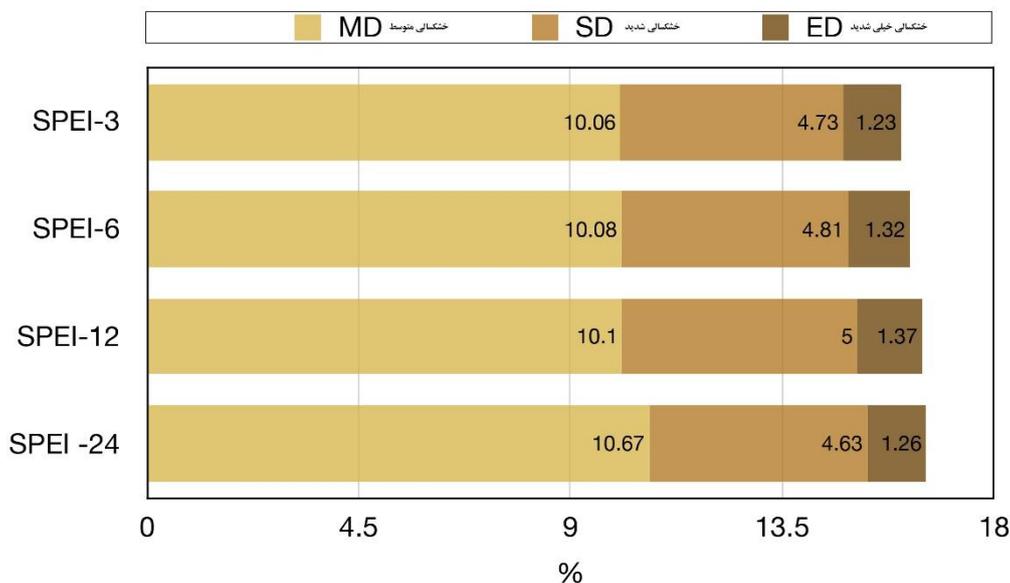
ایران یک تهدید جدی برای سرچشمه رودهای بزرگ همانند کارون، کرخه، دز، زاینده رود و بسیاری دیگر از منابع آبی مهم کشور است. خشکسالی بسیار شدید در ایران، بطور کلی کمتر از ۳ درصد از انواع خشکسالی‌های ایران را در بر می‌گیرد (شکل ۳). با در نظر گرفتن شاخص‌های خشکسالی SPEI-3، SPEI-6 و SPEI-12 مناطق شرقی و بخصوص جنوب شرق و مناطق داخلی ایران دارای بیش‌ترین رخداد خشکسالی از نوع بسیار شدید هستند. دمای بالا در این مناطق می‌تواند تقاضای آب در جو و تبخیر-تعرق واقعی را افزایش دهد و منجر به کاهش جریان و در دسترس بودن آب شود که در نتیجه آن خشکسالی‌های بسیار شدید افزایش خواهد یافت.

### مشخصه‌های خشکسالی در ایران با شاخص SPEI

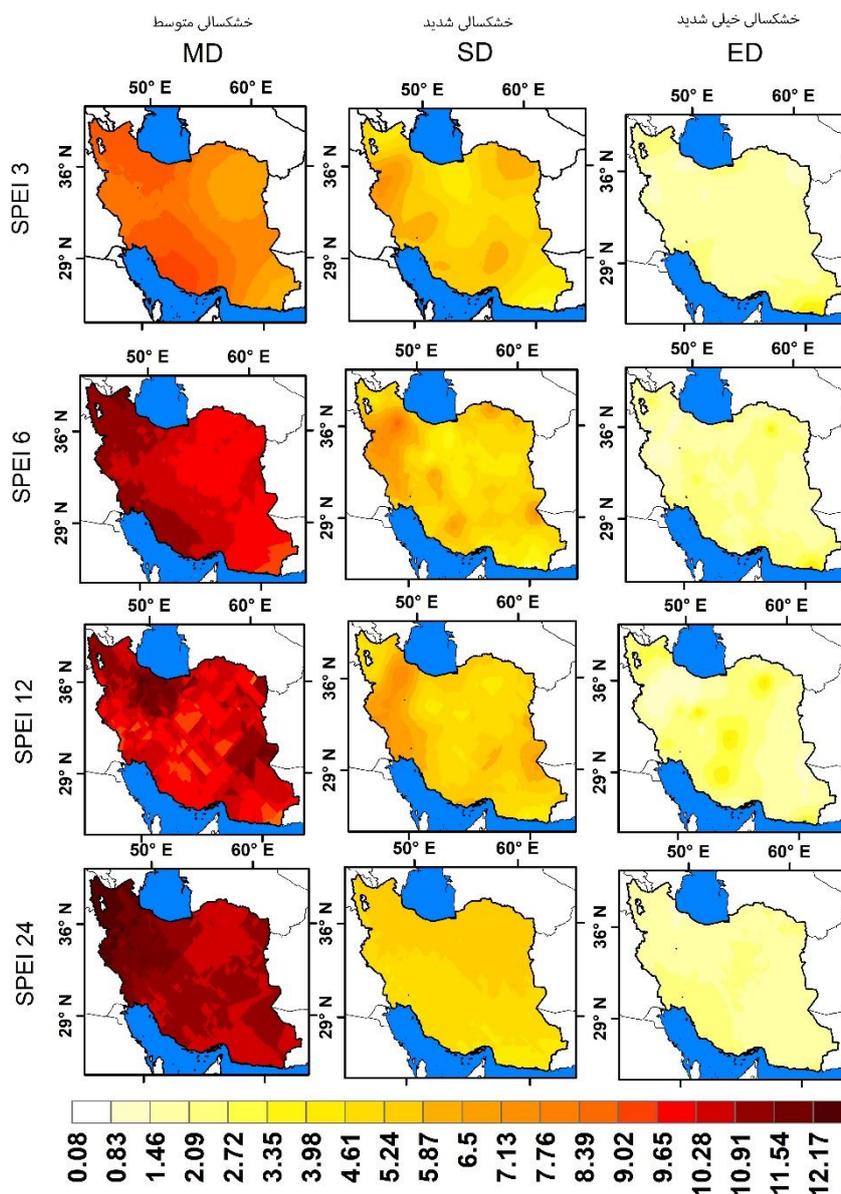
مشخصه‌های چهارگانه خشکسالی (طول دوره، بزرگی، فراوانی و شدت) در ایران نتایج جالب توجهی را از خشکسالی و واردایی یا همان تغییرپذیری آن برای چهار شاخص خشکسالی SPEI-3، SPEI-6، SPEI-12 و SPEI-24 ارائه می‌دهد. طول دوره خشکسالی با افزایش طول مقیاس زمانی از SPEI-3 تا SPEI-24 افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن هر چهار مقیاس خشکسالی، مناطق شرقی ایران بالاترین طول دوره خشکسالی را در ایران نشان می‌دهند.

برای شاخص SPEI-3 و حداکثر ۱/۳۷ درصد برای شاخص SPEI-12 در تغییر است. به‌همین ترتیب خشکسالی شدید نیز در متوسط پهنه‌ای کشور بین ۴/۶۳ درصد تا ۵ درصد برای چهار مقیاس زمانی شاخص خشکسالی در نوسان است (شکل ۲). نتایج مربوط به بررسی انواع خشکسالی در ایران نشان داد که درصد‌های فراوانی انواع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه تقریباً یکسان بوده است. علاوه بر این بیشتر خشکسالی‌های رخ داده در ایران طی چهار دهه گذشته از نوع خشکسالی متوسط (کمتر از ۱۰/۷٪) بوده است. پس از آن به ترتیب خشکسالی شدید (کمتر از ۵٪) و سپس خشکسالی خیلی شدید (کمتر از ۱/۵٪) در متوسط پهنه‌ای کشور اتفاق افتاده است.

بررسی انواع خشکسالی در چهار مقیاس مورد بررسی نشان می‌دهد که رخداد خشکسالی در ایران حداقل ۰/۰۸ درصد برای خشکسالی خیلی شدید تا حداکثر ۱۲/۱۷ درصد برای خشکسالی متوسط در تغییر است. خشکسالی‌های متوسط تقریباً در تمامی مناطق ایران بالاتر از ۵ درصد است. به‌عبارتی از ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ حداقل در ۵ درصد از ماه‌های مورد بررسی در کشور خشکسالی متوسط تجربه شده است. مناطقی با بیشینه فراوانی خشکسالی متوسط در هر چهار مقیاس زمانی مورد بررسی SPEI در غرب، شمال‌غرب و شرق ایران دیده می‌شوند. به همین ترتیب برای خشکسالی شدید نیز همین مناطق دارای درصد زیادی از خشکسالی هستند. بالا بودن خشکسالی شدید در مناطق غربی



شکل ۲- درصد رخداد انواع خشکسالی در متوسط پهنه‌ای ایران؛ MD خشکسالی متوسط؛ SD خشکسالی شدید و ED خشکسالی خیلی شدید  
 Figure 2- The percentage of occurrence of droughts in the area-averaged of Iran; moderate drought (MD); severe drought (SD), and extreme drought (ED)



شکل ۳- توزیع مکانی انواع خشکسالی در ایران؛ MD خشکسالی متوسط؛ SD خشکسالی شدید و ED خشکسالی خیلی شدید (واحد: درصد)  
 Figure 3- Spatial distribution of drought types in Iran; moderate drought (MD); severe drought (SD), and extreme drought (ED) (Unit: Percent)

سواحل جنوبی دریای خزر را می‌توان جزو معدود مناطقی در ایران قلمداد کرد که بارش در تمام فصول در آن می‌بارد. اما در سایر مناطق کشور بارش کاملاً تابع فصل است و به عبارتی بارش این مناطق فصلی است. فصلی بودن بارش بر گسترش خشکسالی به دلیل وضعیت رطوبتی در اقلیم‌های مختلف تاثیر می‌گذارد. در اقلیم‌های گرم و خشک همانند مناطق داخلی و شرقی ایران که فصول خشک مشخصی دارند، کمبود بارش یا خشکسالی هواشناسی در فصول مرطوب یا بارانی، اگر به همان فصل مرطوب ختم نشود، در تمام فصول خشک بعدی ادامه پیدا می‌کند و می‌تواند منجر به ادامه خشکسالی در چند فصل بعد شود

طول دوره خشکسالی در SPEI-3 حداکثر ۴ ماه است که در جنوب شرقی کشور دیده می‌شود. در مقابل کمینه این شاخص در سواحل جنوبی دریای خزر قابل مشاهده است (شکل ۴). خشکسالی‌های بلندمدت (SPEI-12 و SPEI-24) در شرق ایران و مناطق داخلی کشور بیشینه و در مناطق شمال غرب و سواحل جنوبی دریای خزر (خزر غربی) کمینه است. به طوری که شاخص SPEI-12 طول دوره ۸/۶۳ ماه را در جنوب شرقی ایران نشان می‌دهد. طول دوره خشکسالی برای سواحل جنوبی دریای خزر حدود ۴ ماه است (شکل ۴).

شامل SPEI-12 و SPEI-24 تغییرات بیش‌تری را به نسبت به دو شاخص پیشین در ایران آشکار می‌سازد. این دو شاخص بیشینه فراوانی خشکسالی را در شمال غربی ایران نشان می‌دهند. فراوانی خشکسالی در نوار شرقی ایران نیز الگوی بیشینه را نشان می‌دهد. مقایسه دو مشخصه فراوانی و طول دوره خشکسالی نتیجه جالبی را در ایران نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود طول دوره خشکسالی در مناطق شرقی ایران زیاد است. این نتیجه با یافته‌های پیشین ( *Isfahani et al., 2022* ) در خصوص مشخصه‌های خشکسالی این منطقه مطابقت دارد. این در حالی است که در مناطق غربی و شمال غربی کشور طول دوره خشکسالی کمینه است. اما این نتیجه برای فراوانی خشکسالی در هر چهار مقیاس از خشکسالی مورد بررسی، برعکس طول دوره خشکسالی است. به عبارت دیگر می‌توان اذعان داشت که اگر چه در شمال غرب و غرب ایران خشکسالی‌ها طول دوره کمتری را نسبت به مناطق شرقی و جنوب شرقی و یا حتی مناطق داخلی ایران دارند اما در این مناطق خشکسالی با فراوانی بالاتری اتفاق می‌افتد. لذا مشخصه‌های خشکسالی‌های ایران از نظر اقلیمی دارای الگوی متفاوتی هستند. به طوری که طول دوره خشکسالی در شرق و جنوب شرق ایران بیش‌تر از سایر مناطق کشور است این در حالی است که فراوانی خشکسالی در غرب و شمال غرب ایران که دارای اقلیم سردسیر هستند بیش‌تر از بقیه مناطق کشور است.

در مناطق سردسیر چرخه هیدرولوژیکی به شدت تحت تأثیر فرآیندهای مرتبط با برف قرار دارد. زمان بارش برف و مقدار آن می‌تواند بر شروع، توسعه و تشدید خشکسالی تأثیر بگذارد. به طوری که بارش کم برف و افزایش دما به بالای نقطه انجماد در طول فصل سرد باعث تجمع کم برف یا ذوب سریع آن می‌شود که می‌تواند باعث کاهش جدی جریان آب در سطح حوضه در فصل بهار و به‌طور کلی فصول گرم سال شود که خشکسالی هیدرولوژیکی را به‌طور جدی تشدید می‌کند.

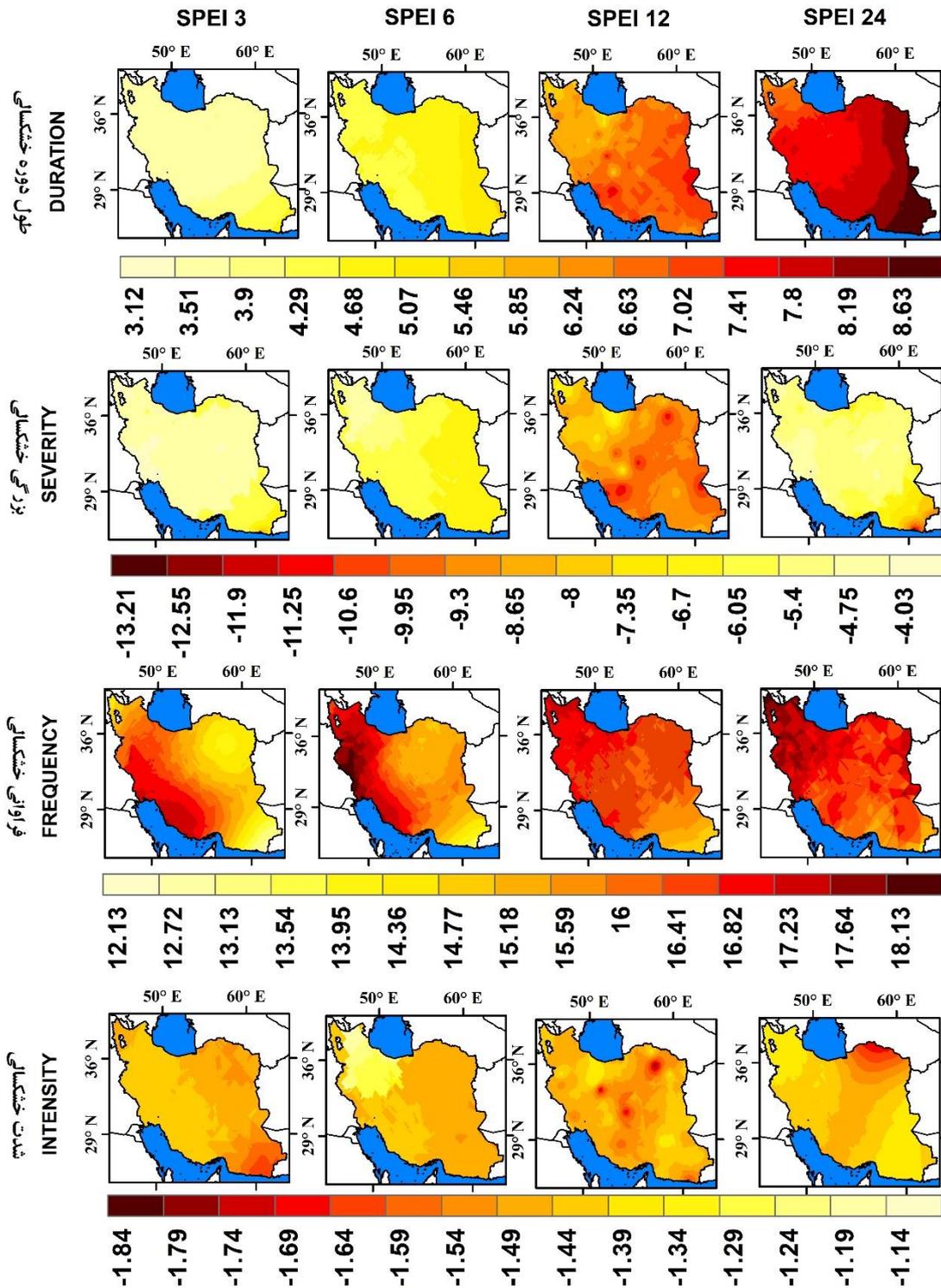
شدت خشکسالی که از نسبت بزرگی خشکسالی به طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود جنبه‌های دیگری از مشخصه‌های اقلیمی خشکسالی را در ایران آشکار می‌کند. به‌طور کلی شدت خشکسالی در مناطق شرقی و جنوب شرقی ایران در چهار مقیاس مورد بررسی از خشکسالی در ایران بالا است. دو شاخص خشکسالی SPEI-12 و SPEI-24 الگوی متفاوتی نسبت به دو شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-6 در ایران دارند. بر اساس نتایج به‌دست آمده شدت خشکسالی هیدرولوژیکی در ایران داخلی، شمال شرق و جنوب شرقی کشور بیشینه است.

که در نقشه مربوط به مشخصه طول دوره خشکسالی نشان داده شده است که تا ۸ ماه نیز ادامه دارد (شکل ۴). در چنین شرایطی استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دوره‌های کم بارش (همانند آنچه که در ایران شاهد آن هستیم) خشکسالی هیدرولوژیکی را به شدت تشدید خواهد کرد. علاوه بر کاهش بارش، تقاضای تبخیر جو (Atmospheric Evaporation Demand (AED) ( *Peña-* Gallardo *et al., 2019* ) نیز ارتباط نزدیکی با دما دارد که بر رخداد خشکسالی در مناطق مختلف ایران تأثیر می‌گذارد.

بزرگی خشکسالی نیز از الگویی مشابه با طول دوره خشکسالی پیروی می‌کند، چرا که این مشخصه از خشکسالی مقدار تجمعی شاخص در طول رخداد خشکسالی است. بالاترین بزرگی خشکسالی در ایران در مناطق شرقی و جنوب شرقی کشور قابل مشاهده است. بزرگی خشکسالی در ایران حداقل ۰/۳- و حداکثر ۱۳/۲۱- است. توزیع مکانی شاخص‌های خشکسالی SPEI-3، SPEI-6 و SPEI-12 تقریباً یکسان است (شکل ۴). اما در خشکسالی بلند مدت (SPEI-24) تفاوت منطقه‌ای زیادی بخصوص در جنوب شرقی ایران دیده می‌شود. بزرگی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک بیش‌تر از مناطق مرتفع و مرطوب است. در مناطق خشک و نیمه خشک، بارش نسبتاً کم و نامنظم است که با دوره‌های خشک طولانی در سال همراه است و منجر به ذخیره‌سازی بسیار کم آب می‌شود. بنابراین خشکسالی هیدرولوژیکی به تغییرات طولانی مدت بارش پاسخ می‌دهد و همین امر باعث شده است که مشخصه‌های خشکسالی هیدرولوژیکی دارای تغییرات بیش‌تری نسبت به خشکسالی هواشناسی و حتی کشاورزی باشد.

فراوانی خشکسالی در ایران برای همه انواع خشکسالی متوسط، شدید و خیلی شدید بین ۱۲/۱۳ درصد تا ۱۸/۱۳ درصد در تغییر است. همان‌طور که گفته شد به دلیل افزایش طول دوره خشکسالی از مقیاس ۳ ماهه به ۲۴ ماهه مشخصه‌های خشکسالی نیز افزایش می‌یابند. این نتیجه در توافق با پژوهش‌های پیشین در اروپا ( *Lloyd-Hughes and Saunders, 2002* )، برزیل ( *Brito et al., 2018* ) و مغولستان ( *PEI et al., 2020* ) است. این افزایش برای مشخصه فراوانی خشکسالی نیز در ایران قابل مشاهده است. به طوری که بین شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-24 یک اختلاف ۶ درصدی قابل مشاهده است. به عبارتی با افزایش طول دوره خشکسالی بر فراوانی خشکسالی در ایران ۶ درصد افزوده شده است (شکل ۴). فراوانی دو شاخص خشکسالی SPEI-3 و SPEI-6 از یک الگو پیروی می‌کند، به طوری که در مناطق غربی ایران بخصوص در غرب، جنوب غرب، سواحل خلیج فارس و شمال غرب کشور که تا سواحل جنوبی دریای خزر نیز کشیده شده است فراوانی خشکسالی بالا است. فراوانی شاخص خشکسالی SPEI-6 در مناطق غربی و شمال غربی ایران بسیار زیاد است، به طوری که در غرب ایران فراوانی آن به ۱۸ درصد می‌رسد (شکل ۴).

بررسی فراوانی خشکسالی برای دو مقیاس از خشکسالی بلند مدت



شکل ۴- توزیع مکانی مشخصه‌های خشکسالی در ایران؛ ردیف اول طول دوره خشکسالی، ردیف دوم بزرگی خشکسالی، ردیف سوم فراوانی خشکسالی و ردیف چهارم شدت خشکسالی

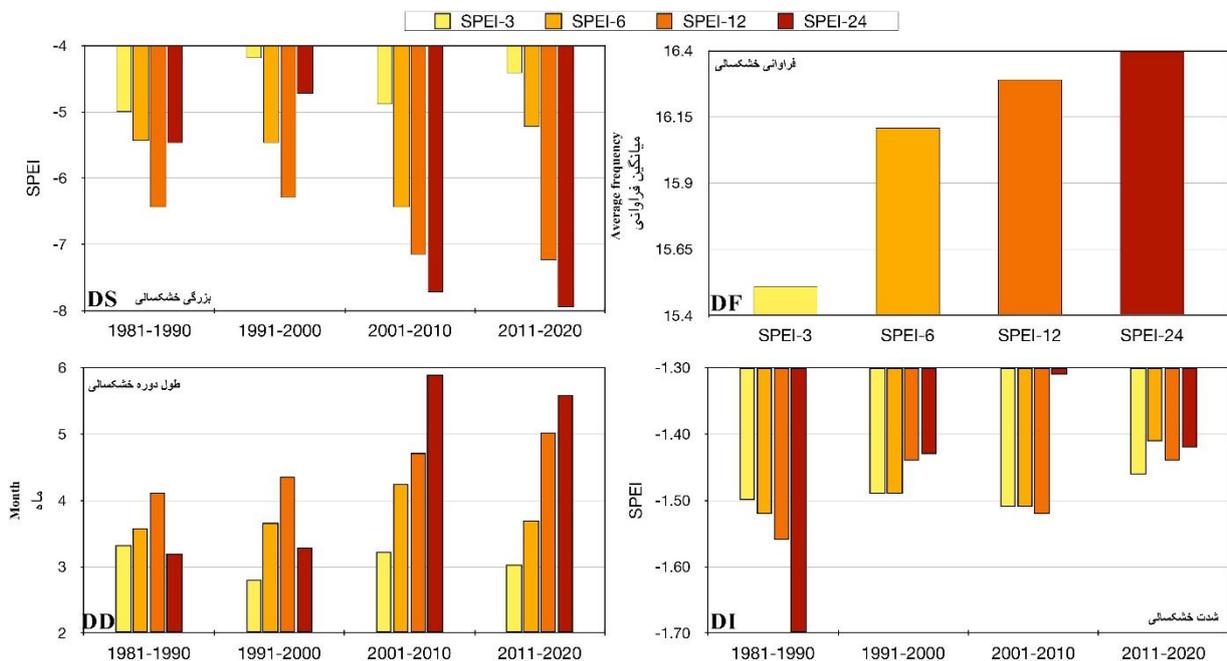
Figure 4- Spatial distribution of drought characteristics in Iran; The first row is the duration of the drought, the second row is the severity of the drought, the third row is the frequency of the drought, and the fourth row is the intensity of the drought

زمانی خشکسالی بیش‌تر شده‌اند. مشخصه دیگری از خشکسالی که در طی دهه‌های اخیر روند افزایشی قابل توجهی داشته است، طول دوره خشکسالی است. طول دوره خشکسالی در ایران برای مثال برای شاخص خشکسالی SPEI-12 از ۴ ماه در دهه اول (۱۹۸۱-۱۹۹۰) به ۵ ماه در دهه آخر مورد بررسی (۲۰۱۱-۲۰۲۰) در متوسط پهنه‌ای ایران رسیده است (شکل ۵). در مقابل مشخصه شدت خشکسالی در متوسط پهنه‌ای کشور روند کاهشی را داشته است. این روند کاهشی دلیل آماری دارد چرا که همانطور که گفته شد فراوانی خشکسالی در سال‌های اخیر با بزرگی بیش‌تری در ایران اتفاق افتاده است. در مقابل طول دوره خشکسالی همگام با بزرگی و فراوانی خشکسالی افزایش چشمگیری نداشته است و همین امر باعث شده است تا شدت خشکسالی در ایران کمتر شود. به عبارت ساده‌تر به دلیل افزایش فراوانی خشکسالی با بزرگی بیش‌تر، شدت خشکسالی که از تقسیم بزرگی خشکسالی به طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود، کمتر می‌شود. بررسی فراوانی خشکسالی در متوسط چهار دهه گذشته نشان می‌دهد که با افزایش طول دوره، مشخصه فراوانی نیز افزایش دارد. همانطور که در توضیحات شکل ۲ نیز آمده است فراوانی رخداد خشکسالی در ایران در حدود ۱۶ درصد است.

همین الگو نیز تا حدودی برای شاخص خشکسالی SPEI-24 در ایران قابل مشاهده است. به طوری که شدت خشکسالی در شمال شرق، مناطق داخلی و جنوب شرقی کشور بیش‌تر از مناطق شمال غرب و غرب کشور است (شکل ۴).

بررسی مشخصه‌های خشکسالی نشان می‌دهد که خشکسالی هواشناسی معمولاً باعث رخداد خشکسالی کشاورزی و سپس هیدرولوژیکی خواهد شد. اما در بسیاری از موارد خشکسالی هواشناسی مستقیماً باعث خشکسالی کشاورزی یا هیدرولوژیکی نمی‌شود. معمولاً این عوامل ترکیبی هستند که با نقش‌های متفاوت عوامل طبیعی و انسانی بر رخداد خشکسالی تأثیر می‌گذارند. مهمترین عوامل رخداد خشکسالی، شرایط اولیه یا اقلیمی و شرایط حوضه‌های آبریز است. وضعیت اولیه حوضه آبریز منطقه مانند وجود برف، یخچال طبیعی یا سطح آب زیرزمینی نقش مهمی در خشکسالی هیدرولوژیکی ایفا می‌کند.

وردایی دهه‌ای مشخصه‌های اصلی خشکسالی (بزرگی، طول دوره و شدت) نشان دهنده افزایش بزرگی و طول دوره خشکسالی در ایران است. بزرگی خشکسالی برای هر چهار مقیاس مورد بررسی در دهه آخر نسبت به دهه پیشین روند افزایشی را نشان داده است. همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد مقدار مشخصه‌های خشکسالی با افزایش مقیاس



شکل ۵- متوسط پهنه‌ای مشخصه‌های خشکسالی طی چهار دهه گذشته (۱۹۸۱-۲۰۲۰): بزرگی خشکسالی (DS)، فراوانی خشکسالی (DF)، طول دوره خشکسالی (DD) و شدت خشکسالی (DI)

Figure 5- Area-averaged of drought characteristics over the past four decades (1981-2020); moderate drought (MD); frequency drought (FD); severe drought (SD), and extreme drought (ED)

و فصلی بودن آن در این مناطق باشد.

بیشینه بزرگی خشکسالی در ایران مربوط به شاخص خشکسالی SPEI-24 و پس از آن شاخص خشکسالی SPEI-12 است. این مشخصه بخصوص در دو دهه اخیر (۲۰۲۰-۲۰۰۱) نسبت به دهه‌های قبل (۲۰۰۰-۱۹۸۱) افزایش داشته است. این در حالی است که بزرگی خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) تفاوت افزایشی چندانی در دو دهه اخیر نسبت به دهه‌های قبلی ندارند.

عوامل انسان‌شناختی در افزایش بزرگی خشکسالی‌های بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24) نقش بارزتری نسبت به عوامل طبیعی دارند. بدیهی است عوامل انسان‌شناختی در افزایش بزرگی خشکسالی‌های بلند مدت نقش مهمی دارند. در مقابل شاخص خشکسالی‌های کوتاه مدت (SPEI-3 و SPEI-6) به نسبت به دو شاخص خشکسالی بلند مدت (شامل SPEI-12 و SPEI-24) تغییرات چندانی را در ایران نشان نداده‌اند.

نتایج میانگین دهه‌ای شدت خشکسالی نشان داد که این مشخصه از خشکسالی در دهه آخر مورد بررسی (۲۰۲۰-۲۰۱۱) نسبت به دهه‌های پیشین (۲۰۱۰-۱۹۸۱) کمتر شده است. از طرف دیگر، همان طور که پیش‌تر نیز آورده شد، بزرگی خشکسالی و طول دوره خشکسالی، به ویژه در مقیاس‌های بلند مدت (SPEI-12 و SPEI-24)، در دو دهه آخر مورد بررسی (۲۰۲۰-۲۰۰۱) افزایش یافته است. افزایش بزرگی و طول دوره خشکسالی در متوسط پهنه‌ای ایران نتایج مساعدی و همکاران (Mosaedi et al., 2017) را تایید می‌کند. لذا علت کاهش شدت خشکسالی پیش از آنکه دلیل اقلیمی داشته باشد توضیح آماری دارد چرا که شدت خشکسالی با تقسیم بزرگی خشکسالی بر طول دوره خشکسالی محاسبه می‌شود.

به عبارتی ۷۹ ماه از ۴۸۰ ماه مورد بررسی طی دوره چهل ساله در ایران دارای خشکسالی با انواع مختلف بوده است (شکل ۵). دامنه تغییرات ماه‌های دارای خشکسالی در مقیاس ایستگاه حداقل ۳۰ ماه و حداکثر ۱۱۰ ماه در تغییر است.

## نتیجه‌گیری

خشکسالی به طور طبیعی در تمامی اقلیم‌ها و دوره‌های زمانی رخ می‌دهد. این تحقیق از شاخص SPEI به عنوان یک شاخص پرکاربرد در بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های ۴۹ ایستگاه هواشناسی همدید استفاده نموده است. شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه مورد بررسی قرار گرفته و مشخصه‌های آن (شامل شدت، مدت، فراوانی و بزرگی) با استفاده از تئوری RUN محاسبه شده است. نتایج اصلی این تحقیق از اقلیم شناسی مشخصه‌های خشکسالی را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد:

شدت، بزرگی و طول دوره خشکسالی در ایران با افزایش مقیاس زمانی مورد بررسی از ۳ ماهه تا ۲۴ ماهه افزایش دارند.

بررسی میانگین فراوانی خشکسالی در ایران نشان داد با افزایش مقیاس زمانی شاخص شاخص SPEI، فراوانی خشکسالی افزایش می‌یابد که با یافته‌های پیشین خشکسالی در ایران همخوانی دارد (Nouri and Homaei, 2020).

نتایج مشخصه‌های در ایران نشان داد نیمه شرقی و جنوب شرقی ایران طول دوره و بزرگی خشکسالی بیش‌تری را نسبت به غرب و شمال غربی ایران تجربه کرده است که این امر می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی این منطقه، یعنی بالا بودن دما و تبخیر-تعرق و مقدار کم بارش

## منابع

- Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., ... & Overton, I. C. (2016). Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(4), 516-536. <http://dx.doi.org/10.1002/wat2.1154>
- Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water Resources Management*, 31, 4683-4698. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1773-8>
- Brito, S.S.B., Cunha, A.P.M., Cunningham, C.C., Alvalá, R.C., Marengo, J.A., & Carvalho, M.A. (2018). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 38(2), 517-529. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>
- Cook, B.I., Mankin, J.S., Marvel, K., Williams, A.P., Smerdon, J.E., & Anchukaitis, K.J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461. <https://doi.org/10.1029/2019EF001461>
- EM-DAT, (2021). The International Disaster Database. (Available at: <https://www.emdat.be/index.php>)
- Ghabaei, S.M., Zare Abyaneh, H., Mosaedi, A., & Samadi, S.Z. (2016). Assessment of humidity conditions and trends based on standardized precipitation evapotranspiration index (SEPI) over different climatic regions of Iran. *Water and Soil*, 30(5), 1700-1717. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.47565>
- Gumus, V., Dinsever, L.D., & Avsaroglu, Y. (2023). Analysis of drought characteristics and trends during 1965–2020 in the Tigris River basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04363-x>

8. Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2013). Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>
9. Heudorfer, B., & Stahl, K. (2017). Comparison of different threshold level methods for drought propagation analysis in Germany. *Hydrology Research*, 48(5), 1311-1326. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.258>
10. Isfahani, P.M., Soltani, S., & Modarres, R. (2022). Assessing agrometeorological drought trends in Iran during 1985–2018. *Theoretical and Applied Climatology*, 150(1-2), 251-262. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04159-5>.
11. Kazemzadeh, M., Noori, Z., Alipour, H., Jamali, S., Akbari, J., Ghorbanian, A., & Duan, Z. (2022). Detecting drought events over Iran during 1983–2017 using satellite and ground-based precipitation observations. *Atmospheric Research*, 269, 106052. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106052>.
12. Li, L., She, D., Zheng, H., Lin, P., & Yang, Z.L. (2020). Elucidating diverse drought characteristics from two meteorological drought indices (SPI and SPEI) in China. *Journal of Hydrometeorology*, 21(7), 1513-1530. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0290.1>
13. Li, Y., Qin, Y., & Rong, P. (2022). Evolution of potential evapotranspiration and its sensitivity to climate change based on the Thornthwaite, Hargreaves, and Penman–Monteith equation in environmental sensitive areas of China. *Atmospheric Research*, 273, 106178. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106178>
14. Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M.A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13), 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>
15. McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
16. Mehta, D., & Yadav, S.M. (2022). Temporal analysis of rainfall and drought characteristics over Jalore District of SW Rajasthan. *Water Practice and Technology*, 17(1), 254-267. <https://doi.org/10.2166/wpt.2021.114>
17. Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(8), 183. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01705-4>
18. Mosaedi, A., Mohammadi Moghaddam, S., & Kavakebi, Gh. (2017). Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 27-52. (In Persian with English abstract). <http://doi.org/10.22069/jwfst.2017.8878.2266>
19. Nouri, M., & Homaei, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, 27(2), e1899. <https://doi.org/10.1002/met.1899>
20. Palmer, W.C. (1965). *Meteorological drought* (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau.
21. Pei, Z., Fang, S., Wang, L., & Yang, W. (2020). Comparative analysis of drought indicated by the SPI and SPEI at various timescales in inner Mongolia, China. *Water*, 12(7), 1925. <https://doi.org/10.3390/w12071925>
22. Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Hannaford, J., Lorenzo-Lacruz, J., Svoboda, M., Domínguez-Castro, F., & El Kenawy, A. (2019). Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous United States. *Journal of Hydrology*, 568, 611-625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.026>
23. Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>
24. Pour, S.H., Abd Wahab, A.K., Shahid, S., & Ismail, Z.B. (2020). Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in peninsular Malaysia. *Atmospheric Research*, 246, 105096. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105096>
25. Shi, M., Yuan, Z., Shi, X., Li, M., Chen, F., & Li, Y. (2022). Drought assessment of terrestrial ecosystems in the Yangtze River Basin, China. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132234>
26. Sobhani, B., Zengir, V.S., & Kianian, M.K. (2019). Drought monitoring in the Lake Urmia basin in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 12, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4571-1>
27. Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized precipitation index: user guide.
28. Ullah, I., Ma, X., Yin, J., Saleem, F., Syed, S., Omer, A., & Arshad, M. (2022). Observed changes in seasonal drought characteristics and their possible potential drivers over Pakistan. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1576-1596. <https://doi.org/10.1002/joc.7321>
29. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
30. Wang, L., Yuan, X., Xie, Z., Wu, P., & Li, Y. (2016). Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, 6(1), 30571. <https://doi.org/10.1038/srep30571>
31. Wu, B., Ma, Z., & Yan, N. (2020). Agricultural drought mitigating indices derived from the changes in drought characteristics. *Remote Sensing of Environment*, 244, 111813. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111813>
32. Xu, K., Yang, D., Yang, H., Li, Z., Qin, Y., & Shen, Y. (2015). Spatio-temporal variation of drought in China during

- 1961–2012: A climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 526, 253-264. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.047>
33. Yevjevich, V.M. (1967). *Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, An* (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
34. Zarei, A.R. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of Iran using standardized precipitation index (SPI). *SN Applied Sciences*, 1, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0498-0>
35. Zhao, R., Sun, H., Xing, L., Li, R., & Li, M. (2023). Effects of anthropogenic climate change on the drought characteristics in China: From frequency, duration, intensity, and affected area. *Journal of Hydrology*, 617, 129008. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.129008>
36. Zhuang, X., Hao, Z., Singh, V. P., Zhang, Y., Feng, S., Xu, Y., & Hao, F. (2022). Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors. *Science of The Total Environment* 156021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156021>
37. Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A., & Gulev, S. (2005). On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe. *Geophysical Research Letters*, 32, 1-5. <https://doi.org/10.1029/2005GL023231>



## Evaluation of Evapotranspiration Rate and Water Productivity Based on FAO WaPOR Database in Qazvin Plain

M.S. Fakhar<sup>1</sup>, A. Kaviani<sup>2\*</sup>

Received: 19-03-2023

Revised: 20-05-2023

Accepted: 29-05-2023

Available Online: 06-06-2023

### How to cite this article:

Fakhar, M.S., & Kaviani, A. (2023). Evaluation of evapotranspiration rate and water productivity based on FAO WaPOR database in Qazvin plain. *Journal of Water and Soil*, 37(3), 487-502. (In Persian with English abstract).  
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81695.1267>

### Introduction

Achieving food security in the future with sustainable use of water resources will be a big challenge for the current and future generations. Population increase, economic growth and climate change intensify the pressure on existing resources. Agriculture is a key consumer of water, and it is necessary to closely monitor water productivity for it and explore opportunities to increase its productivity. Systematic monitoring of water productivity through the use of remote sensing techniques can help identifying the gaps in water productivity and evaluate appropriate solutions to address these gaps.

### Materials and Methods

Qazvin plain is known as a hub of modern agriculture by providing about 5% of the country's agricultural products. Therefore, estimating water demand and water productivity in agricultural management in the region is considered important and necessary. In order to monitor water productivity through access to various data across Africa and the Middle East, the WaPOR database provides the possibility to examine the rate of evapotranspiration, biomass and gross and net biomass volume productivity based on the land use map in the period of years 2009 to 2021. In this database, it is possible to check the mentioned items at three levels with different spatial resolution, which according to the scope of the study, it is possible to check values with a spatial resolution of 250(m). In order to determine the efficiency and accuracy of the land cover classification map of the WaPOR database, the results obtained are examined and compared with the Dynamic World model, which represents a global model with high accuracy. For this purpose, the latest land use map related to 2021 Using the WaPOR database and Dynamic World in the GEE system, it was prepared and based on the classification of the region in order to check the accuracy of the user map of the WaPOR database and to determine the percentage of each class compared to each other. Finally, all estimable indicators were calculated and checked by the WaPOR database during the years 2009 to 2022.

### Results and Discussion

The amount of evapotranspiration of the plants covered by the irrigation network in the period of 2009 to 2016 has been associated with a relatively stable trend, but this trend has decreased in 2017 onwards, which is one of the reasons for the decrease in the amount of evapotranspiration in this the period of time and can refer to the lack of water available to the plant due to the limited water resources in recent years. The investigation of the total amount of biomass in different lands shows that during the years 2009 to 2022, this index has been accompanied by a gradual increase in all uses, so that the amount of TBP index in 2020 was 17% more than in 2009. It shows the amount of biomass in different lands. The amount of biomass in the lands covered by the water network is 5

1 and 2- Ph.D Student and Associate Professor of Water Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.

(\*- Corresponding Author Email: [kaviani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:kaviani@eng.ikiu.ac.ir))

DOI: [10.22067/jsw.2023.81695.1267](https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81695.1267)

to 6 times higher than that of the rainfed lands. Among the influential parameters in estimating the TBP index, we can mention the amount of evaporation, transpiration, and transpiration, the increase or decrease of each of these parameters will have a significant impact on the estimated amount of biomass. The results showed that the amount of biomass production in the areas covered by the irrigation network largely depends on the high transpiration rate in these areas. From the beginning of 2009 to 2016, the gross amount of biomass water in the lands covered by the irrigation network has been accompanied by an increase, but in 2017, drastic changes in the process of underground changes will decrease the area of the lands covered by the network and many of these lands. It has been turned into fallow and rainfed lands. The analysis of NBWP index also showed that the amount of net productivity in rainfed lands is strongly dependent on the annual increase rate, and much of the crop yield in rainfed lands is dependent on the amount received. Among the influential parameters in estimating the total amount of biomass, we can mention the amount of evaporation, transpiration and transpiration, the increase or decrease of each of these parameters will have a significant impact on the amount of estimated biomass.

## Conclusion

WaPOR database data can play an important role in estimating the rate of delayed transpiration and parameters related to water productivity in the region due to its ten-day spatial resolution and the absence of data gaps. In general, the WaPOR database can be used as a guide in the reliable determination of evapotranspiration values and planning related to water resources in the agricultural sector.

**Keywords:** Agricultural water consumption, Biomass, GEE, Remote sensing, Water management

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۸۷-۵۰۲

## ارزیابی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب بر اساس پایگاه داده WaPOR فائو در دشت قزوین

محدثه السادات فخار<sup>۱</sup> - عباس کاویانی<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

### چکیده

دستیابی به امنیت غذایی در آینده با استفاده پایدار از منابع آب، چالشی بزرگ برای نسل فعلی و آینده خواهد بود. افزایش جمعیت، رشد اقتصادی و تغییرات آب و هوا، همگی بر افزایش فشار بر منابع موجود می‌افزایند. کشاورزی یک مصرف‌کننده کلیدی آب است و نظارت دقیق بر بهره‌وری آب در کشاورزی و بررسی فرصت‌ها برای افزایش بهره‌وری آن ضروری است. پایش سیستماتیک بهره‌وری آب از طریق استفاده از تکنیک‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به شناسایی شکاف‌های بهره‌وری آب و ارزیابی راه‌حل‌های مناسب برای رفع این شکاف‌ها کمک کند. دشت قزوین با تأمین حدود ۵ درصد محصولات کشاورزی مورد نیاز کشور به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن شناخته شده است. در این پژوهش با استفاده از پایگاه داده WaPOR به ارزیابی مقادیر تبخیر-تعرق، میزان زیست‌توده و بهره‌وری حجم آب ناخالص و خالص زیست‌توده بر اساس نقشه کاربری اراضی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. نتایج نشان داد مقادیر تبخیر-تعرق گیاهان تحت پوشش شبکه آبیاری در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ با روند نسبتاً پایداری همراه بوده اما این روند پایدار در سال ۲۰۱۷ به بعد با کاهش روبه‌رو شده است که از جمله دلایل کاهش میزان تبخیر-تعرق در این بازه زمانی می‌توان به کمبود آب در دسترس گیاه با توجه به منابع محدود آب در طی سال‌های اخیر اشاره کرد. بررسی روند میزان کل زیست‌توده در اراضی مختلف نشان می‌دهد در طی سال‌های مورد مطالعه این شاخص در تمامی کاربری‌ها با افزایش تدریجی همراه شده است. به طوری که میزان شاخص کل تولید بیومس (TBP) در سال ۲۰۲۰ به میزان ۱۷ درصد بیشتر از سال ۲۰۰۹ است. میزان ناخالص حجم آب زیست‌توده از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با میزان افزایشی همراه بوده است اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز آب زیرزمینی باعث کاهش سطح اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیم تبدیل شده‌اند. بررسی شاخص بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) نیز نشان داد میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد محصول در اراضی دیم وابسته به میزان بارش دریافتی است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد مقدار کل زیست‌توده می‌توان به مقدار، تبخیر، تعرق و برآب اشاره کرد که افزایشی یا کاهش بود هر یک از این پارامترها تأثیر به‌سزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. به‌طور کلی پایگاه داده WaPOR می‌تواند به‌عنوان یک راهنما در تعیین قابل‌اطمینان مقادیر تبخیر-تعرق و برنامه‌ریزی مرتبط با منابع آب در بخش کشاورزی، مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب مصرفی کشاورزی، زیست‌توده، سنجش‌ازدور، مدیریت آب، GEE

### مقدمه

توسط برگ از سیستم ریشه خارج می‌شود (Katul et al., 2012).  
تبخیر-تعرق یک عامل کلیدی در چرخه هیدرولوژیکی است زیرا  
مکانیسم و انرژی مورد نیاز برای انتقال آب ذخیره‌شده در سیستم خاک

تبخیر-تعرق (ET) فرآیندی است که شامل تبخیر از سطح، مانند  
آب‌های آزاد، خاک و پوشش گیاهی و تعرق به‌عنوان آبی است که عمدتاً

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۶)</sup>، قزوین، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: [kaviani@eng.ikiu.ac.ir](mailto:kaviani@eng.ikiu.ac.ir))

در سطح جهانی برای تخمین مقادیر ET در مقیاس‌های منطقه‌ای و میانی در سطح زمین است، زیرا این رویکرد مستقیماً تشعشعات سطحی و اجزای بیلان انرژی سطحی را به هم مرتبط می‌کند (Karishma *et al.*, 2022). در طول ۳۰ سال گذشته، استفاده ترکیبی از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و حسگرهای نوری و حرارتی مادون قرمز پیشرفت قابل توجهی در برآورد ET ارائه کرده است (Liou and Kar, 2014). یکی از معروف‌ترین الگوریتم‌ها به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق الگوریتم SEBAL<sup>۳</sup> است (Baastiansen *et al.*, 1998). در طی سال‌های متوالی الگوریتم‌های مختلفی همچون SEBS<sup>۴</sup> (Su, 2002)، METRIC<sup>۵</sup> (Allen, 2007) و PySEBAL (Hessels *et al.*, 2017) به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق توسعه پیدا کرده است. پیش تبخیر-تعرق در سراسر جهان با استفاده از روش‌های مختلف انجام شده است (Oberg and Meless, 2006). سازمان FAO در سال‌های اخیر سیستمی را با نام سیستم بهره‌وری دسترسی آزاد به آب را در مناطقی همچون آفریقا و خاورمیانه که با بحران آب روبه‌رو هستند ایجاد کرده است (Fakhar and Kaviani, 2022). برآورد تبخیر - تعرق واقعی از WaPOR یکی از مهم‌ترین محصولات این سیستم است. پایگاه داده WaPOR نقشه فضایی ۱۰ روزه و سالانه با اندازه پیکسل ۲۵۰ متری توسط الگوریتم ETLook در طی سال‌های ۲۰۰۹ تاکنون ارائه می‌دهد که معادلات و نحوه محاسبات میزان تبخیر-تعرق در پژوهشی توسط بستیان سن و همکاران به تفصیل بیان شده است (Bastiaanssen *et al.*, 2012). این مدل جهانی به‌منظور پردازش خودکار طراحی شده است زیرا این مدل رطوبت خاک را به‌عنوان یک لایه از داده‌های ورودی در نظر می‌گیرد. پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است به‌طوری‌که باریده و همکاران (Barideh *et al.*, 2022) در پژوهشی به برآورد تبخیر - تعرق واقعی با مدل جهانی WaPOR و مقایسه آن با معادله پنمن مانیتیت در حوضه دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ پرداخت. نتایج نشان از دقت بالای این مدل جهانی با داده‌های حاصله از معادله داشته است. با توجه به وجود داده‌های پیوسته این مدل و همپوشانی جهانی آن در پژوهشی (Blatchford *et al.*, 2020) به ارزیابی محصول تبخیر-تعرق WaPOR در ۱۴ ایستگاه هواشناسی برای مناطق کشت آبی و دیم در آفریقا پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد همبستگی کلی تبخیر-تعرق واقعی حاصل از مدل WaPOR در مقیاس نقطه‌ای در مقایسه با اطلاعات حاصل از ایستگاه‌ها ۰/۷۱ و مقدار ریشه میانگین مربع خطا ۱/۲ میلی‌متر در روز گزارش شد. در نهایت با توجه به اینکه WaPOR یک مجموعه داده دسترسی باز بوده و تقریباً مقادیری نزدیک به زمان

- اتمسفر و تبدیل به بخار آب را توصیف می‌کند (Liu *et al.*, 2019). در زمینه وسیع‌تر کشاورزی آبی حدود ۷۰ درصد از برداشت آب شیرین را تشکیل می‌دهد و این یک مشکل جدی است که توجه متخصصان علوم آب را به خود جلب کرده است (FAO, 2021). در سطح جهانی، حدود دوسوم از بارش از طریق تبخیر و تعرق (ET) به جو بازمی‌گردد (Coenders-Gerrits *et al.*, 2014)، که شامل تبخیر از خاک و سطوح مرطوب پوشش گیاهی و تعرق از طریق برگ‌های گیاه است. بر اساس گزارش‌های سازمان فائو، حدود ۷۰ درصد از آب مصرفی جهان در کشاورزی، ۱۹ درصد در صنعت و ۱۱ درصد در شهرها مصرف می‌شود. که بخش وسیعی از آب در بخش کشاورزی از طریق تبخیر از دسترس گیاه خارج می‌شود (Golian *et al.*, 2019). برآورد کل ET از سطح زمین با استفاده از مدل‌های مختلف از ۵۰ تا ۸۰ کیلومتر مکعب بر سال متغیر است (Jiménez *et al.*, 2011). اهمیت تبخیر-تعرق از زمان پیدایش علم سنجش‌ازدور در زمینه‌های کاربردی مانند برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری در مقیاس‌های مختلف مشهود بوده است (Idso *et al.*, 1975). اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به‌صورت میدانی و با استفاده از ابزار دقیق همچون روش نسبت بوون<sup>۱</sup>، روش ادی کواریانس<sup>۲</sup>، لایسیمتر و غیره مزیت تعیین مستقیم مقدار تبخیر-تعرق را برای یک مکان اندازه‌گیری ارائه می‌کند (Cuxart and Boone, 2020). یک روش رایج به‌منظور تخمین تبخیر-تعرق نقطه‌ای استفاده از معادله پنمن مانیتیت است که از متغیرهای پیش شده مانند رطوبت هوا، دمای هوای اندازه‌گیری شده توسط ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌کند که توسط فائو پیشنهاد شده است (Allen *et al.*, 1998; Paredes and Pereira, 2019). به‌کارگیری این روش‌های نقطه‌ای دشوار، هزینه‌بر و نصب، نگهداری و بهره‌برداری از آن‌ها وقت‌گیر است و به دلیل تغییرات پویا و منطقه‌ای تبخیر-تعرق قابل‌تعمیم در سطوح وسیع نیستند؛ بنابراین با توجه به تغییرات مکانی عوامل دخیل در تبخیر-تعرق، این روش‌ها برای اندازه‌گیری‌های معمول در سطح وسیع چندان مناسب نیستند (Pereira *et al.*, 2021). در یک منطقه مرطوب میزان تبخیر-تعرق سالانه می‌تواند به‌اندازه نیمی از بارندگی منطقه باشد درحالی‌که برای مناطق خشک و نیمه‌خشک، مقدار تبخیر-تعرق تقریباً معادل کل بارندگی سالانه است (Engman and Gurney, 1991). به‌طور خلاصه، حتی اگر بتوان تخمین‌های تبخیر-تعرق دقیقی را برای یک ناحیه با استفاده از ابزارهای زمینی به دست آورد، این مقادیر به دلیل ناهمگونی معمول چشم‌انداز و پیچیدگی فرایندهای هیدرولوژیکی در مقیاس‌های بزرگ‌تر مفید نیستند (Yang *et al.*, 2022). فناوری سنجش‌ازدور ابزاری سازگار و مقرون‌به‌صرفه

4- Surface Energy Balance System

5 - Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration

1- Bowen ratio technique

2- Eddy covariance

3- Surface Energy Balance Algorithm for Land

است (Hedayati and Kakavand, 2012)

### پایگاه WaPOR

پایگاه اطلاعاتی<sup>۱</sup> WaPOR این قابلیت را دارد که مقادیر تبخیر، تعرق، تبخیر-تعرق واقعی، تبخیر-تعرق مرجع، بارش، زیست‌توده، بهره‌وری خاص آب زیست‌توده، بهره‌وری ناخالص آب زیست‌توده و نقشه طبقه‌بندی اراضی را برای نظارت بر بهره‌وری آب از طریق دسترسی به داده‌های مختلف در سراسر آفریقا و خاورمیانه ارائه دهد. مقدار تبخیر-تعرق سامانه WaPOR از طریق الگوریتم ETLook که یک الگوریتم دو منبعی (Bastiaanssen et al., 2012) است، به‌منظور برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌شود. در الگوریتم ETLook مقادیر تبخیر از سطح خاک، آب و گیاه با استفاده از رابطه ۱ و مقدار تعرق از روزنه گیاه از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. مقادیر حاصل از پایگاه اطلاعاتی WaPOR از سال ۲۰۰۹ در دوره‌های دوازده روزه، ماهانه و فصلی است. این پایگاه داده‌ها را در سه سطح قاره‌ای (تفکیک مکانی ۲۵۰ متر)، که شامل آفریقا و خاورمیانه بوده و در سطح یک قرار می‌گیرد، سطح دو (تفکیک مکانی ۱۰۰ متر) شامل ۲۱ کشور و ۴ حوزه رودخانه و سطح سوم شامل هشت منطقه آبیاری که دارای تفکیک مکانی ۳۰ متر است، ارائه می‌دهد.

واقعی قاره‌ای را ارائه می‌دهد، در نتیجه این نتایج می‌تواند امیدوارکننده باشد. رحیم پور و همکاران (Rahimpour et al., 2018) به بررسی و مقایسه نتایج حاصل از پایگاه داده WaPOR با داده‌های Scintillometer حوضه آبریز زاینده‌رود پرداختند. نتایج حاکی از صحت و دقت مناسب تبخیر-تعرق واقعی، محصول WaPOR فائو در مقایسه با داده‌های دستگاه Scintillometer بود. در سال‌های اخیر با توجه به پدیده تغییر اقلیم کاربری اراضی نیز تغییر کرده و بسیاری از اراضی کشاورزی به اراضی بایر و بدون پوشش گیاهی و یا به کاربری شهری تبدیل شده است. در همین راستا کاربری اراضی دائماً در حال تغییر بوده بنابراین در پژوهش براون و همکاران (Brown et al., 2022) به تهیه نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متری با استفاده از تصاویر ماهواره Sentinel-2 پرداختند که نتایج حاصله از دقت مناسبی برای تهیه نقشه کاربری در نقاط مختلف جهان داشته است. پایگاه داده WaPOR شامل چندین مؤلفه داده مربوط به بهره‌وری آب، تولید زیست‌توده، تبخیر-تعرق و پوشش زمین و همچنین چندین لایه داده تکمیلی است (FAO, 2020) که اطلاعات ارزشمندی را در اختیار محققان به‌منظور ارزیابی و مدیریت مصرف آب در مناطق مختلف از جمله کشاورزی قرار می‌دهد. به همین منظور هدف از این پژوهش تهیه نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متری و بررسی مقادیر تبخیر-تعرق مدل WaPOR و بهره‌وری آب با استفاده از این مدل جهانی است.

## مواد و روش‌ها

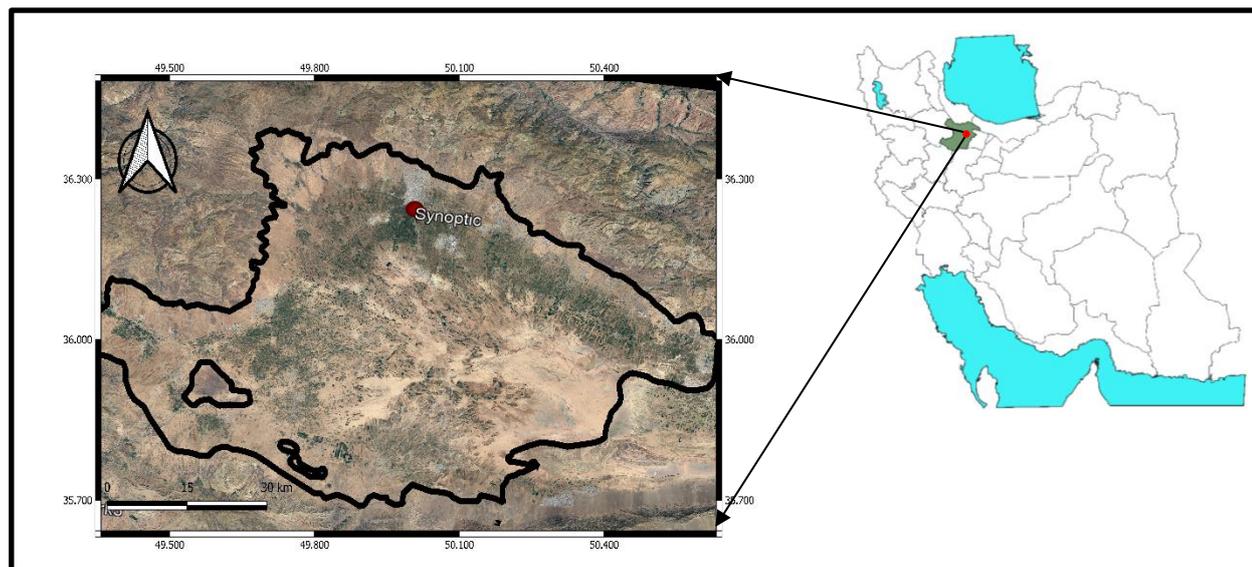
### منطقه مطالعه و داده‌های هواشناسی

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیمات کشوری در بخشی از استان قزوین و در حدود ۱۵۰ کیلومتری شمال غرب تهران قرار دارد (شکل ۱). دشت قزوین با مساحتی حدود ۵۰۶۲۱۸ هکتار در محدوده‌ی طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه ۲۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه شمالی قرار دارد (Mohammadi et al., 2011). حداکثر ارتفاع این منطقه برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل آن ۱۱۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. در این دشت ایستگاه هواشناسی سینوپتیک قزوین با آمار بلندمدت وجود دارد. با توجه به آمار بلندمدت ایستگاه سینوپتیک قزوین، در این تحقیق از داده‌های دما و بارش این ایستگاه استفاده شد. دشت قزوین یکی از دشت‌های حوضه آبریز دریاچه نمک و بزرگ‌ترین دشت آن محسوب شده و بیشترین سطح زیر کشت انواع محصولات را در میان دشت‌های این حوضه آبریز دارد. از نظر آب و هوایی منطقه مورد مطالعه در اقلیم سرد و نیمه‌خشک قرار می‌گیرد که متوسط بارش سالیانه در منطقه تقریباً ۳۱۰ میلی‌متر

1- Water Productivity through Open access of Remotely sensed derived data

$$E = \frac{\Delta(R_{n,soil} - G) + \rho C_p \left( \frac{\Delta_e}{r_{a,soil}} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_{soil}}{r_{a,soil}} \right)} \quad (1)$$

$$T = \frac{\Delta(R_{n,canopy} - G) + \rho C_p \left( \frac{\Delta_e}{r_{a,canopy}} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_{canopy}}{r_{a,canopy}} \right)} \quad (2)$$



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی دشت قزوین در محدوده مورد مطالعه  
Figure 1- Geographical location of Qazvin Plain in the study area

طی فرآیندی که پس از قطع بارش آغاز می‌شود و با استفاده از انرژی که برای تعرق در دسترس نیست، مستقیماً از برگ‌ها تبخیر می‌شود. در جدول ۱ به شرح مختصری از سنجنده‌های مورد استفاده در پایگاه WaPOR اشاره شده است.

پارامترهای معادلات فوق در ادامه تشریح می‌شود. برای محاسبه تعرق همراه با مورد توجه قرار دادن خاک، با دقت در محتوای رطوبت خاک زیرزمینی یا ناحیه توسعه ریشه، محاسبات انجام می‌شود. درحالی که برای به دست آوردن مقدار تبخیر، ارتباط با خاک از طریق رطوبت خاک سطحی مدنظر قرار می‌گیرد. آب نگهداری شده در پوشش گیاهی،

جدول ۱- شرح مختصری از سنجنده‌های مورد استفاده در پایگاه WaPOR برای سطح یک (FAO, 2020)

Table 1- A brief description of the sensors used in the WaPOR portal for level 1 (FAO, 2020)

اجزای داده L1 L1 data component	اجزای داده ورودی Input data components	سنسور Sensor	داده‌های محصول و پروداکت‌ها Data product
	بارش Precipitation		CHIRPS v2, CHIRPS
	آلبیدوی سطح Surface albedo	MODIS	MOD09GA, MOD09GQ
Evaporation, Transpiration, Interception تبخیر، تعرق، برگات	داده‌های هواشناسی شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و فشار هوا Weather data (temp, specific humidity, wind speed, air pressure)	MERRA/ GEOS-5	
	شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی NDVI	MODIS	MOD09GQ
	تنش رطوبتی خاک Soil moisture stress	MODIS	MOD11A1, MYD11A1
	تابش خورشیدی Solar radiation		SRTM
	نقشه کاربری اراضی Land cover map		Based on Copernicus land cover map, 2015

آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی تابعی از LAI و بارش (P) است که به صورت زیر بیان می‌شود.

$$I_{mm} = 0.2I_{lai} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{C_{veg} P}{0.2I_{lai}}}\right) \quad (8)$$

آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی به مقدار کمی بارندگی وابسته است به طوری که با افزایش بارندگی، کسر مهارشده به سرعت کاهش می‌یابد. در نتیجه حداکثر آب نگهداری شده توسط LAI تعیین می‌شود.

$$I = I_{mm} \frac{\lambda}{86400} \quad (9)$$

که در آن  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر می‌باشد ( $J kg^{-1}$ ). تابش خالص موج بلند  $L^*$ ، یعنی تفاوت بین تابش موج بلند ورودی و خروجی، که با استفاده از فرمول شرح داده شده در گزارش فائو شماره ۵۶ محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998). این پارامتر تابعی از دمای هوا ( $T_a$ )، فشار بخار واقعی ( $e_a$ ) و قابلیت انتقال ( $\tau$ ) است. همان‌طور که در بالا نشان داده شد، تبخیر و تعرق کل با جمع تبخیر خاک و تعرق تاج پوشش محاسبه شده از معادله پنمن-مونتیت و آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی به دست می‌آید.

### شار حرارتی خاک (G)

شار حرارتی خاک G برای محاسبه تبخیر از سطح خاک مورد نیاز است که بر اساس گزارش فائو شماره ۵۶ محاسبه شده است.

$$G = \frac{\sqrt{2} A_{t,year} k \sin\left(\frac{2\pi J}{\rho} - \frac{\pi}{4}\right)}{Z_d} \cdot \exp(-aL_{lai}) \quad (10)$$

$A_{t,year}$ : دمای سالانه هوا در سال در دامنه

$k$ : هدایت حرارتی خاک [ $W m^{-1} K^{-1}$ ]

$J$ : روز ژولیوسی

$p$ : تعداد روزهای سال [-]

$Z_d$ : کاهش عمق (m)

$I_{lai}$ : شاخص سطح برگ

$a$ : ضریب خاموشی نور برای تشعشع خالص [-]

کاهش عمق ( $Z_d$ ) و هدایت حرارتی خاک ( $k$ ) به خصوصیات خاک بستگی دارد. معمولاً این موارد به عنوان ثابت در نظر گرفته می‌شوند. دامنه دمای سالانه هوا از داده‌های اقلیمی به دست می‌آید.

### تشعشع خالص (Rn)

تابش خالص (Rn) انرژی موجود در سطح زمین را نشان می‌دهد که می‌توان آن را با تعادل تشعشع توصیف کرد:

$$Rn = (1 - \alpha_o)Rs - L^* - I \quad (3)$$

که در آن  $\alpha_o$  آلبیدوی سطحی [-] است،  $Rs$  تابش خورشیدی ورودی [ $W m^{-2}$ ] $L^*$  تابش خالص موج بلند [ $W m^{-2}$ ] $I$  نشان‌دهنده اتلاف انرژی به دلیل تلفات رهگیری است [ $W m^{-2}$ ]. تشعشع خالص برای خاک و تاج پوشش متفاوت است. شاخص سطح برگ، به منظور اندازه‌گیری تراکم تاج پوشش، در راستای جدا کردن تشعشعات خالص به تشعشع خالص خاک و تشعشع خالص تاج پوشش استفاده می‌شود. افزایش در شاخص سطح برگ منجر به کاهش نمایی در کسر تشعشع موجود برای خاک می‌شود. این تقسیم با استفاده از قانون بیر (که تضعیف نور را از طریق یک ماده توصیف می‌کند) محاسبه می‌شود، که منجر به توصیف معادلات زیر از خاک و تشعشع خالص تاج پوشش می‌شود:

$$Rn_{soil} = Rn \cdot \exp(-aI_{lai}) \quad (4)$$

$$Rn_{canopy} = Rn(1 - \exp(-aI_{lai})) \quad (5)$$

$a$  ضریب خاموشی نور برای تابش خالص است. (-)

شاخص سطح برگ ( $I_{lai}$ )، برابر با صفر نشان‌دهنده عدم وجود پوشش گیاهی است، شاخص سطح برگ بزرگ‌تر از صفر نشان‌دهنده وجود برگ‌های سبز است. شاخص  $NDVI$   $I_{ndvi}$  (-) برای استخراج  $I_{LAI}$  استفاده می‌شود این کار در دو مرحله انجام شده است. ابتدا از  $NDVI$  برای محاسبه پوشش گیاهی  $C_{veg}$  استفاده می‌شود که متعاقباً به شاخص سطح برگ تبدیل می‌شود. دو معادله زیر این تبدیل را برای محدوده خاصی از مقدار  $NDVI$  توصیف می‌کند.

$$C_{veg} = 0 \quad I_{ndvi} \leq 0.125$$

$$C_{veg} = 1 - \left(\frac{0.8 - I_{ndvi}}{0.8 - 0.125}\right)^{0.7} \quad 0.125 < I_{ndvi} < 0.8$$

$$C_{veg} = 1 \quad I_{ndvi} \geq 0.8 \quad (6)$$

مرحله دوم تبدیل پوشش گیاهی به شاخص سطح برگ  $I_{lai}$  بر اساس رابطه زیر است.

$$I_{lai} = 0 \quad I_{ndvi} \leq 0.125$$

$$I_{lai} = \left(\frac{\ln(-(C_{veg} - 1))}{-0.45}\right)^{0.7} \quad 0.125 < I_{ndvi} < 0.795$$

$$I_{lai} = 7.63 \quad I_{ndvi} \geq 0.795 \quad (7)$$

این رابطه با استفاده از تعداد زیادی از توابع LAI گردآوری شده (Carlson and Ripley 1997; Duchemin et al., 2006). رابطه بالا نشان‌دهنده میانگین این روابط گردآوری شده است.

## بهره‌وری آب

## نتایج و بحث

به منظور بررسی میزان بهره‌وری آب، بهره‌وری ناخالص (GBWP) و بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) در دشت قزوین، از روابط ۱۱ و ۱۲ استفاده شده است. بهره‌وری ناخالص آب زیست‌توده، مقدار خروجی (تولید زیست‌توده) را در رابطه با حجم کل آب مصرف شده در یک دوره معین بیان می‌کند.

$$GBWP = \frac{TBP}{E + T + I} \quad (11)$$

که در آن TBP کل تولید بیومس برحسب kg/ha است، E تبخیر، T تعرق و I آب نگهداری شده توسط پوشش گیاهی است و واحد تمامی آن‌ها برحسب میلی‌متر است. داده‌های مطرح شده برای محاسبه GBWP استفاده می‌شود: TBP، E، T، I به طوری که اگر بر اساس گام زمانی فصلی محاسبه شود. بهره‌وری خالص آب زیست‌توده، مقدار خروجی (تولید کل زیست‌توده) را در رابطه با حجم آب مصرفی مفید (از طریق تعرق تاج پوشش) در سال و در نتیجه نسبت تبخیر خاک بیان می‌کند. برخلاف بهره‌وری ناخالص آب، بهره‌وری خالص آب به‌ویژه در نظارت بر چگونگی استفاده مؤثر پوشش گیاهی (و مهم‌تر از آن، محصولات) از آب برای توسعه زیست‌توده (و در نتیجه عملکرد) مفید است.

$$NBWP = \frac{TBP}{T} \quad (12)$$

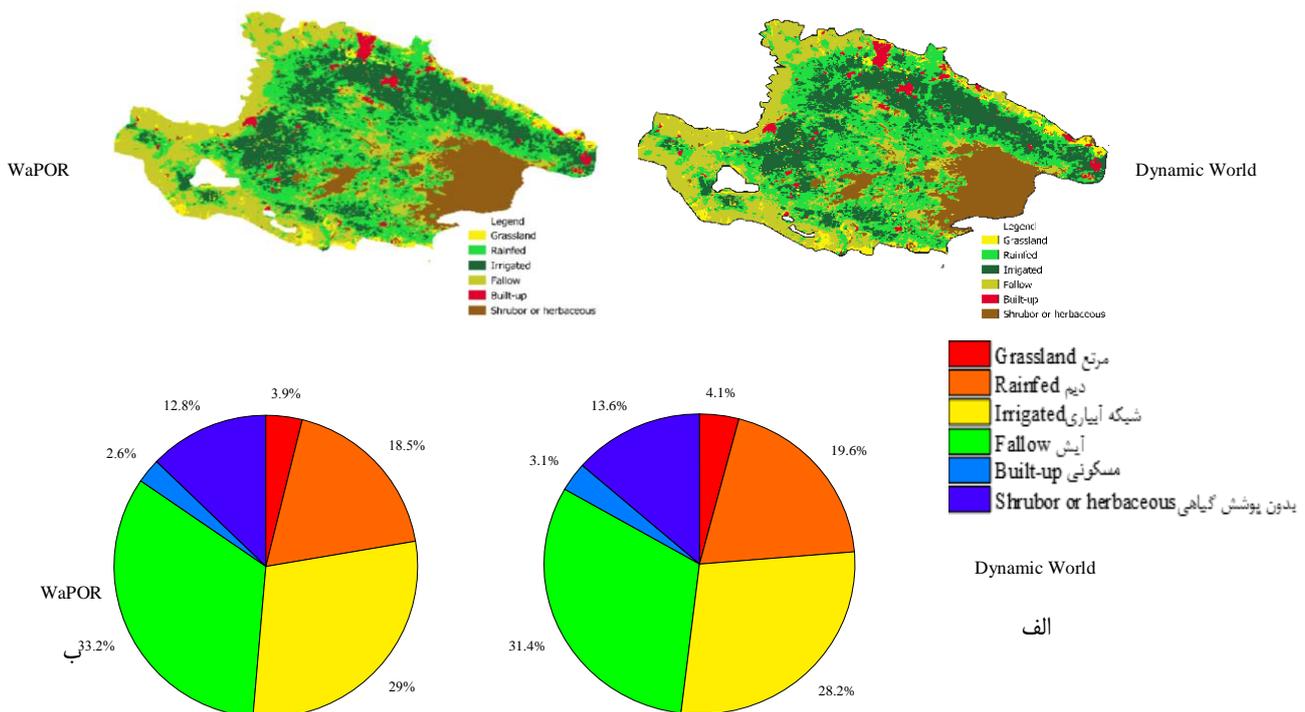
که در آن TBP کل تولید بیومس برحسب کیلوگرم در هکتار و T تعرق برحسب میلی‌متر است.

## طبقه‌بندی کاربری اراضی

با توجه به این که دشت قزوین به‌عنوان قطب کشاورزی مدرن در ایران محسوب می‌شود می‌تواند با مدیریت راهبردی بررسی و مدیریت مصرف آب و بهره‌وری آب و محصول در بهبود و توسعه کشاورزی کمک شایانی کند. لذا به‌منظور بررسی و برآورد بهره‌وری در منطقه در ابتدا لازم است که نقشه کاربری اراضی منطقه با دقت بالا تهیه شود. با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن تهیه نقشه کاربری به‌صورت زمینی، در حال حاضر یکی از جدیدترین روش‌های تهیه نقشه کاربری اراضی مدل Dynamic World است که نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متر را تهیه می‌کند (Brown et al., 2022). پایگاه‌های مختلفی امکان تهیه نقشه کاربری اراضی را دارند. پایگاه اطلاعاتی WaPOR نیز این ویژگی را دارد که نقشه کاربری اراضی ۲۳ کلاس را در سطح یک ارائه دهد.

به منظور تعیین کارایی و دقت نقشه طبقه‌بندی پوشش اراضی پایگاه WaPOR به بررسی و مقایسه نتایج حاصله با مدل Dynamic World که معرف یک مدل جهانی با دقت بالا است پرداخته می‌شود. به همین منظور آخرین نقشه کاربری اراضی که مربوط به سال ۲۰۲۱ است، با استفاده از پایگاه WaPOR و Dynamic World در سامانه GEE<sup>۱</sup> تهیه و بر اساس کلاس‌بندی منطقه به‌منظور بررسی دقت نقشه کاربری پایگاه WaPOR و تعیین درصد هر کلاس با یکدیگر مقایسه گردید. با توجه به منطقه مورد مطالعه و عدم وجود ۲۳ کلاس در منطقه بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، طبقه‌بندی در ۶ کلاس امکان‌پذیر و قابل مقایسه بود. نتایج به‌دست‌آمده از هر دو مدل در شکل ۲ نشان می‌دهد که طبقه‌بندی انجام‌شده در منطقه از دقت مناسبی برخوردار بوده و توانسته است تا حد زیادی به‌درستی پراکندگی انواع پوشش گیاهی در منطقه را پوشش دهد. به طوری که هر چه تراکم پوشش گیاهی در منطقه کمتر باشد درصد دقت برآوردی بیشتر است، به طوری که در مناطق بدون پوشش و مناطق علفزار درصد همپوشانی به نسبت بالایی را در دو مدل نسبت به یکدیگر داشته‌اند و هرچه تنوع پوشش گیاهی در منطقه بیشتر باشد از میزان این درصد همپوشانی کاسته خواهد شد.

در ادامه به‌منظور بررسی میزان تبخیر-تعرق و بهره‌وری آب در منطقه، در ابتدا لازم است به بررسی تغییرات کاربری اراضی در یک بازه زمانی بلندمدت ۱۳ ساله پرداخته شود. همان‌طور که در شکل (۳ الف) نیز ملاحظه می‌شود، روند تغییرات در تعدادی از مناطق همچون اراضی بدون پوشش شامل منطقه شورزار با تغییرات زیادی همراه نیست، که البته این مورد شامل سازه‌های ساخته‌شده نیز می‌شود. اما مابقی مناطق با تغییراتی همراه است. به طوری که درصد اراضی زراعی تحت پوشش شبکه آبیاری از ۲۹ به ۲۲ درصد کاهش داشته است. درصد اراضی آیش نیز از ۳۳ به ۲۴ درصد کاهش داشته است. از طرفی سطح وسیعی از منطقه که تحت پوشش شبکه آبیاری است به اراضی دیم تبدیل شده و سطح زیر کشت اراضی دیم از ۱۸ درصد به ۳۳ درصد افزایش داشته است. همچنین با توجه به شکل (۳-ب) نیز ملاحظه می‌شود که علاوه بر اراضی تحت شبکه و اراضی آیش، اراضی مرتع به اراضی تحت پوشش دیم تبدیل شده است. از جمله دلایل این افزایش را می‌توان به تغییر اقلیم در منطقه، کمبود منابع آب در منطقه، افت شدید سطح آب زیرزمینی و سیاست‌گذاری در خودکفایی تولید گندم دانست که کشاورز به ناچار سطح وسیعی از اراضی خود را به اراضی کشت دیم اختصاص می‌دهد. گندم جزء یکی از محصولات استراتژیک در کشور محسوب می‌شود. در همین راستا بیشتر اراضی آبی و دیم بر اساس مشاهدات میدانی به کشت گندم در منطقه اختصاص داده شده است، که به سبب آن استفاده بی‌رویه از منابع آبی بدون نوآوری‌های فنی در کشت و مدیریت آبیاری در واحد سطح موجب کاهش بهره‌وری محصول و آب خواهد شد.

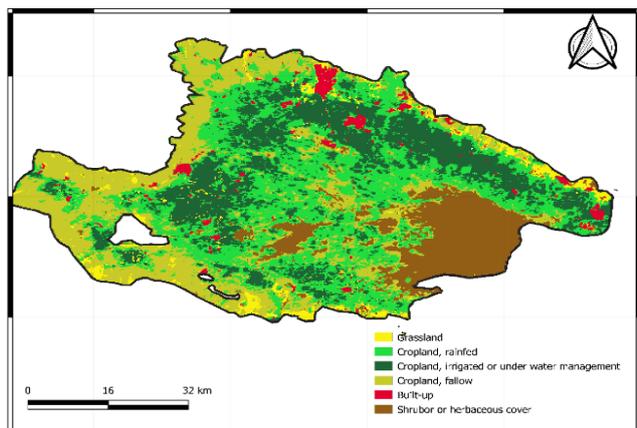


شکل ۲- مقایسه درصد کاربری اراضی بر اساس آخرین کلاس‌بندی منطقه در مدل Dynamic World (الف) و WaPOR (ب) در سال ۲۰۲۱  
 Figure 2- Comparison of the percentage of land use based on the latest classification of the region in the Dynamic World (a) and WaPOR models (b) in 2021

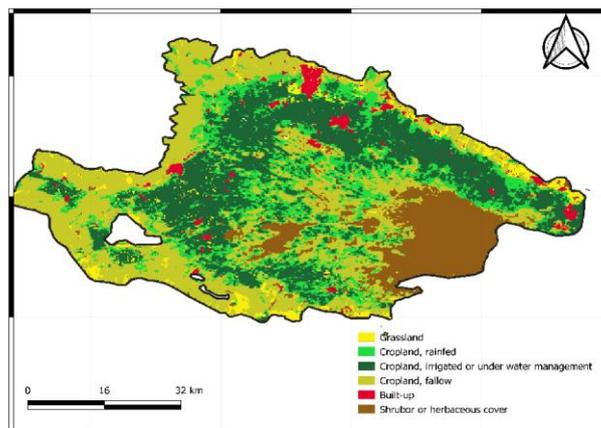
### بررسی تبخیر-تعرق

برنامه‌ریزی و مدیریت آب به عوامل مختلفی بستگی دارد. بنابراین در ادامه به بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از داده‌های WaPOR پرداخته می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر سعی شد میزان تبخیر-تعرق واقعی در کلاس‌های کاربری مختلف برآورد و بررسی شود.

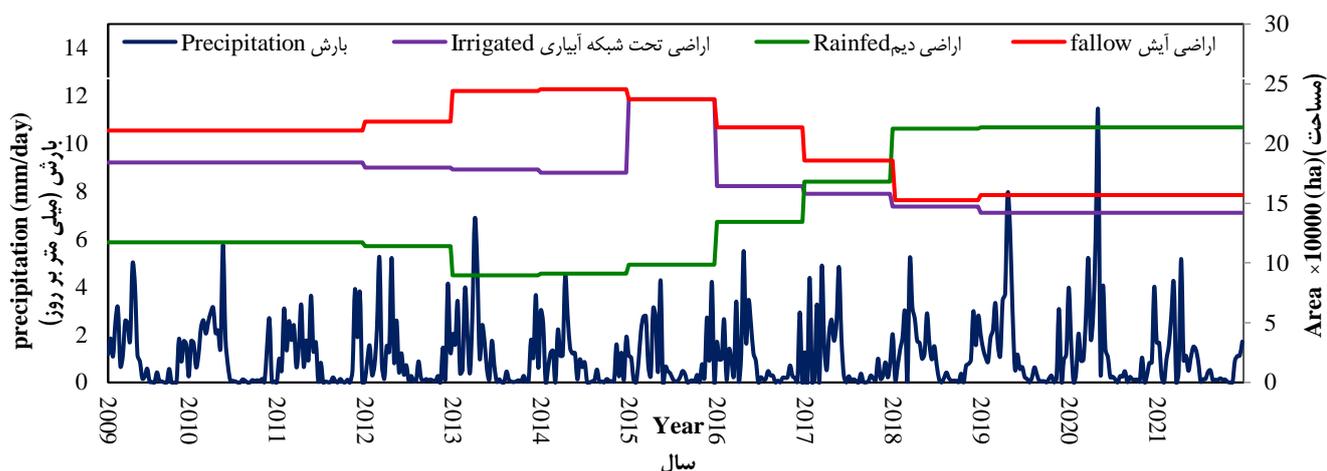
در ادامه روند تغییرات مساحت اراضی مختلف کشاورزی نشان می‌دهد طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ میزان سطح زیر کشت اراضی تحت شبکه آبیاری و اراضی آیش هر یک به ترتیب نسبت به اراضی دیم حدود ۴۰ و ۴۵ درصد بیشتر شده و همین عامل باعث افزایش مصرف آب و برداشت بیشتر از آب‌های سطحی و زیرزمینی شده است. این در حالی است که هیچ‌گونه افزایشی در منابع آبی دشت در این بازه زمانی به لحاظ میزان بارش مشاهده نمی‌شود. این روند در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸ با اندکی تفاوت همراه بوده و با کاهش منابع آبی، سطح بیشتری از اراضی به آیش تغییر کاربری داده شده است. اما روند منابع آبی همچنان با کاهش همراه بوده و مقدار زیادی از منابع آب زیرزمینی مصرف شده است. (Ahmadi, 2022) در پژوهشی به بررسی سناریو-های مختلف در زمینه کاهش منابع آبی در دشت قزوین پرداخت، که نتایج نشان داد ذخیره آب زیرزمینی با روند رو به کاهش همراه بوده و بیشترین افت بین سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ با افت تقریبی ۴۰۰ میلیون مترمکعب همراه بوده است. اما با توجه به افزایش جمعیت و نیاز روزافزون به تأمین مواد غذایی سطح اراضی دیم با افزایش پله‌ای و متناوب همراه شده است.



۲۰۲۱  
2021



۲۰۰۹  
2009



(ب)

شکل ۳- الف) نقشه کاربری اراضی و ب) روند تغییرات مساحت اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۱ در دشت قزوین با استفاده از پایگاه WaPOR

Figure 3- a) Land use map and b) the trend of land area changes during 2009 and 2021 in Qazvin plain using WaPOR database

سال ۲۰۱۷ به بعد با کاهش روبه‌رو شده است که یکی از دلایل کاهش میزان تبخیر-تعرق در این بازه زمانی را می‌توان به کمبود آب در دسترس گیاه با توجه به منابع محدود آب در طی سال‌های اخیر اشاره نمود. تأثیر پوشش گیاهی و میزان شاخص سطح برگ در تعیین میزان تبخیر-تعرق از اهمیت بالایی برخوردار است، به طوری که در مناطق علفزار و مراتع به دلیل وجود پوشش گیاهی پراکنده مقدار تبخیر-تعرق تا میزان ۵۰ درصد کمتر از اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری است. میزان تغییرات تبخیر-تعرق در اراضی آیش به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی به شدت پایین است. در بعضی مناطق علت کاهش ممکن است

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود علت نوسان زیاد در مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده در بازه‌های زمانی مختلف را می‌توان ناشی از تراکم پوشش گیاهی و کم شدن اراضی تحت کشت در بعضی از فصول سال دانست. به طور کلی، حجم بالای تبخیر-تعرق شامل مناطقی است که تحت پوشش شبکه آبیاری قرار دارد که در زمانی که پوشش سبز در بیشترین میزان خود قرار دارد، این مقدار به طور میانگین بین ۵ تا ۶ میلی‌متر در روز می‌رسد. در شکل ۴ مقادیر تبخیر-تعرق گیاهان تحت پوشش شبکه آبیاری در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۶ با روند نسبتاً پایداری همراه بوده است، اما این روند پایدار در

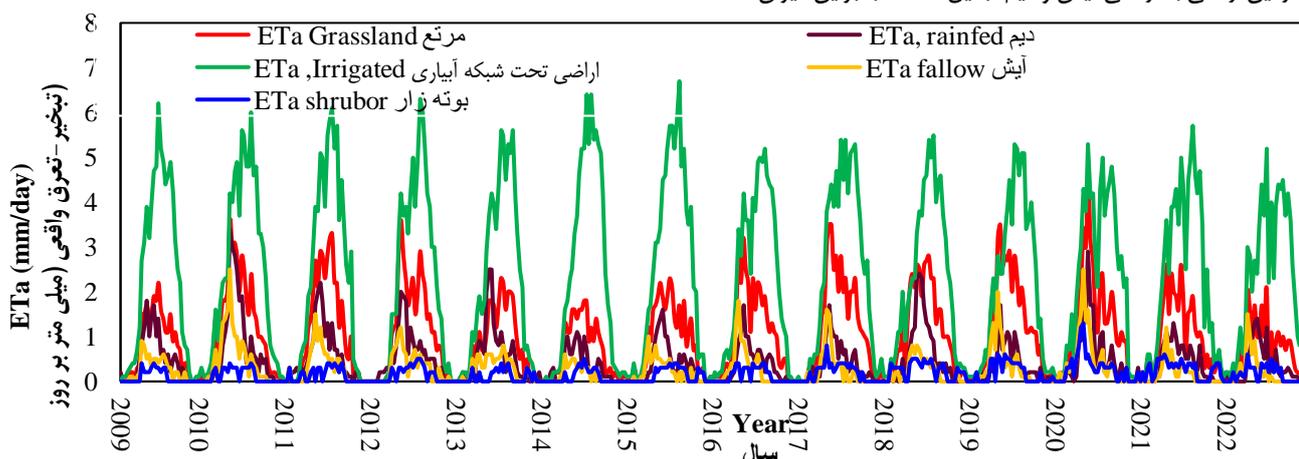
حجم آب زیست‌توده نیز با تغییر مواجه شده و مقدار آن در اراضی دیم در طی سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ با افزایش به نسبت قابل‌ملاحظه‌ای روبه‌رو شده است. یکی دیگر از دلایل این‌که میزان زیست‌توده در اراضی دیم با افزایش قابل‌ملاحظه‌ای روبه‌رو بوده است، به انتخاب محصول متناسب با وضعیت بارش در منطقه و استفاده حداکثری از میزان بارش دریافتی به واسطه فرآیند فتوسنتز در گیاه و ماکریم راندمان تبدیل انرژی خورشیدی وابسته بوده است.

در شکل ۶ میانگین سالانه مقادیر و بهره‌وری خالص آب زیست‌توده (NBWP) نشان می‌دهد که دامنه تغییرات در طی سال‌های مختلف متفاوت است. اما بررسی میانگین مقادیر بهره‌وری خالص آب زیست‌توده در اراضی تحت شبکه در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ حدود ۲/۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. این میزان در اراضی دیم برابر با ۲/۱۳ کیلوگرم بر مترمکعب است. میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد محصول در اراضی دیم وابسته به میزان بارش دریافتی است. همان‌طور که در شکل ۶ قابل‌ملاحظه است، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ نسبت میانگین بارش سالانه با کاهش روبه‌رو است. بنابراین بهره‌وری خالص آب زیست‌توده نیز در این اراضی به نسبت میزان بارش، با کاهش روبه‌رو شده است. اما این کاهش بارش تأثیر زیادی در اراضی تحت شبکه آبیاری نداشته است. افزایش مصرف آب در مرحله میانی رشد محصول، باعث افزایش عملکرد محصول می‌شود، از این‌رو اطمینان از تأمین آب کافی در فاز میانی، برای دستیابی به بهره‌وری بالا بسیار مهم است (Chai et al., 2022).

به دلیل استفاده از انواع مالچ در اراضی آیش باشد به‌طوری‌که اثر لایه مالچ سطحی بر کاهش تبخیر می‌تواند ناشی از تغییر در مقدار انتقال گرما به سطح خاک و برعکس، تغییر قدرت جذب انرژی خورشید و کاهش نیروهای موینگی خاک و در نتیجه نرسیدن آب به سطح خاک باشد (Hallett, 2008). مناطق شوره‌زار دشت قزوین نیز به دلیل عدم وجود پوشش گیاهی مقادیر تبخیر-تعرق نزدیک به صفر را دارد.

### بهره‌وری آب محصول

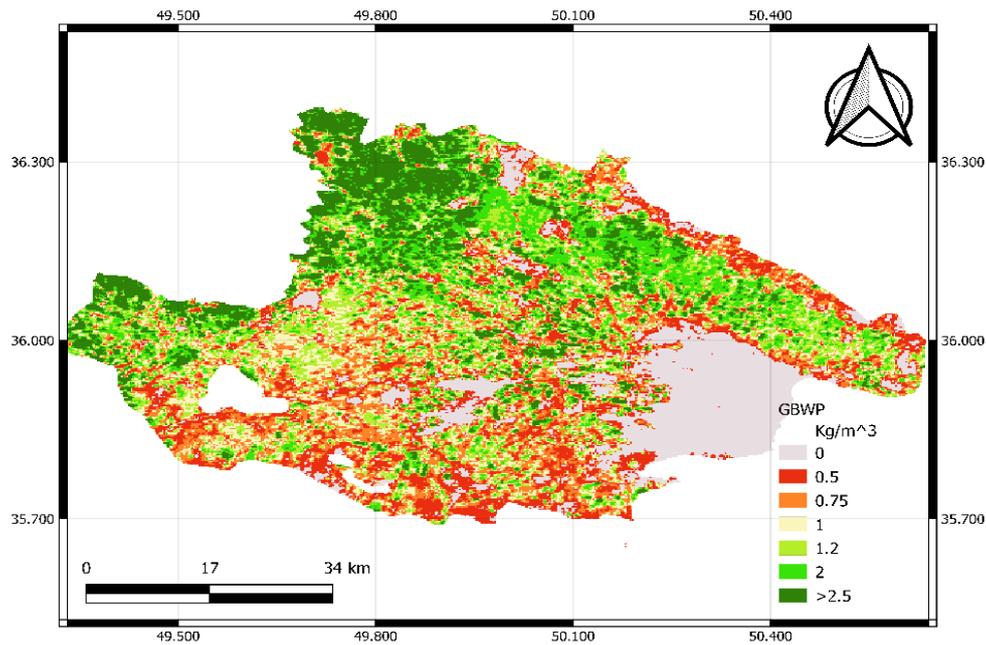
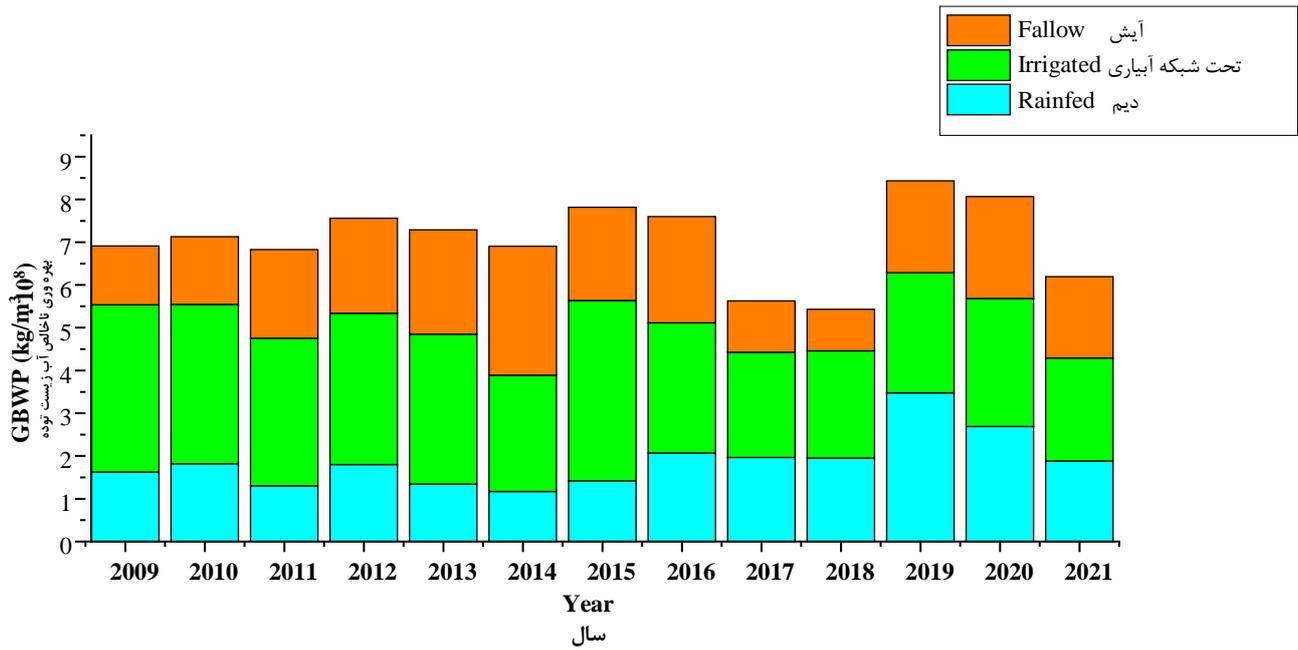
مدیریت مصرف در بهره‌برداری از منابع آب، یک مسیر مستقیم به‌منظور افزایش ارزش محصولات تولید شده توسط آب است، که با مفهوم بهره‌وری آب شناخته می‌شود. شاخص GBWP، مقدار خروجی (تولید زیست‌توده) را در رابطه با حجم کل آب مصرف‌شده در یک دوره معین بیان می‌کند (FAO, 2016). این شاخص شناختی را در مورد تأثیر گسترش پوشش گیاهی بر میزان آب مصرفی در نتیجه بر بیلان آب در یک حوضه معین ارائه می‌دهد. شکل (۵-الف) به برآورد میزان حجم آب زیست‌توده بر اساس نقشه کاربری و مقدار عددی هر پیکسل پرداخته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بیشترین میزان حجم آب زیست‌توده به کلاس تحت پوشش شبکه آبیاری اختصاص دارد و از جمله دلایل آن را می‌توان به وجود برنامه‌ریزی معین در آبیاری و در نتیجه برداشت محصول با تراکم و بهره‌وری بالاتر نسبت داد. به‌طور کلی میزان ناخالص حجم آب زیست‌توده از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با افزایش همراه بوده است. اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز سطح آب زیرزمینی باعث کاهش مساحت اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیم تبدیل شده‌اند. بنابراین میزان



شکل ۴- برآورد میزان تبخیر-تعرق واقعی روزانه در اراضی با کاربری مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲.

Figure 4- Estimation of actual daily evapotranspiration in lands with different uses during the years 2009 to 2022

(الف)

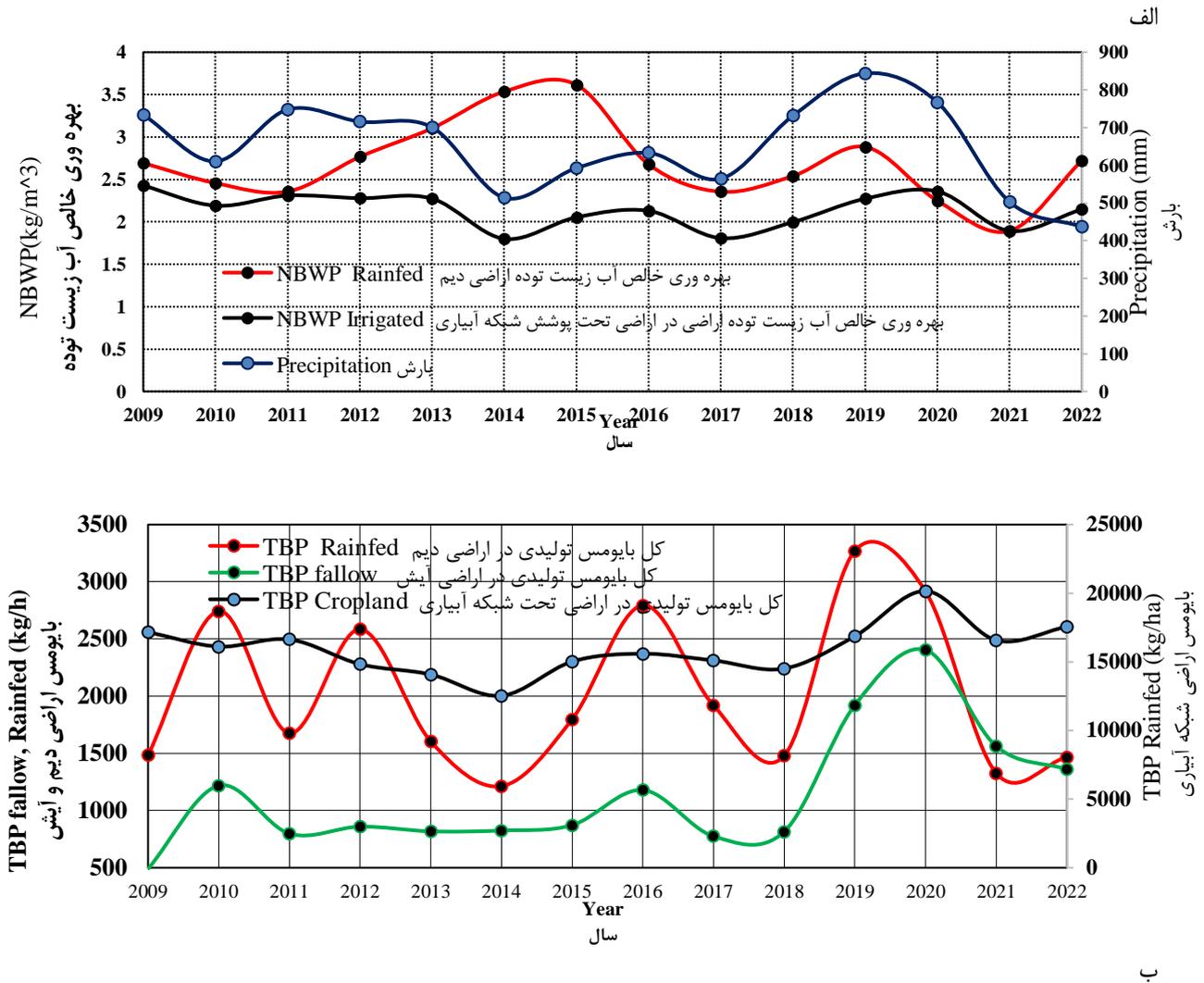


(ب)

شکل ۵- الف) بهره‌وری ناخالص حجم آب زیست‌توده (GBWP) بر اساس کاربری اراضی در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱. ب) نقشه بهره‌وری

ناخالص آب زیست‌توده در سال ۲۰۲۱

Figure 5- a) gross biomass water productivity volume based on land use during the years 2009 to 2021. b) map of gross biomass water productivity in 2021



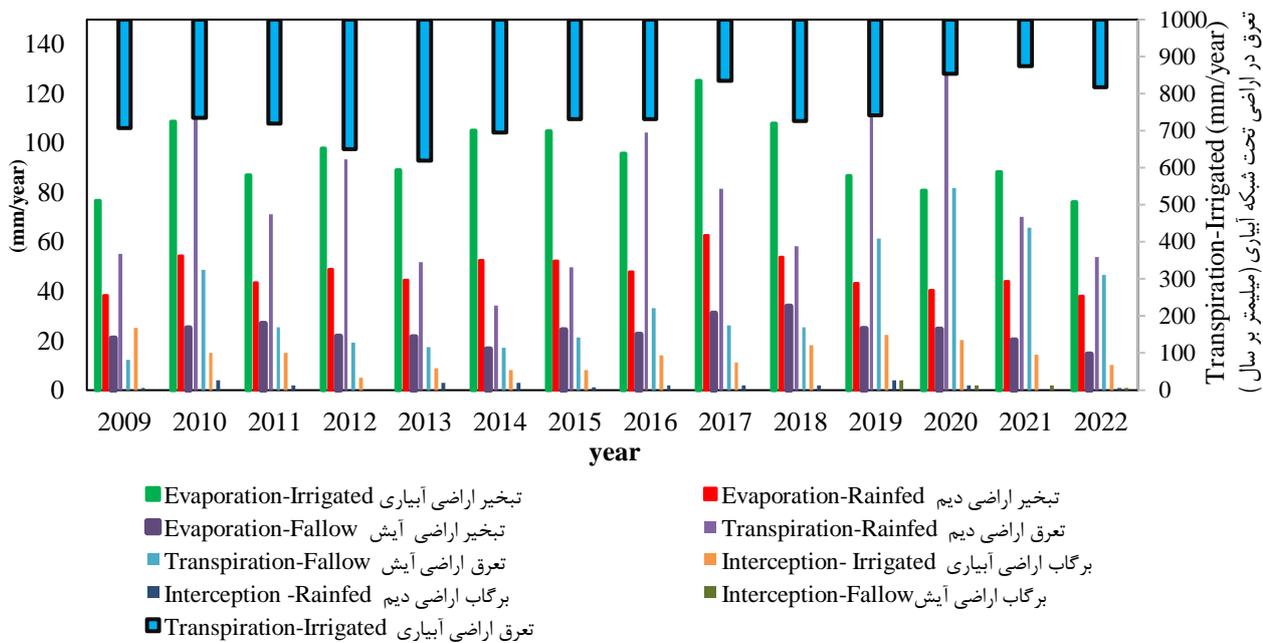
شکل ۶- میانگین سالانه NBWP و TBP در اراضی مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲  
 Figure 6- Average annual NBWP and TBP in different lands during the years 2009 to 2022

مناطق بستگی دارد. زیرا بر اساس نتایج به دست آمده از شکل ۷ میزان تعرق در این مناطق هشت الی نه برابر تعرق در اراضی دیم است و این میزان در اراضی آیش با مقدار کاهشی بیشتری همراه بوده است. مقدار بالای تعرق در اراضی تحت پوشش شبکه به دلیل افزایش سطح زیر کشت و تراکم کشت در این مناطق است که منجر به افزایش مصرف آب در این اراضی می‌شود. در مقایسه میزان زیست‌توده و مقادیر هر یک از پارامترهای تبخیر، تعرق و برگاب نشان می‌دهد که هر چه میزان تبخیر و تعرق افزایش داشته باشد، میزان زیست‌توده نیز با افزایش همراه خواهد شد. به طوری که در سال ۲۰۲۰ میزان زیست‌توده در اراضی تحت شبکه آبیاری به طور میانگین برابر با ۲۰۱۵۶ کیلوگرم بر هکتار است که میزان میانگین سالانه تعرق ناشی از اراضی تحت شبکه در این سال برابر ۸۵۴ میلی‌متر است.

شکل (۶-ب) بررسی روند میزان کل زیست‌توده در اراضی مختلف را نشان می‌دهد. در طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ این شاخص در تمامی کاربری‌ها با افزایش تدریجی همراه شده است. به طوری که میزان شاخص TBP در سال ۲۰۲۰ به میزان ۱۷ درصد بیشتر از سال ۲۰۰۹ است. میزان زیست‌توده در اراضی مختلف نشان می‌دهد که میزان زیست‌توده در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری به میزان ۵ تا ۶ برابر بیشتر از اراضی دیم است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد شاخص TBP می‌توان به مقدار تبخیر، تعرق و برگاب اشاره کرد، که افزایش یا کاهشی بودن هر یک از این پارامترها تأثیر بسزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. بنابراین به منظور بررسی دقیق‌تر به برآورد میزان تبخیر، تعرق و برگاب در بازه زمانی مورد مطالعه پرداخته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که مقدار تولید زیست‌توده در مناطق تحت پوشش شبکه آبیاری تا حد زیادی به میزان تعرق بالا در این

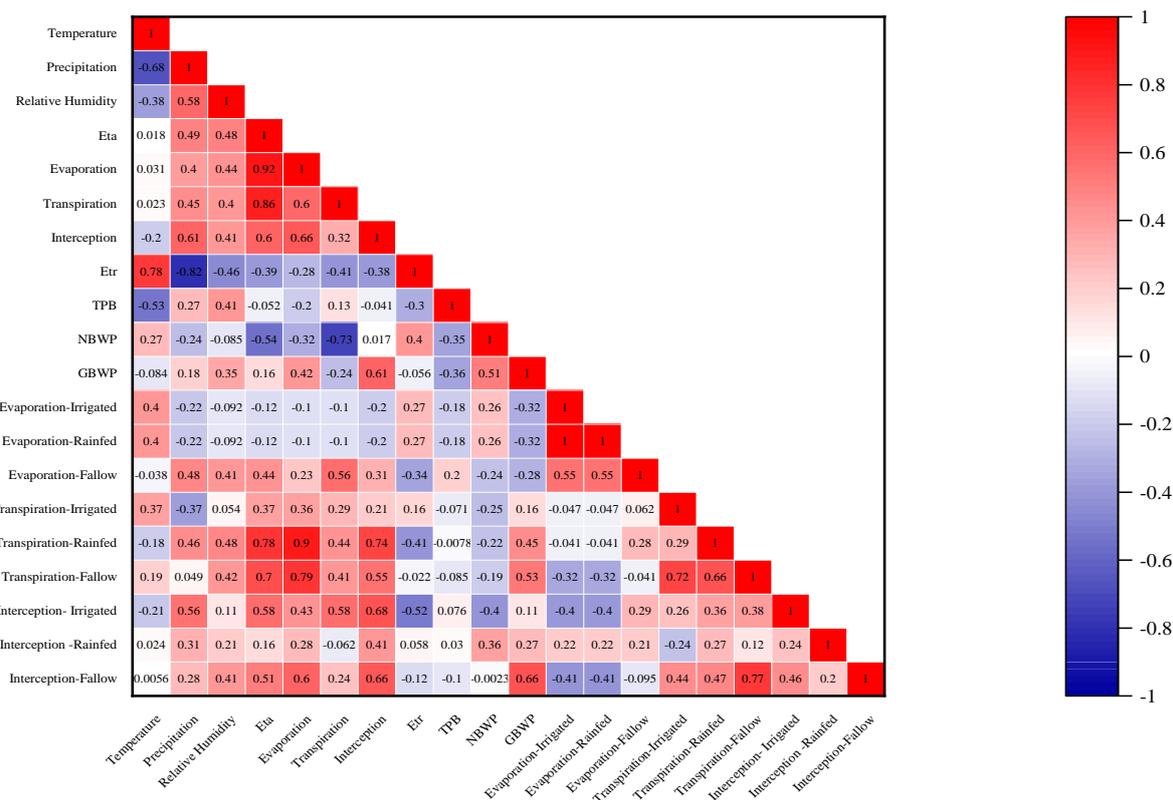
خواهد شد. اما در اراضی دیم به دلیل تنش آبی، تولید محصول با محدودیت روبه‌رو خواهد شد. با توجه به این که پارامترهای مختلفی در برآورد میزان تبخیر-تعرق و میزان زیست‌توده تأثیرگذار هستند. در ادامه در شکل ۸ به بررسی میزان همبستگی هر یک از پارامترها و شاخص‌های مختلف پرداخته می‌شود. ماتریس همبستگی نتایج به دست آمده از هر یک از این شاخص‌ها و پارامترهای بررسی شده، نشان داد که پارامترهای هواشناسی همچون دما با بارش دارای همبستگی  $-0.68$  است. پارامتر تبخیر و پارامتر تعرق با مقدار تبخیر-تعرق واقعی دارای همبستگی به ترتیب  $0.92$  و  $0.86$  است. بررسی همبستگی بین شاخص بهره‌وری خاص آب زیست‌توده (NBWP) و مقدار تعرق نشان داد که این شاخص با تعرق دارای همبستگی  $-0.73$  است. این بدان معناست که با افزایش میزان تعرق، مقدار بهره‌وری خالص آب زیست‌توده با کاهش روبه‌رو خواهد شد.

از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد تبخیر-تعرق و مقدار زیست‌توده می‌توان به برگاب اشاره نمود. مقدار برگاب به عوامل زیادی از جمله خصوصیات بارندگی یا آبیاری (شدت، مدت، اندازه قطرات و...) و خصوصیات گیاهی (نوع گیاه، مرحله رشدی، تراکم، شاخص سطح برگ و...) وابسته است (Gutezeit, 2006). بررسی مقادیر برگاب در کاربری‌های مختلف نشان می‌دهد میانگین سالانه برگاب در اراضی تحت شبکه در بازه زمانی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ برابر با ۱۴ میلی‌متر در سال است در حالی که مقدار برگاب در اراضی دیم و آیش به‌طور میانگین سالانه به ترتیب برابر با  $1/94$  و  $0/64$  میلی‌متر در سال است. با توجه به این که به‌منظور برآورد مقدار برگاب از دو فاکتور شاخص سطح برگ و ظرفیت ذخیره آب در پوشش گیاهی استفاده می‌شود، بنابراین می‌توان انتظار این را داشت که مقدار برگاب در این مناطق، عدد قابل‌ملاحظه‌ای نخواهد بود. زیرا افزایش شاخص سطح برگ منجر به افزایش عملکرد محصول و در نهایت افزایش مقدار میزان زیست‌توده



شکل ۷- میانگین سالانه مقدار تبخیر، تعرق و برگاب سه سطح کاربری اراضی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲

Figure 7- The annual average amount of evaporation, transpiration and runoff of three land use levels in the period from 2009 to 2022



شکل ۸- نمودار ماتریس همبستگی بین پارامتر و شاخص‌های مختلف برآورده شده و مقدار تبخیر-تعرق پایگاه WaPOR  
 Figure 8- Correlation matrix diagram between the parameter and various indices Estimated and the evapotranspiration value of the WaPOR database

### نتیجه‌گیری

می‌شود، در ادامه به بررسی و برآورد شاخص‌های بهره‌وری آب زیست-توده همچون GBWP و NBWP پرداخته شد. نتایج حاصل از این بررسی‌ها نشان داد که میزان GBWP از ابتدای سال ۲۰۰۹ تا سال ۲۰۱۶ در اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری با میزان افزایشی همراه بود. اما از سال ۲۰۱۷ روند تغییرات دمایی و افت شدید تراز آب زیرزمینی باعث کاهش سطح اراضی تحت پوشش شبکه شده و بسیاری از این اراضی به اراضی آیش و دیوم تبدیل شده‌اند. بنابراین میزان حجم آب زیست‌توده نیز با تغییر مواجه شده است. بررسی شاخص NBWP نیز نشان داد که میزان بهره‌وری خالص در اراضی دیوم به شدت به میزان بارش سالانه وابسته است و بخش زیادی از عملکرد دانه در اراضی دیوم وابسته به میزان بارش دریافتی است. از جمله پارامترهای تأثیرگذار در برآورد مقدار کل زیست‌توده را می‌توان در مقدار تبخیر، تعرق و برگاب مشاهده کرد که افزایشی یا کاهش‌ی بودن هر یک از این پارامترها تأثیر بسزایی در مقدار زیست‌توده برآورد شده خواهد داشت. بنابراین داده‌های WaPOR این امکان را فراهم می‌کنند که نتایج قابل قبولی را با توجه به تراکم پوشش گیاهی مختلف در منطقه ارائه دهد. لذا پیشنهاد می‌شود که سعی شود با جمع‌آوری داده‌های زمینی همچون میزان زیست‌توده

بررسی مقدار تبخیر-تعرق و نیاز آبی از اهمیت زیادی در مدیریت و بهره‌وری آب در منطقه برخوردار است. به همین منظور برای بررسی و برآورد میزان دقیق آب مصرفی لازم است از نقشه‌های کاربری اراضی استفاده شود. با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن تهیه نقشه کاربری به‌صورت زمینی، از نقشه کاربری اراضی پایگاه داده WaPOR که از دقت مناسبی برخوردار بود، استفاده شد. داده‌های پایگاه WaPOR به دلیل قدرت تفکیک مکانی ده روزه و عدم وجود خلأ داده‌ای، می‌تواند نقش مهمی در بررسی برآورد میزان تبخیر-تعرق و پارامترهای مرتبط با بهره‌وری آب در منطقه داشته باشد. پایگاه WaPOR امکان برآورد میزان تبخیر-تعرق را در سطح ۳ که شامل مناطقی از آفریقا و خاورمیانه است، را فراهم آورده است. در همین راستا به بررسی میزان تبخیر-تعرق واقعی بر اساس نقشه کاربری اراضی در دشت قزوین در بازه زمانی سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ پرداخته شد. نتایج به دست آمده با توجه نقشه طبقه‌بندی ۶ کلاسه، نشان داد که پایگاه WaPOR از دقت مناسبی در برآورد میزان تبخیر-تعرق در منطقه برخوردار است. با توجه به این‌که مدیریت مصرف منابع آبی موجب افزایش بهره‌وری محصول

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد".

و مقادیر تبخیر-تعرق به اعتبارسنجی و بررسی این داده‌ها با مقادیر زمینی پرداخته شود.

## منابع

- Ahmadi, A. (2022). The effect of increasing water use efficiency on improving the status of groundwater resources using WEAP model in Qazvin Plain. *Water and Soil Management and Modelling*, 2(1), 53–62. (In Persian). <http://doi.org/10.22098/MMWS.2022.9333.1034>
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Allen, R.G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Baastiaansen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., & Holtslag, A. (1998). AM: A remote sensing surface balance algorithm for land (SEBAL). *Journal of Hydrology*, 212–213. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)
- Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N., & Davatgar, N. (2022). The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1268–1279. <https://doi.org/10.1002/ird.2738>
- Bastiaanssen, W.G.M., Cheema, M.J.M., Immerzeel, W.W., Miltenburg, I.J., & Pelgrum, H. (2012). Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model. *Water Resources Research*, 48(11). <https://doi.org/10.1029/2011WR010482>
- Blatchford, M.L., Mannaerts, C.M., Njuki, S.M., Nouri, H., Zeng, Y., Pelgrum, H., Wonink, S., & Karimi, P. (2020). Evaluation of WaPOR V2 evapotranspiration products across Africa. *Hydrological Processes*, 34(15), 3200–3221. <https://doi.org/10.1002/hyp.13791>
- Brown, C.F., Brumby, S.P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S.B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V.J., Haertel, R., & Ilyushchenko, S. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Carlson, T.N., & Ripley, D.A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Chai, Y., Chai, Q., Yang, C., Chen, Y., Li, R., Li, Y., Chang, L., Lan, X., Cheng, H., & Chai, S. (2022). Plastic film mulching increases yield, water productivity, and net income of rain-fed winter wheat compared with no mulching in semiarid Northwest China. *Agricultural Water Management*, 262, 107420. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107420>
- Coenders-Gerrits, A.M.J., Van der Ent, R.J., Bogaard, T.A., Wang-Erlandsson, L., Hrachowitz, M., & Savenije, H.H.G. (2014). Uncertainties in transpiration estimates. *Nature*, 506(7487), E1–E2. <https://doi.org/10.1038/nature12925>
- Cuxart, J., & Boone, A.A. (2020). Evapotranspiration over land from a boundary-layer meteorology perspective. *Boundary-Layer Meteorology*, 177(2–3), 427–459. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00550-9>
- Duchemin, B., Hadria, R., Erraki, S., Boulet, G., Maisongrande, P., Chehbouni, A., Escadafal, R., Ezzahar, J., Hoedjes, J.C.B., & Kharrou, M.H. (2006). Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agricultural Water Management*, 79(1), 1–27. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.02.013>
- Engman, E.T., & Gurney, R.J. (1991). *Remote sensing in hydrology*. Chapman and Hall Ltd.
- Fakhar, M.S., & Kaviani, A. (2022). Evaluation of FAO WaPOR product and PYSEBAL algorithm in estimating The amount of water consumed. *Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN*, 2423, 7833. (In Persian). <http://doi.org/10.22059/ijswr.2022.341474.669242>
- FAO. (2021). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture—Systems at Breaking Point. In *Synthesis Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.
- FAO, 2020. WaPOR database methodology. <http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity/resources/publications/wapor-publications/en/>.
- FAO (2016). *Water Accounting and Auditing: A Sourcebook*. FAO Water Reports, no. 43.
- Golian, S., Javadian, M., & Behrangi, A. (2019). On the use of satellite, gauge, and reanalysis precipitation products for drought studies. *Environmental Research Letters*, 14(7), 75005.
- Gutezeit, B. (2006). Storage of intercepted water on vegetable plants measured by gamma scanning technique. *European Journal of Horticultural Science*, 71(1), 30.
- Hallett, P.D. (2008). A brief overview of the causes, impacts and amelioration of soil water repellency—a review. *Soil and Water Research*, 3(1), 521–528.

22. Hedayati, A., & Kakavand, R. (2012). Climatic zoning of Qazvin Province. *Nivar*, 36(77–76), 59–66. (In Persian)
23. Hessels, T., van Opstal, J., Trambauer, P., Bastiaanssen, W., Faouzi, M., Mohamed, Y., & ErRaji, A. (2017). *pySEBAL Version 3.3*. 7.
24. Idso, S.B., Jackson, R.D., & Reginato, R.J. (1975). Estimating evaporation: a technique adaptable to remote sensing. *Science*, 189(4207), 991–992. <http://doi.org/10.1126/science.189.4207.991>
25. Jiménez, C., Prigent, C., Mueller, B., Seneviratne, S.I., McCabe, M.F., Wood, E.F., Rossow, W.B., Balsamo, G., Betts, A.K., & Dirmeyer, P.A. (2011). Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D2). <https://doi.org/10.1029/2010JD014545>
26. Karishma, C.G., Kannan, B., Nagarajan, K., Panneerselvam, S., & Pazhanivelan, S. (2022). Spatial and temporal estimation of actual evapotranspiration of lower Bhavani basin, Tamil Nadu using Surface Energy Balance Algorithm for Land Model. *Journal of Applied and Natural Science*, 14(2), 566–574. <https://doi.org/10.31018/jans.v14i2.3412>
27. Katul, G.G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M.B. (2012). Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50(3). <https://doi.org/10.1029/2011RG000366>
28. Liou, Y.-A., & Kar, S.K. (2014). Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms—A review. *Energies*, 7(5), 2821–2849. <https://doi.org/10.3390/en7052821>
29. Liu, Y.J., Chen, J., & Pan, T. (2019). Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998–2005. *Earth and Space Science*, 6(8), 1366–1377. <https://doi.org/10.1029/2019EA000626>
30. Mohammadi, M., Mohammadi Ghaleney, M., & Ebrahimi, K. (2011). Spatial and temporal variations of groundwater quality of Qazvin plain, *Water Research Iran*, 5(8), 41–51. (In Persian)
31. Oberg, J.W., & Meless, A.M. (2006). Evapotranspiration dynamics at an ecohydrological restoration site: an energy balance and remote sensing approach 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(3), 565–582. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04476.x>
32. Paredes, P., & Pereira, L.S. (2019). Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PM-ET<sub>o</sub> from temperature with focus on solar radiation. *Agricultural Water Management*, 215, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.014>
33. Pereira, L.S., Paredes, P., López-Urrea, D.J., & Jovanovic, N. (2021). Updates and advances to the FAO56 crop water requirements method. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106697>
34. Rahimpour, M., Karimi, N., Rouzbahani, R., & Eftekhari, M. (2018). Validation and calibration of FAO WaPOR product (actual evapotranspiration) in Iran using in-situ measurements. *Iran-Water Resources Research*, 14(2), 254–263. (In Persian)
35. Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 85–100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>, 2002
36. Yang, Y., Anderson, M., Gao, F., Xue, J., Knipper, K., & Hain, C. (2022). Improved daily evapotranspiration estimation using remotely sensed data in a data fusion system. *Remote Sensing*, 14(8), 1772. <https://doi.org/10.3390/rs14081772>



## Contents

<b>Evaluating the SSM Model Efficiency in Simulating the Wheat Growth under Water Stress Conditions</b>	353
S. Shiukhy Soqanloo, M. Mousavi Baygi, B. Torabi, M. Raeini Sarjaz	
<b>Management and Simulation of the Latian Multi-purpose Reservoir Dam and Its Performance Evaluation Based on the Operation Policy on Daily Time Scale</b>	367
M. Babaei, M.T. Sattari	
<b>The Effect of Raindrop Impact on Runoff and Soil Loss from Rills under Different Rainfall Intensities</b>	383
A.R. Vaezi, R. Bigdeli	
<b>The Effect of Land Abandonment on Biological, Physical and Chemical Properties of Soils</b>	397
M.S. Sadati , A. Beheshti Ale Agha, F. Hamed	
<b>The Relationship between the Slope Hill and Bedrock with Some Soil Properties</b>	415
M. Jafarian, A. Golkarian, H. Emami	
<b>The Mutual Effect of Cadmium and Magnetic Iron Nanoparticles in the Distribution of Chemical Forms of Cadmium in a Contaminated Soil</b>	431
S. Nikkhosani Gol Tapeh, S. Sadeghi, M. Nooraien, S. Zavareh	
<b>Spatial Soil Erosion Risk at the Brimvand Watershed in Kermanshah Province, Iran</b>	443
S.H.R. Sadeghi, M. Kalehhouie, A. Noori, N. Naderi Marangalo, M. Havasi, A. Payfeshoordeh, M. Khairparast, S. Mostafaei Younjali, Z. Pirooznia, M. Hamzeh Bibalani	
<b>Assessment of Pollution in the Central Soils of Khuzestan Province with Potentially Toxic Elements (PTEs) and their Origins</b>	457
N. Sahraei, A. Landi, S. Hojati, E. Pasolli	
<b>Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)</b>	473
N. Torabinezhad- A. Zarrin- A.A. Dadashi-Roudbari	
<b>Evaluation of Evapotranspiration Rate and Water Productivity Based on FAO WaPOR Database in Qazvin Plain</b>	487
M.S. Fakhar, A. Kaviani	

# WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 3

2023

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

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

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

## Editorial Board:

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