مجله
آب و خاک
(علوم و صنایع کشاورزی)

دانشگاه فردوسی مشهد
Ferdowsi University of Mashhad

جلد ۳۶ شماره ۵
سال ۱۴۰۱

Vol. 36 No. 5
2022

Journal of
Water and Soil
(Agricultural Science and Technology)

شماره پیاپی ۸۵

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

ISSN:2008-4757

عنوان مقالات

تاثیر فاصله لوله‌های آبده سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری (Tape) بر توزیع شوری در پروفیل خاک در کشت گندم ۵۳۳
نادر کریمی- سیدحسن طباطبائی - محمدحسن رحیمیان- سیدعلیرضا اسمعیل زاده حسینی

پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی و تعیین مناطق حساس برای رشد مرکبات و برنج در مازندران ۵۴۷
رامین فضل‌اولی- هدیه پوریزدان‌خواه

ارزیابی و تغییرپذیری سیل‌محورِ سلامتِ حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز از سازه‌های آبخیزداری ۵۶۳
سیدحمیدرضا صادقی- محمد طاوسی - سمیه زارع- وحید بیرانوندی- هنگامه شکوهیده- فاطمه اکبری امام‌زاده- مرجان بهلکه- فائزه خورشید سخن‌گوی- رضا چمنی

ذخیره کربن و برخی خصوصیات شیمیایی خاک در آرامگاه‌های جنگلی و گلاجارهای جنگل‌های زاگرس شمالی ۵۸۱
نیلوفر کوشا- کیومرث محمدی سمانی- وحید حسینی

مقایسه فعالیت زیستی خاک در جنگل با درختان سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در منطقه بیستون کرمانشاه ۵۹۵
سحر مهرنوش- علی بهشتی آل آقا - فاطمه رخش- مرتضی پوررضا- علی اکبر صفری سنجانی

کاربرد مدل RothC در شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیمی بر انتشار کربن دی‌اکسید و ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه‌خشک خراسان رضوی..... ۶۱۳
صبا باقریفام- محمد امیر دلاور- پیمان کشاورز- پرویز کرمی

ارزیابی مدل WetSpass-M در برآورد پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییراقلیم سال‌های آتی ۶۳۱
سپیده دولت آبادی- مهدی امیرآبادی زاده- مهدی زارعی

مجله آب و خاک جلد ۳۶ شماره ۵ سال ۱۴۰۱
Journal of Water and Soil Vol.36 No.5 2022

Contents

Effects of Lateral Spacing in Tape Irrigation System on Salinity Distribution in Soil Profile under Wheat Cultivation 531
N. Karimi, S.H. Tabatabaei, M.H. Rahimian, S.A. Esmaeilzadeh-Hosseini

Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran 545
R. Fazloula, H. Pouryazdankhah

Evaluation and Variability of Flood-Oriented Health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from Watershed Management Structures 561
S.H.R. Sadeghi, M. Tavosi, S. Zare, V. Beiranvandi, H. Shekohideh, F. Akbari Imamzadeh, M. Bahlekeh, F. Khurshid Sokhangouy, R. Chamani

Carbon Stock and Some Chemical Properties of Soil in Sacred Groves and Pollarded Forest Stands of Northern Zagros Forests..... 579
N. Koosha, K. Mohammadi-Samani, V. Hosseini

Comparison of Soil Biological Activity in Forest with Coniferous and Broadleaf Trees in Biston Region of Kermanshah 593
S. Mehrnoosh, A. Beheshti Ale Agha, F. Rakhsh, M. Pourreza, A.A. Safari Sinegani

Application of the RothC Model in Simulating Effect of Climate Change on CO_2 Emissions and Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Climate of Khorasan-e-Razavi 611
S. Bagherifam, M.A. Delavar, P. Keshavarz, P. Karami

Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years 629
S. Dowlatabadi, M. Amirabadizadeh, M. Zarei

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه 21/2015 مورخه1368/4/11 و درجه علمی- پژوهشی شماره 26524 تاریخ 1373/10/19 از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد36 شماره 5 آذر- دی سال 1401

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)

سردبیر: 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)
تقوائیان، 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 ومهندسی 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. 1163-91775 - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

تاثیر فاصله لوله‌های آبده سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری (Tape) بر توزیع شوری در پروفیل خاک در کشت گندم 533

نادر کریمی - سیدحسن طباطبائی - محمدحسن رحیمیان - سیدعلیرضا اسمعیل زاده حسینی

پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی و تعیین مناطق حساس برای رشد مرکبات و برنج در مازندران 547

رامین فضل‌اولی - هدیه پوریزدان‌خواه

ارزیابی و تغییرپذیری سیل‌محورِ سلامتِ حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز از سازه‌های آبخیزداری 563

سیدحمیدرضا صادقی - محمد طاوسی - سمیه زارع - وحید بیرانوندی - هنگامه شکوهیده - فاطمه اکبری امام‌زاده - مرجان بهلکه - فائزه خورشید سخن‌گوی - رضا چمنی

ذخیره کربن و برخی خصوصیات شیمیایی خاک در آرامگاه‌های جنگلی و گلاجارهای جنگل‌های زاگرس شمالی 581

نیلوفر کوشا - کیومرث محمدی سمانی - وحید حسینی

مقایسه فعالیت زیستی خاک در جنگل با درختان سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در منطقه بیستون کرمانشاه 595

سحر مهرنوش - علی بهشتی آل آقا - فاطمه رخش - مرتضی پوررضا - علی اکبر صفری سنجانی

کاربرد مدل RothC در شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیمی بر انتشار کربن دی‌اکسید و ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه‌خشک خراسان رضوی 613

صبا باقریفام - محمد امیر دلاور - پیمان کشاورز - پرویز کرمی

ارزیابی مدل WetSpass-M در برآورد پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییراقلیم سال‌های آتی 631

سپیده دولت آبادی - مهدی امیرآبادی زاده - مهدی زارعی

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 531-544

Effects of Lateral Spacing in Tape Irrigation System on Salinity Distribution in Soil Profile under Wheat Cultivation

N. Karimi[1], S.H. Tabatabaei[2*], M.H. Rahimian[3], S.A. Esmaeilzadeh-Hosseini[4]

Received: 19-06-2022
Revised: 27-09-2022
Accepted: 15-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Karimi, N., Tabatabaei, S.H., Rahimian, M.H., & Esmaeilzadeh-Hosseini, S.A. (2022). Effects of Lateral Spacing in Tape Irrigation System on Salinity Distribution in Soil Profile under Wheat Cultivation. *Journal of Water and Soil 36*(5): 531-544. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.77125.1174

Introduction

In arid and semi-arid regions, agricultural sustainability needs to improve the consumption of water and soil resources. Low rainfall, high evaporation, low water quality and less leaching of solutes in the soil due to limited water resources are the main problems in these areas. The quality of water and soil resources in the provinces of Fars, Khuzestan, Yazd, Golestan and Khorasan also shows that most of the wheat farming lands in these provinces are always facing salinity issues. According to the conducted studies, saline water can be successfully used in irrigation, but application of unconventional water by surface irrigation systems with low efficiency due to evaporation and high water salts leads to soil salinity. Micro-irrigation methods increase water use efficiency by reducing water consumption and increasing yield, so that drip irrigation efficiency of 91-80% and irrigation levels of 50-73% have been reported. In recent years, the use of drip irrigation system (such as tape on wheat fields) has been recommended to farmers as a water management solution. Micro-irrigation systems by reducing water consumption and increasing yields, improve water use efficiency. Drip tape irrigation system compared to other surface and sprinkler irrigation methods, due to short irrigation periods and reduction of evaporation losses and deep infiltration even for crops can be proposed as an alternative. Drip tape irrigation in wheat cultivation can increase water use efficiency up to 2 times. Also, in irrigation with salt water, while maintaining humidity in the environment, it reduces salinity stress and by consuming less water and reducing the amount of wetting, it introduces less solutes into the soil. This method has limitations in wheat fields due to costs and also the possibility of soil salinity problems, some of which can be overcome by increasing the distance between the laterals and reducing the consumption of drip irrigation (Tape) per unit area.

Materials and Methods

In this study, during the 2020-2021 at the Salinity Research Center of Yazd Province (Iran), the effect of lateral distances on the surface and depth distribution of soil salinity was investigated. For this purpose, two irrigation water salinity treatments, including 3 and 8 dS / m and two flood (T1) and drip irrigation systems (Tape) with lateral distances of 60 (T2), 100 (T3) and 140 (T4) cm were considered. Irrigation management treatments included the use of the flooding method (as the dominant method in wheat fields) and the use of the Tape drip

1 and 2- Ph.D Student and Associate Professor Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: tabatabaei@sku.ac.ir)
3- Research Assistant Professor, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), National Salinity Research Center (NSRC), Yazd, Iran
4- Research Assistant Professor, Yazd Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Yazd, Iran

irrigation method (as the proposed method with very low water consumption). A distance of 60 cm was considered as the optimal distance with complete water overlap, a distance of 100 cm was considered as an economic distance with the possibility of deep moisture distribution and a distance of 140 cm was considered as a large lateral distance. To investigate the salinity distribution and the accumulation of salts in the soil, regular soil sampling of different treatments was the end of the season.

Results and Discussion

In all irrigation treatments (saline and non-saline), despite the constant volume of water consumption per unit area of all treatments, in T3 and T4 treatments, irrigation depth increased compared to T2 treatment and reduced soil salinity in the wetting area (irrigated area). By increasing the horizontal distance of each point of the field from the lateral, the irrigation depth and leaching fraction decrease and consequently, the soil salinity of these points can also increase. Under non-saline irrigation conditions (salinity of 3 dS/m), soil salinity at intervals of zero (below the lateral), 15 and 30 cm, between 5.5 and 6.1 dS/m has been observed. Values below the threshold of tolerance to salinity of wheat plant and, in this regard, does not pose a risk to the plant. At a distance of 45, 60 and 70 cm from the water pipe, the salinity of the soil is higher than the threshold and if there is a plant in this area of the field, it will face serious damage.

Conclusion

The results showed that although the Tape method in saline conditions (8 dS/m) compared to non-saline conditions (3 dS/m) leads to higher accumulation of solutes in the soil and increases the possibility of plant damage, but according to the final results of this study, by increasing the distances of irrigation laterals and proportionally increasing the depth of irrigation and keeping the salts away from the planting bed, a more suitable environment for plant growth can be prepared and higher economic benefits of this measure can be obtained. Also, in terms of controlling soil salinity, the conditions have been such that treatment with lateral distance of 140 cm compared to treatments of 60 and 100 cm has led to lower amounts of soil salinity in the subsurface and has provided better conditions for the plant. Thus, by increasing the distances of laterals from 60 to 140 cm and, consequently, increasing the depth of irrigation, it was possible to transfer solutes to lower depths of the soil.

Keywords: Lateral, Saline water, Solute accumulation, Soil salinity

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۵۴۴-۵۳۱

تاثیر فاصله لوله‌های آبده سیستم آبیاری قطره‌ای- نواری (Tape) بر توزیع شوری در پروفیل خاک در کشت گندم

نادر کریمی[۱]- سیدحسن طباطبائی[۲*]- محمدحسن رحیمیان[۳]- سیدعلیرضا اسمعیل زاده حسینی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای- نواری (نظیر Tape در مزارع گندم) به‌عنوان یک راهکار مدیریت آب در مزرعه به کشاورزان توصیه شده است. این روش در مزارع گندم به دلیل هزینه‌ها و همچنین احتمال بروز مشکلات شوری خاک، دارای محدودیت‌هایی است که بخشی از این موارد می‌تواند از طریق افزایش فاصله لوله‌های آبده و کاهش مصرف نوارهای آبیاری در واحد سطح مرتفع شود. در این پژوهش که طی سال زراعی ۱۳۹۹-۱۴۰۰ و در استان یزد انجام شد، تأثیر فاصله لوله‌های آبده (لترال) بر توزیع سطحی و عمقی شوری خاک مورد بررسی قرار گرفت. برای این هدف، دو تیمار شوری آب آبیاری شامل ۳ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر و دو سیستم آبیاری غرقابی و قطره‌ای- نواری با فواصل لترال ۶۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر مد نظر قرار گرفتند. نتایج نشان داد که اگرچه روش قطره‌ای - نواری در شرایط شور (۸ دسی‌زیمنس بر متر) نسبت به شرایط غیر شور (۳ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به تجمع بیشتر املاح در خاک شده و احتمال بروز خسارت به گیاه را تشدید می‌کند، اما نتایج نهایی این پژوهش حاکی از آن بود که با افزایش فواصل لترال‌های آبیاری و به تناسب آن افزایش عمق آبیاری و دور نگه‌داشتن املاح از بستر کاشت، می‌توان محیط مناسب‌تری را برای رشد گیاه آماده کرد و از مزایای اقتصادی این اقدام نیز بهره برد. همچنین، از نظر کنترل شوری اعماق خاک نیز شرایط به گونه‌ای بوده است که تیمار با فاصله لترال ۱۴۰ سانتی‌متر نسبت به تیمارهای ۶۰ و۱۰۰سانتی‌متر منجر به مقادیر کمتر شوری خاک در لایه‌های زیرین گردیده و شرایط بهتری را برای گیاه فراهم کرده است. به‌طوری‌که با افزایش فواصل لترال‌ها از ۶۰ به ۱۴۰ سانتی‌متر و به تبع آن، افزایش عمق آبیاری‌ها، امکان انتقال املاح به اعماق پایین‌تر خاک نیز فراهم شد.

واژه‌های کلیدی: آب شور، تجمع املاح، شوری خاک، لوله آبده (لترال)

مقدمه

پایداری کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیاز به بهره‌وری مناسب از منابع آب و حفاظت بیشتر از منابع خاک دارد. بارندگی اندک، تبخیر زیاد، کیفیت پایین آب و آبشویی کمتر املاح در خاک به‌دلیل محدودیت منابع آب، از مسائل اصلی این مناطق است (Abbasi *et al.*, 2015). حتی به دلیل محدودیت منابع آبی در بسیاری از این مناطق بهره‌گیری از منابع آب‌های شور و یا با کیفیت پایین نه‌تنها به‌عنوان یک انتخاب، بلکه به‌عنوان یک الزام پیش روی کشاورزان قرار گرفته است (Diaz *et al.*, 2018). بررسی کیفیت منابع آب و خاک کشور در استان‌های تحت کشت گندم نظیر فارس، خوزستان، یزد، گلستان و خراسان نیز نشان می‌دهد که اکثر اراضی گندمکاری در این استان‌ها همواره با درجات مختلفی از مسائل شوری مواجه می‌باشد. هرچند در مطالعات مختلفی نشان داده شده است که

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: tabatabaei@sku.ac.ir)
۳- استادیار پژوهشی، مرکز ملی تحقیقات شوری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
۴- استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات گیاه‌پزشکی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان یزد، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، یزد، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.77125.1174

از آب شور می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی در آبیاری گیاهان استفاده کرد (Rahimian, 2016)، اما بهره‌گیری از آب‌های نامتعارف توسط سیستم‌های آبیاری سطحی با راندمان پایین به دلیل املاح زیاد آب و تبخیر زیاد، شوری خاک را در پی خواهند داشت (Li *et al*., 2015). روش‌های نوین آبیاری با کاهش مصرف آب و افزایش عملکرد باعث افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد، به‌گونه‌ای که راندمان آبیاری قطره‌ای ۸۰-۹۱ درصد و آبیاری سطحی ۵۰-۷۳ درصد گزارش شده است (Akhavan, 2015). در این میان سیستم آبیاری قطره‌ای - نواری در مقایسه با سایر روش‌های آبیاری سطحی و بارانی علاوه بر بهره‌وری بیشتر آب (Tarighi and Maleki, 2017) نسبت به آبیاری سطحی، به دلیل دور آبیاری کوتاه و کاهش تلفات تبخیر و نفوذ عمقی حتی برای کشت‌های زراعی به‌عنوان جایگزین پیشنهاد می‌گردد (Gharahdaghi *et al*., 2019). همچنین در آبیاری با آب شور، ضمن نگه‌داشتن رطوبت در محیط ریشه باعث کاهش تنش شوری شده و با مصرف آب کمتر و کاهش سطح خیس‌شدگی، میزان املاح کمتری را به خاک وارد کرده و از تبخیر سطح خاک می‌کاهد(Khoshsimay-Chenar and Noory, 2019). آبیاری قطره‌ای به دلیل دبی ورودی کم و تناوب زیاد، قادر است پتانسیل ماتریک خاک در منطقه ریشه گیاه را بالا نگه‌داشته و از کاهش پتانسیل اسمزی خاک در اثر خشک شدن تدریجی خاک در شرایط شور جلوگیری نماید و به همین دلیل نسبت به روش‌های دیگر سودمندی بیشتری در هنگام استفاده از آب شور را دارد (Mirzaei-Alamouti *et al*., 2020). در آبیاری قطره‌ای الگوی توزیع نمک در اطراف قطره‌چکان برعکس الگوی توزیع رطوبت است. به‌گونه‌ای که با تغییر فواصل لترال‌ها و قطره‌چکان‌ها، میزان آب آبیاری و سطوح مرطوب و خشک قابل مدیریت و کنترل می‌باشد(Tabatabaei and Mousavi, 2017). بنابراین کاربرد روش‌های نوین آبیاری و مدیریت مناسب آن‌ها می‌تواند نقش مهمی را در بهبود وضعیت خاک، ارتقاء بهره‌وری اراضی کشاورزی و رشد گیاه ایفا کند (Malash *et al*., 2005).

چن و همکاران (Chen *et al*., 2015) در آزمایشی که در چین انجام دادند، اثر سه فاصله ۳۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی‌متر لترال‌ها و حجم آب ۳۰۰۰، ۴۵۰۰، ۶۰۰۰ و ۷۵۰۰ متر مکعب در هکتار آب مصرفی را با دور آبیاری ۱۰ روز بر خصوصیات زراعی گندم در دو سال زراعی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد با افزایش فاصله لترال‌ها در آبیاری قطره‌ای مقدار عملکرد کاهش می‌یابد. بالاترین عملکرد از فاصله نوار ۶۰ سانتی‌متر با حجم آب ۶۰۰۰ مترمکعب در هکتار به‌دست آمد و بالاترین صرفه‌جویی آب را در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشت. برای بررسی عمق مناسب آبیاری و فاصله مناسب تیپ در کشت بهاره گندم پژوهشی با سه فاصله تیپ ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر و سه عمق آبیاری ۳۵، ۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان عملکرد محصول به میزان ۸۹۶۴ کیلوگرم در هکتار مربوط به فاصله تیپ ۶۰ سانتی‌متر و عمق آب آبیاری ۴۵ سانتی‌متر بود. زمانی که فاصله تیپ ۶۰ یا ۹۰ سانتی‌متر گردید، با افزایش عمق آب آبیاری از ۳۵ به ۴۵ میلی‌متر میزان عملکرد به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. میزان تغییر کارایی مصرف آب از ۱/۵۷ تا ۲/۱۱ کیلوگرم بر متر مکعب تعیین شد و بیشترین میزان آن مربوط به تیمار فاصله ۹۰ سانتی‌متر و عمق آب آبیاری ۴۵ میلی‌متر بود. آن‌ها در نهایت فاصله تیپ ۹۰ سانتی‌متر و عمق ۴۵ میلی‌متر را در این منطقه سفارش کردند (Zhao *et al*., 2016).

محققان در پژوهشی اثر سیستم‌های قطره‌ای و سطحی را بر روی زراعت گندم بررسی کرده و میزان بهره‌وری مصرف آب را در قطره‌ای به میزان ۲/۵۷ و در آبیاری سطحی ۱/۳۸ کیلوگرم بر مترمکعب آب تعیین کردند. بنابر نتایج هرچند از نظر اقتصادی تیمار آبیاری سطحی برتری پیدا کرد، اما تیمار آبیاری قطره‌ای علاوه بر داشتن توجیه اقتصادی، به مراتب آب کمتری مصرف کرده است. همچنین در بین تیمارهای قطره‌ای، تیمار با فاصله بین نوار آبیاری برابر با ۰/۷ متر برترین تیمار تشخیص داده شد (Torknezhad *et al*., 2006). در مطالعه انجام شده در مشهد و تربت‌حیدریه، فاصله نوارهای آبیاری ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ سانتی‌متر در تعیین بهره‌وری آب در کشت گندم با روش آبیاری قطره‌ای تیپ مورد استفاده قرار گرفت. هرچند تیمار فاصله نوار آبیاری ۵۰ سانتی‌متر و آبیاری کامل بهترین عملکرد را در بر داشت، اما از لحاظ بهره‌وری مصرف آب با تیمارهای دیگر مشابه بود. نتایج نشان داد که در شرایط آبیاری کامل با افزایش فاصله نوار تا ۷۵ سانتی‌متر در کشت گندم، کاهش عملکرد و بهره‌وری چشمگیر نیست. اما با کاهش مقدار آب آبیاری و هم‌زمان افزایش فاصله نوار عملکرد کاهش زیادی دارد (Afshar *et al*., 2020).

برای مقابله با کمبود آب در منطقه شین چیانگ چین، آبیاری قطره‌ای - نواری در کشت گندم موفق عمل کرده اما، استفاده به روش‌های مرسوم (یک نوار آبیاری به ازای ۴ ردیف کاشت با فاصله ۱۵ سانتی‌متر) هزینه‌بر می‌باشد. بنابراین طرحی با تیمارهای ۴، ۵ و ۶ ردیف کاشت با فاصله ۱۵ سانتی‌متر به ازای هر ردیف نوار تیپ اجرا گردید. با افزایش تعداد ردیف عملکرد کاهش آشکار داشت، اما نسبت کاهش عملکرد به کاهش مصرف آب به‌تناسب کمتر بوده است. نتایج نشان داد که می‌توان برای روش‌های جدید آبیاری، الگوهای جدید کشت و آرایش‌های متفاوتی را در نظر گرفت و هزینه‌ها را کاهش داد (Zhaoyan *et al*., 2019). پژوهش‌های انجام شده در دو دهه اخیر بر روی زراعت‌های ردیفی نشان داده است که آرایش کاشت‌های مرسوم در کشور بر اساس روش‌های آبیاری سطحی بوده است و با توجه به تغییر روش آبیاری، آرایش کاشت محصولات نیز بایستی تغییر پیدا کند (Ghadami-Firouzabadi *et al*., 2021). تغییر در فواصل لترال و متناسب با آن تغییر در آرایش کشت‌های ردیفی در جهت استفاده از پتانسیل شیوه‌های نوین آبیاری است که منافع اقتصادی را

نیز در پی دارد (Monjshirini *et al*., 2015). پژوهشی با ۴ آرایش کاشت و ۲ فاصله نوار آبیاری قطره‌ای تیپ ۶۰ و ۷۵ سانتی‌متر و یک تیمار آبیاری شیاری مرسوم در ایستگاه اکباتان همدان انجام گرفت. متوسط بهره‌وری مصرف آب در تیمارهای آبیاری قطره‌ای تیپ ۱/۷۳ کیلوگرم بر مترمکعب محاسبه شد. نتایج نشان داد که آبیاری قطره‌ای نواری نسبت به روش آبیاری جویچه‌ای، باعث افزایش ۷۳ درصدی بهره‌وری مصرف آب شده است. بیشترین میانگین دوساله عملکرد دانه مربوط به تیمار T1 با تعداد ۴ ردیف کاشت به فاصله ۱۵ سانتی‌متر در دو طرف نوار و فاصله نوارهای ۷۵سانتی‌متر به میزان ۷۴۴۳ کیلوگرم در هکتار تعیین شد و کمترین مربوط به تیمار آبیاری شیاری به میزان ۵۹۹۶ کیلوگرم در هکتار محاسبه گردید. لذا با توجه به شرایط بحرانی آب در کشور و در صورت استفاده از آبیاری قطره‌ای نواری در زراعت گندم، فاصله نوار تیپ ۷۵ سانتی‌متر با تعداد ۴ ردیف کشت با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر در اطراف هر نوار که بیشترین عملکرد و بهره‌وری مصرف آب را به خود اختصاص داده است، توصیه گردید (Ghadami-Firouzabadi and Baghani, 2019).

کاربرد آب‌های با کیفیت کم و بهره‌گیری از سیستم‌های آبیاری نواری Tape امکان تجمع نمک در سطح، نیمرخ خاک و فواصل بین ردیف‌های آبیاری را مهیا می‌سازد (Burt *et al*., 2003; Rahimian *et al*., 2016). استان یزد با شرایط آب و هوایی خشک و میزان بارندگی کم، در زمینه کشاورزی دارای شرایط بحرانی است. با توجه به پژوهش‌های مذکور، میزان حجم آب آبیاری و نحوه جریان و نفوذ آب در سطح و عمق خاک از عوامل موثر بر تجمع و تحرک شوری در پروفیل خاک می‌باشد. بنابراین تغییرات در حجم و عمق آبیاری با توجه به سیستم کشت و شیوه آبیاری قابل بررسی است.

نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که در سیستم‌های آبیاری نواری Tape یکی از مواردی که می‌تواند به افزایش کارایی این سیستم‌ها کمک کند، تغییر و افزایش فاصله Tape و بالطبع تراکم کشت در جهت بهره‌وری بهتر و کاهش هزینه‌های اجرای سیستم آبیاری و صرفه اقتصادی می‌باشد. در این خصوص پژوهش‌هایی در جهت بررسی تغییرات شوری پروفیل خاک بر اساس نتایج مدل‌ها انجام شده است (Ramezani-Gharahdaghi *et al*., 2016; Kangkang *et al*., 2017; Etedali *et al*., 2018)، اما هدف از این پژوهش بررسی تاثیر سیستم‌های آبیاری سطحی و Tape بر روی شوری خاک و تعیین تاثیر تغییر در فواصل نوارهای سیستم آبیاری Tape بر روی توزیع املاح در خاک در شرایط مزرعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

سطح قابل توجهی از کشت‌های گلخانه‌ای و کشت‌های باغی استان یزد تحت سیستم‌های نوین آبیاری قرار گرفته است. بهره‌وری و کاهش مصرف آب به‌دلیل محدودیت منابع آب، باعث شده در کشت‌های زراعی نیز از سیستم‌های نوین آبیاری استفاده گردد. رویکرد بهره‌گیری از این سیستم و مسائل مرتبط با آن باعث شد این پژوهش به مدت یک سال زراعی (۱۴۰۰-۱۳۹۹) و در زمینی به مساحت تقریبی ۲۰۰۰ متر مربع در مزرعه تحقیقات شوری صدوق، وابسته به مرکز ملی تحقیقات شوری در استان یزد انجام گیرد. خاک این مزرعه دارای بافت لوم شنی بوده و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

این پژوهش دارای ۲۴ کرت آزمایشی، هر یک با ابعاد ۶*۹ متر، بوده و تیمارهای مد نظر (شامل شوری آب آبیاری و مدیریت آبیاری) به‌صورت طرح آزمایشی اسپلیت فاکتوریل و با سه تکرار و در سه بلوک (به‌عنوان تکرارهای آزمایش) در آن‌ها اجرا شده است. گیاه کاشت شده، گندم (رقم نارین) می‌باشد. تیمارهای شوری آب آبیاری شامل دو سطح ۳ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر بوده که با استفاده از استخرهای موجود در مزرعه و اختلاط آب شور و غیرشور موجود در محل، تهیه گردیده و برای آبیاری، مورد استفاده قرار گرفتند (جدول ۲). لازم به ذکر است که به‌منظور بررسی تأثیر تیمارهای مختلف (شوری آب آبیاری و مدیریت آبیاری) بر نحوه تجمع و انتقال نمک در خاک، کلیه کرت‌ها قبل از کاشت و شروع آزمایش، آبشویی گردیدند تا شوری خاک مزرعه به یکنواختی لازم برسد.

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد آزمایش

Table 1- Some physicochemical properties of the soil at experiment site

عمق خاک Depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت Texture	هدایت الکتریکی EC	pH	پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	مواد آلی OM
cm	٪	٪	٪	-	dS/m		mg/kg		٪	٪
0-80	56.4	25	18.6	S.L	3.9	7.6	150	8.2	0.02	0.36

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی تیمارهای مختلف شوری آب آبیاری در این پژوهش

Table 2- Chemical P of different irrigation water salinity treatments in this study

آب آبیاری Water	هدایت الکتریکی EC	pH	نسبت جذب سدیم SAR	سولفات SO_4^{2-}	کلر Cl^-	بیکربنات HCO_3^-	کربنات CO_3^{2-}	سدیم Na^+	منیزیم Mg^{2+}	کلسیم Ca^{2+}
	dS/m			meq/L						
1	3.0	8.39	7.94	4.55	22.78	1.53	0.17	18.35	5.99	4.7
2	8.0	8.23	16.32	9.17	67.24	1.83	0	55.29	15.24	7.72

تیمارهای مدیریت آبیاری، شامل استفاده از روش غرقابی (به‌عنوان روش غالب در مزارع گندم) و استفاده از روش قطره‌ای Tape (به‌عنوان روش پیشنهادی با مصرف آب بسیار کم) بودند. در مورد تیمارهای آبیاری قطره‌ای، فواصل مختلف لترال‌های آبیاری نیز مد نظر بودند که بر مبنای فواصل بهینه و اقتصادی لترال‌ها از همدیگر انتخاب گردیدند. این فواصل شامل ۶۰ ، ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر بودند. بنا بر نتایج پژوهش‌های پیشین، فاصله ۶۰ سانتی‌متر به‌عنوان فاصله بهینه با همپوشانی کامل آب (Ghadami-Firouzabadi *et al.*, 2021)، فاصله ۱۰۰ سانتی‌متر به‌عنوان فاصله اقتصادی با امکان توزیع عمقی رطوبت و فاصله ۱۴۰ سانتی‌متر به‌عنوان فاصله بزرگ لترال در نظر گرفته شد. تغییرات فواصل نوارهای Tape از یکدیگر (به‌عنوان عامل مؤثر بر هزینه و ایجاد سطوح مرطوب در ناحیه کشت و خشک در فواصل نکاشت) و تغییرات تراکم کاشت گندم از طریق کاهش فواصل خط کشت و ایجاد فاصله نکاشت ایجاد و اعمال گردید (شکل ۱). بنابراین، در مجموع شش کرت برای روش غرقابی و ۱۸ کرت برای روش Tape و با خصوصیات فوق‌الذکر در نظر گرفته شد که پس از نصب تجهیزات مربوطه (شامل ایستگاه پمپاژ، فیلتراسیون، لوله‌های اصلی، مانیفولد، شیرفلکه، کنتور حجمی و همچنین نوارهای Tape با آبدهی ۱۰ لیتر بر ساعت در متر)، امکان آبیاری نواری در هر یک از کرت‌های مد نظر فراهم شد. لازم به ذکر است که بذور گندم به‌صورت خطی و با تراکم ۵۰۰ بوته برمتر مربع کاشت گردیده‌اند.

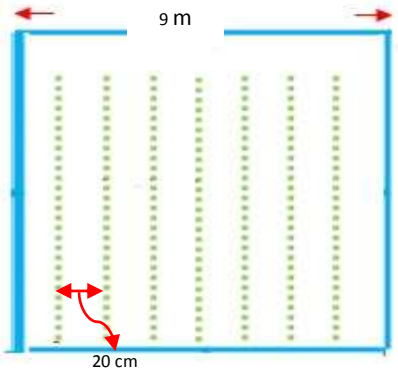
حجم آب مورد نیاز مزرعه بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی اتوماتیک منصوب در محل برآورد شد. این مرحله از تحقیق شامل برآورد تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) به روش فائو پنمن مانتیث، محاسبه تبخیر و تعرق گندم (ET_c) با در نظر گرفتن ضریب گیاهی فائو در مراحل مختلف رشد (K_c)، برآورد نیاز آبشویی (LR) بر اساس شوری آب آبیاری (EC_{iw}) و شوری مورد انتظار خاک (EC_e) و نهایتاً محاسبه عمق ناخالص آب مورد نیاز (I_g) بوده است (معادلات ۱ تا ۳).

$$ETc = Kc * ETo \quad (۱)$$

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (۲)$$

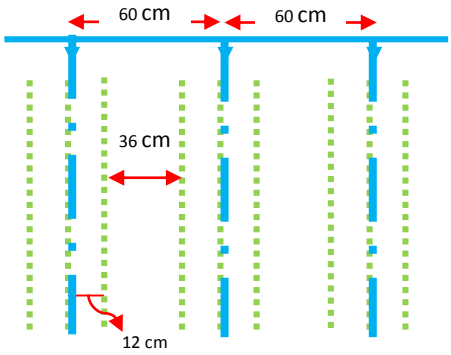
$$Ig = \frac{ETc}{1-LR} \quad (۳)$$

با توجه به اینکه، ممکن است تمام یا بخشی از نیاز آبشویی هر کرت از طریق تلفات نفوذ عمقی آب در حین عملیات آبیاری تأمین شود، بنابراین بایستی علاوه بر LR، راندمان کاربرد سیستم آبیاری (E_a) نیز در نظر گرفته شود و بین مقادیر (1-LR) و E_a، هرکدام که کمتر است، در مخرج کسر معادله فوق قرار گیرد. راندمان کاربرد آب معمولاً در روش‌های تیپ ۰/۹ و در روش‌های شیاری و غرقابی ۰/۵۲در نظر گرفته می‌شود (Ghaemi *et al.*, 2008). هرچند در این طرح ابعاد کرت‌ها و شیارهای آبیاری کوچک طراحی شده است، اما بازهم تلفات نفوذ عمقی در کاهش راندمان کاربرد آب مؤثر می‌باشد. بنابراین در این پژوهش با توجه به ابعاد کوچک کرت و سطح هر کرت به میزان ۵۴ مترمربع میزان راندمان بالاتر از سطح میانگین و به مقدار ۰/۷۵ در نظر گرفته خواهد شد. به‌منظور کنترل حجم آب ورودی به هر تیمار، از کنتورهای حجمی نصب‌شده برای هر تیمار استفاده خواهد شد. برای بررسی توزیع شوری و نحوه تجمع املاح در خاک، نمونه‌برداری‌های منظم خاک تیمارهای مختلف در طول دوره رشد گندم و در انتهای فصل انجام گرفت. تمامی نمونه‌برداری‌ها به‌صورت دو بعدی (عمقی و عرضی) و با کمک مته دستی انجام شدند. نمونه‌های عمقی خاک از چهار لایه مختلف (شامل ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ سانتی‌متر نسبت به سطح زمین) و نمونه‌های عرضی در فواصل ۱۵ سانتی‌متری از محل نوار Tape تا وسط فاصله بین دو نوار Tape برداشت شدند. با کمک این شیوه، شبکه‌ای از نمونه‌های خاک با فواصل منظم و یکنواخت ایجاد شد که تمام قسمت‌های مرطوب (پیاز رطوبتی در آبیاری Tape و سطحی) و خشک (فاصله نکاشت بین دو نوار Tape) مزرعه را در عرض و عمق پروفیل خاک در برمی‌گیرد. با توجه به تعداد زیاد نمونه‌های جمع‌آوری‌شده در این پژوهش و به‌منظور صرفه‌جوئی در زمان و هزینه‌ها، اقدام به تعیین هدایت الکتریکی نمونه‌های خاک به روش عصاره‌گیری با نسبت ۱:۵ شد که در منابع یکی از بهترین نسبت‌ها تعیین شده است (Etemadi *et al.*, 2018). سپس با کمک روابط مربوطه، مقادیر هدایت الکتریکی ۱:۵ به هدایت الکتریکی عصاره اشباع (ECe) تبدیل شدند (Khorsandi and Alaei, 2007). در نهایت، تغییرات دوبعدی شوری تجمع یافته خاک هر یک از تیمارها در انتهای فصل به کمک نرم‌افزار Surfer، ترسیم شدند.



الف- تیمار T1 (آبیاری غرقابی و آرایش کاشت مرسوم با فاصله بین ردیف ۲۰ سانتی‌متر

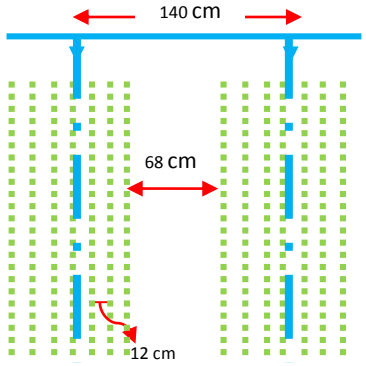
A- Treatment T1 (flood irrigation and conventional planting arrangement with a distance between rows of 20 cm



ب- تیمار T2 (آرایش کاشت سه ردیفه با فاصله بین ردیف ۱۲ سانتی‌متر و فاصله نکاشت ۳۶ سانتی‌متر و اجرای نوارهای تیپ با فواصل ۶۰ سانتی‌متر از همدیگر)

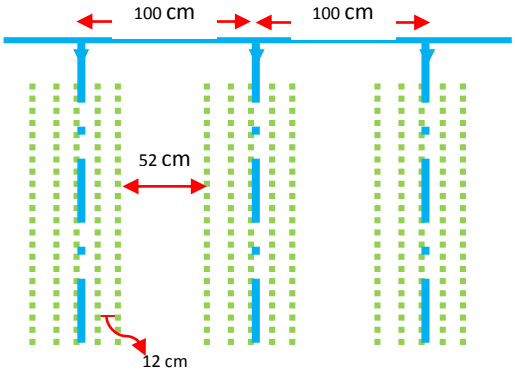
B- T2 treatment (three-row planting arrangement with a distance between rows of 12 cm and a distance of 36 cm without planting and laterals at intervals of 60 cm from each other)

Distance from dropper فاصله از قطره چکان



د- تیمار T4 (آرایش کاشت هفت ردیفه با فاصله بین ردیف ۱۲ سانتی‌متر و فاصله نکاشت ۶۸ سانتی‌متر و اجرای نوارهای تیپ با فواصل ۱۴۰ سانتیمتر از همدیگر)

D- T4 treatment (three-row planting arrangement with a distance between rows of 12 cm and a distance of 68 cm without planting and laterals at intervals of 140 cm from each other)



ج- تیمار T3 (آرایش کاشت پنج ردیفه با فاصله بین ردیف ۱۲ سانتی‌متر و فاصله نکاشت ۵۲ سانتی‌متر و اجرای نوارهای تیپ با فواصل ۱۰۰ سانتیمتر از همدیگر)

C- T3 treatment (three-row planting arrangement with a distance between rows of 12 cm and a distance of 52 cm without planting and laterals at intervals of 100 cm from each other)

شکل ۱- آرایش کاشت در تیمارهای مختلف

Figure 1- Planting arrangement in different treatments

این نرم‌افزار از طریق ترسیم خطوط هم‌مقدار و هم‌تراز به منظور رسم نقشه نقاط برداشت و شبکه‌بندی بر مبنای سطوح دو بعدی و سه بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تصاویر و نقشه‌های خروجی از آن به‌راحتی برای مقایسه و بررسی به‌کار گرفته می‌شود. همچنین، به‌وسیله نمودارها و جداول نتایج مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

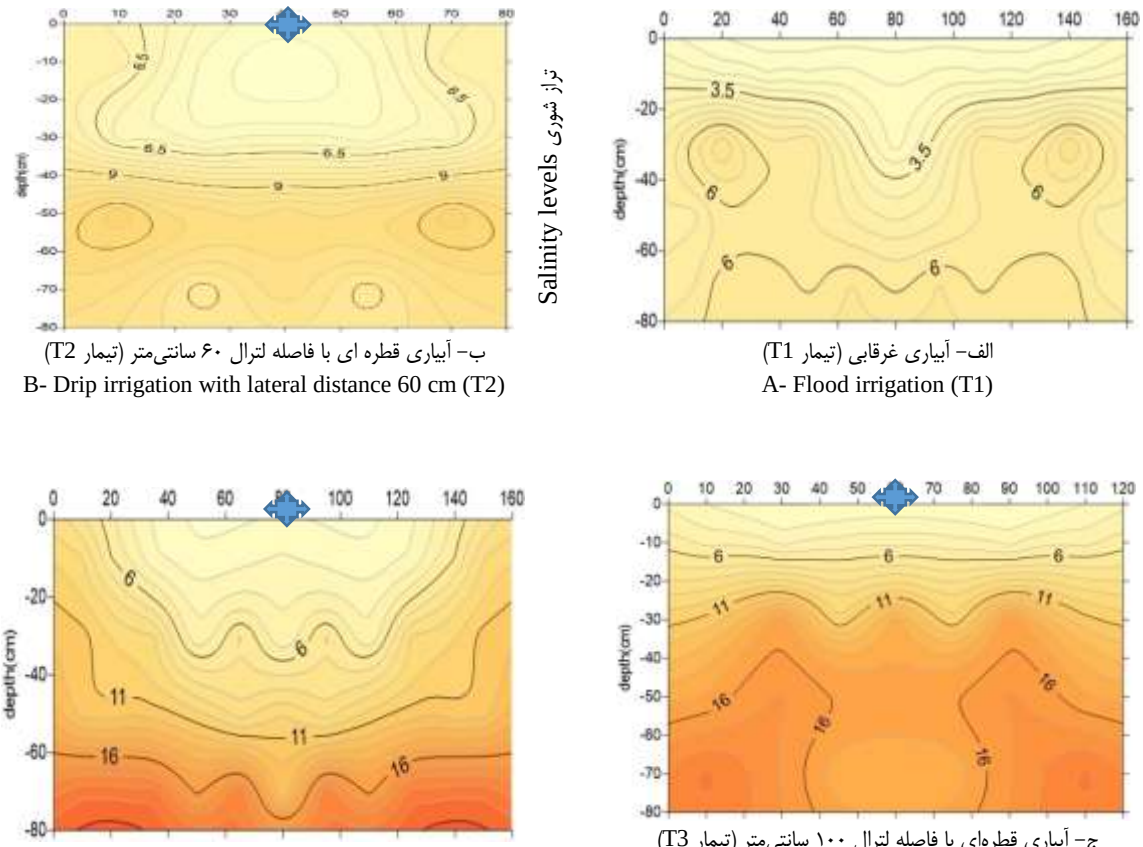
آبیاری با آب غیر شور (هدایت الکتریکی ۳ دسی‌زیمنس بر متر)

شکل ۲ توزیع شوری خاک ناحیه ریشه گندم در اثر آبیاری با آب غیر شور (هدایت الکتریکی ۳ دسی‌زیمنس بر متر) توسط دو سیستم آبیاری غرقابی و قطره‌ای با فواصل مختلف لترال از همدیگر را نشان

می‌دهد. یکنواختی پروفیل شوری خاک در تیمارهای آبیاری غرقابی و قطره‌ای با فاصله لترال ۶۰ سانتی‌متر (تیمارهای T1 و T2) یکی از مهم‌ترین نکات قابل‌توجه در مورد این شکل است. در مورد این دو تیمار، شرایط آبیاری به‌گونه‌ای بوده است که کنترل مناسب شوری خاک (هم در سطح و هم در عمق خاک) اتفاق افتاده است. با توجه به اینکه در این روش غرقابی، کسر آبشویی عمدتاً بالا است، احتمال کمتر شدن شوری عصاره اشباع خاک (ECe) از شوری آب آبیاری (EC_{iw}) وجود دارد. بر اساس منابع علمی و تحقیقاتی موجود، درصورتی‌که کسر آبشویی بیشتر از ۳۰ درصد باشد، شوری عصاره اشباع خاک از شوری آب آبیاری کمتر خواهد بود (Ayers and Westcott, 1989). در مورد تیمارهای T3 و T4 که مربوط به آبیاری قطره‌ای با فواصل ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر از همدیگر می‌باشند (شکل‌های ۲-ج و ۲-د) و با توجه به موقعیت قرارگیری گسیلنده، با افزایش عمقی و عرضی فاصله نسبت به محل گسیلنده و حرکت به سمت حاشیه پیاز رطوبتی، افزایش شوری خاک نیز مشهود است.

آبیاری با آب شور (هدایت الکتریکی ۸ دسی‌زیمنس بر متر)

شکل ۳ توزیع شوری خاک ناحیه ریشه گندم در اثر آبیاری با آب شور (هدایت الکتریکی ۸ دسی‌زیمنس بر متر) توسط دو سیستم آبیاری غرقابی و قطره‌ای با فواصل مختلف لترال از همدیگر را نشان می‌دهد. در مورد تیمارهای T2، T3 و T4 که مربوط به آبیاری قطره‌ای با فواصل ۶۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ سانتی‌متر از همدیگر (شکل‌های ۳-ب، ۳-ج و ۳-د) و با توجه به موقعیت قرارگیری گسیلنده، با افزایش عمقی و عرضی فاصله نسبت به محل گسیلنده و حرکت به سمت حاشیه پیاز رطوبتی، افزایش شوری خاک نیز کاملاً مشهود است. اما در مورد تیمار آبیاری غرقابی (تیمار T1)، شرایط آبیاری به‌گونه‌ای بوده است که کنترل مناسب شوری خاک (هم در سطح و هم در عمق خاک) اتفاق افتاده است و یکنواختی پروفیل شوری خاک مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه در روش غرقابی، کسر آبشویی عمدتاً بالا است، احتمال کمتر شدن شوری عصاره اشباع خاک (ECe) از شوری آب آبیاری (EC_{iw}) وجود دارد (Ayers and Westcott, 1989).



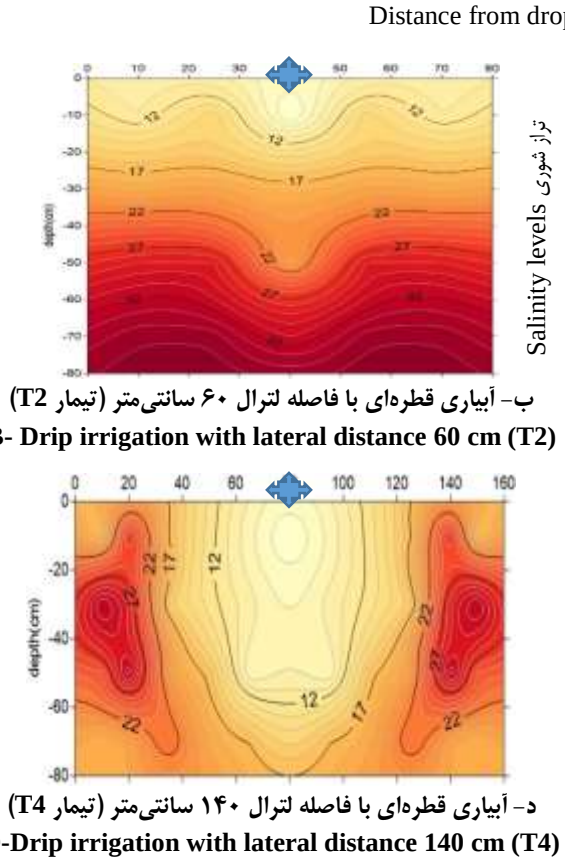
الف- آبیاری غرقابی (تیمار T1)
A- Flood irrigation (T1)

ب- آبیاری قطره ای با فاصله لترال ۶۰ سانتی‌متر (تیمار T2)
B- Drip irrigation with lateral distance 60 cm (T2)

ج- آبیاری قطره‌ای با فاصله لترال ۱۰۰ سانتی‌متر (تیمار T3)
C-Drip irrigation with lateral distance 100 cm (T3)

د- آبیاری قطره‌ای با فاصله لترال ۱۴۰ سانتی‌متر (تیمار T4)
D-Drip irrigation with lateral distance 140 cm (T4)

شکل ۲- توزیع شوری خاک ناحیه ریشه گندم در اثر آبیاری با آب غیر شور (هدایت الکتریکی ۳ دسی‌زیمنس بر متر)
Figure 2- Salinity distribution of wheat root soil irrigated with non-saline water (EC 3 dS/m)



الف- آبیاری غرقابی (تیمار T1)
A- Flood irrigation (T1)

ب- آبیاری قطره‌ای با فاصله لترال ۶۰ سانتی‌متر (تیمار T2)
B- Drip irrigation with lateral distance 60 cm (T2)

ج- آبیاری قطره‌ای با فاصله لترال ۱۰۰ سانتی‌متر (تیمار T4)
C-Drip irrigation with lateral distance 100 cm (T3)

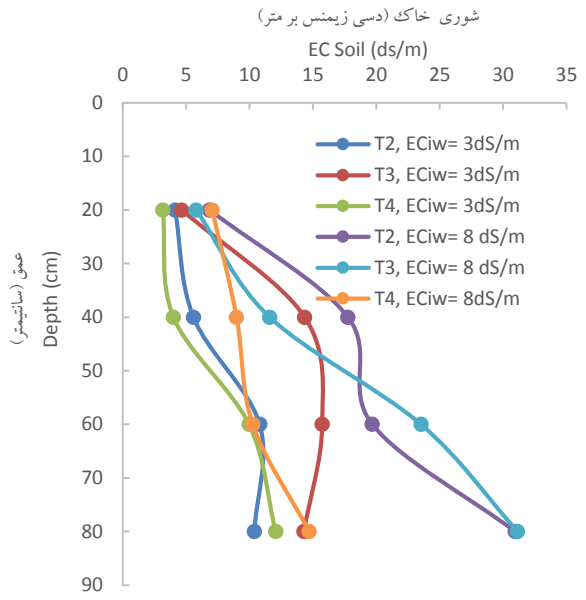
د- آبیاری قطره‌ای با فاصله لترال ۱۴۰ سانتی‌متر (تیمار T4)
D-Drip irrigation with lateral distance 140 cm (T4)

شکل ۳- توزیع شوری خاک ناحیه ریشه گندم در اثر آبیاری با آب شور (هدایت الکتریکی دسی‌زیمنس بر متر)

Figure 3- Salinity distribution of wheat root soil irrigated with saline water (EC 3 dS/m)

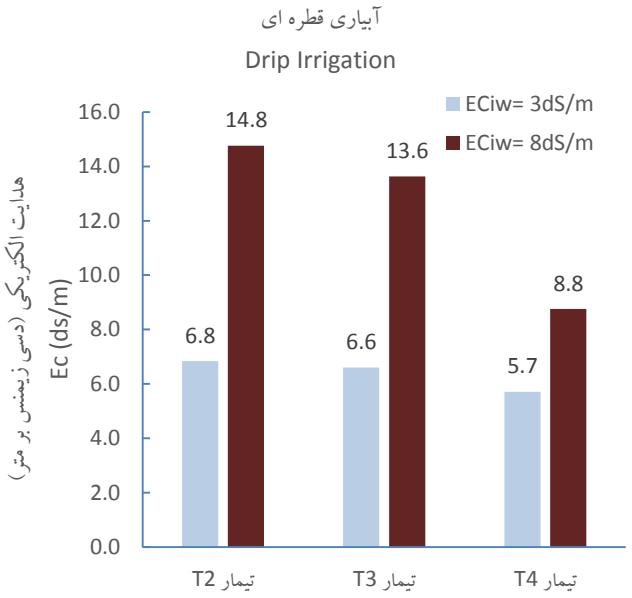
در شرایط آبیاری با آب غیر شور با توجه به اینکه حجم آب آبیاری وارد شده به کرت‌ها در تیمارهای مختلف آبیاری قطره‌ای (T2 تا T4) یکسان بوده است، لذا مدت‌زمان انجام آبیاری‌ها با افزایش فاصله لترال‌ها، بیشتر در نظر گرفته شده است. زیرا هدف از این مطالعه کاهش مقدار آب مصرفی نیست، بلکه کاهش میزان تعداد لترال با توجه به افزایش فواصل لترال می‌باشد. بنابراین با توجه به کاهش تعداد لترال نسبت به سطح، می‌بایست زمان آبیاری افزایش پیدا کرده تا حجم آب آبیاری در همه تیمارها یکسان گردد. به‌طوری‌که هر نوبت آبیاری در تیمار T2 حدود ۳/۵ ساعت به طول انجامید، اما در مورد تیمارهای T3 و T4 این زمان به ترتیب حدود ۵ و ۶ ساعت بوده است. از طرفی دیگر، پیشروی جبهه رطوبتی خاک در طرفین لترال‌های آبیاری عمدتاً تابع شرایط خاک بوده و در همه تیمارها مقدار نسبتاً ثابتی مشاهده شده است (بین ۳۰ تا ۳۵ سانتی‌متر از طرفین لوله آبده). بنابراین، با وجود ثابت ماندن حجم آب مصرفی در واحد سطح همه تیمارها، اما در مورد تیمارهای T3و T4 افزایش عمق آبیاری نسبت به تیمار T2 اتفاق افتاده است. همین مسئله موجب کاهش شوری خاک ناحیه خیس‌شدگی مزرعه (ناحیه تحت آبیاری)، با افزایش فاصله لترال‌ها از همدیگر شده است. شکل ۴ این مسئله را به‌خوبی تشریح می‌کند. از نظر نحوه کنترل شوری اعماق خاک (شکل ۴-ب) نیز شرایط به‌گونه‌ای است که تیمار T4 منجر به مقادیر کمتر شوری عمقی خاک گردیده و نسبت به تیمارهای T2 و T3، شرایط مناسب‌تری را برای گیاه فراهم کرده است.

همانند شرایط آبیاری با آب غیر شور، در اثر استفاده از آب شور (۸ دسی زیمنس‌بر متر) نیز با وجود ثابت ماندن حجم آب مصرفی در واحد سطح همه تیمارها، در تیمارهای T3و T4 افزایش عمق آبیاری نسبت به تیمار T2 اتفاق افتاده و موجب کاهش شوری خاک ناحیه خیس‌شدگی مزرعه (ناحیه تحت آبیاری) شده است. شکل ۴ تأثیر افزایش فاصله لوله آبده (لترال) بر شوری خاک مزرعه در انتهای فصل رشد، با ثابت ماندن حجم آب مصرفی در واحد سطح را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، در تیمار T4 و به دلیل بیشتر بودن عمق آب نفوذ یافته به زمین در طرفین لترال، شرایط مناسب‌تری برای رشد گیاه از لحاظ شوری خاک در این بخش از مزرعه به وجود آمده است. از نظر پروفیل شوری (شکل ۴-ب) و نحوه کنترل شوری اعماق خاک نیز شرایط تیمار T4 به‌گونه‌ای است که منجر به مقادیر کمتر شوری خاک در عمق گردیده و نسبت به تیمارهای T2 و T3، شرایط مناسب‌تری را برای گیاه فراهم کرده است.



ب- پروفیل شوری خاک

B- Soil salinity profile



الف- میانگین شوری خاک (۰-۶۰ سانتی‌متر)

A- Average soil salinity (0-60 cm)

شکل ۴- تأثیر افزایش فاصله لترال بر شوری خاک مزرعه در انتهای فصل رشد، با ثابت ماندن حجم آب مصرفی در واحد سطح

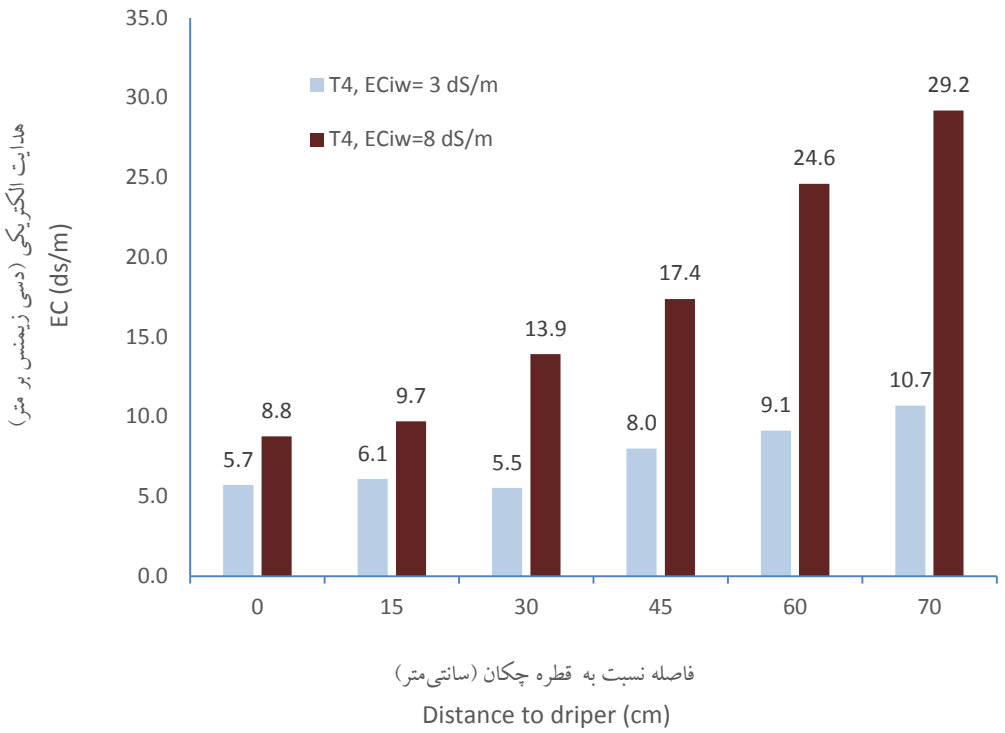
Figure 4- The effect of increasing the lateral distance on the salinity of soil at the end of the growing season, while maintaining the volume of water consumption per unit area

مقایسه نتایج دو سطح شوری در تیمارهای فاصله لترال

بدیهی است که با افزایش فاصله افقی هر نقطه از مزرعه نسبت به لوله آبده (لترال)، عمق آبیاری و کسر آبشویی کاهش یافته و به تبع آن، شوری خاک این نقاط نیز می‌تواند افزایش یابد. به‌عنوان‌مثال، شکل ۵ روند تغییرات میانگین شوری خاک ناحیه ریشه گندم در تیمار T4 (فاصله لترال ۱۴۰ سانتی‌متر) را نشان می‌دهد. همان‌طوری که ملاحظه می‌گردد، در شرایط آبیاری با آب غیر شور (شوری آب ۳ دسی‌زیمنس بر متر) شوری خاک در فواصل صفر (زیر لترال)، ۱۵ و ۳۰ سانتی‌متر، بین ۵/۵ تا ۶/۱ دسی‌زیمنس بر متر مشاهده شده که این مقادیر از حد آستانه تحمل به شوری گیاه گندم پایین‌تر بوده و از این لحاظ، خطری را متوجه گیاه نمی‌کند. گندم گیاهی است که حد آستانه تحمل به شوری آن در حدود ۷/۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد (Ayers and Westcott, 1989). با توجه به شکل ۲ و در فاصله ۴۵، ۶۰ و ۷۰ سانتی‌متری نسبت به لوله آبده، مقادیر شوری خاک بالاتر از حد آستانه بوده و در صورت وجود پوشش گیاهی در این ناحیه از مزرعه، گیاه با خسارت جدی مواجه خواهد شد. روند افزایش تغییرات مکانی شوری خاک ناحیه ریشه گندم با افزایش فاصله نسبت به لوله آبده در شرایط آبیاری با آب شور (شوری آب ۸ دسی‌زیمنس بر متر) نشان می‌دهد که شوری خاک در فواصل صفر (زیر لترال) و ۱۵ سانتی‌متر به‌مراتب پایین‌تر از مقادیر شوری خاک در فواصل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متری نسبت به لوله آبده است که ناشی از افزایش عمق آبیاری و کسر آبشویی در طرفین لوله آبده می‌باشد.

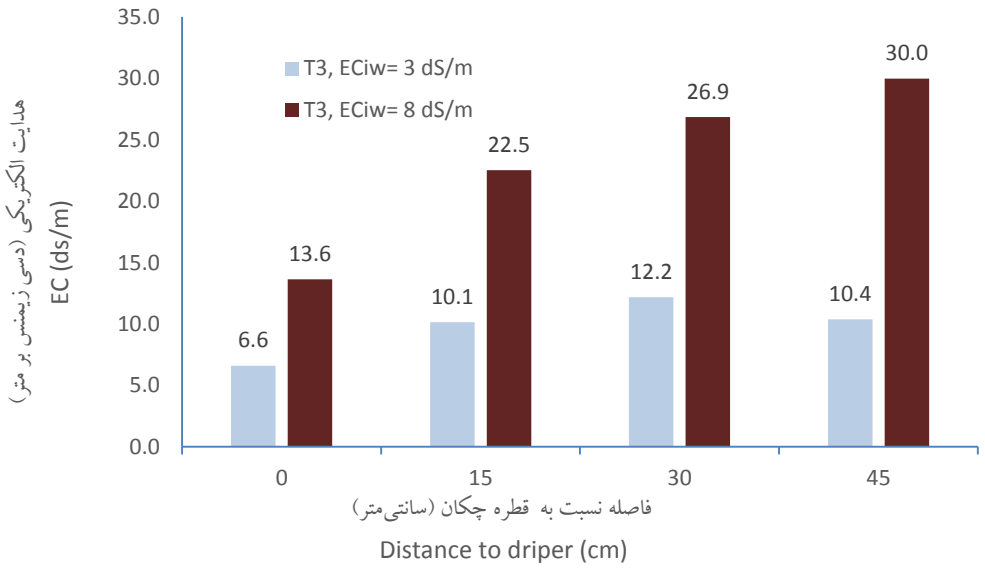
روند افزایش تغییرات مکانی شوری خاک ناحیه ریشه گندم با افزایش فاصله نسبت به لوله آبده در شرایط آبیاری با آب شور در تیمار T3 (فاصله لترال ۱۰۰ سانتی‌متر) نیز در شکل ۶ نشان می‌دهد که شوری خاک در فاصله صفر (زیر لترال) پایین بوده اما در فواصل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری نسبت به لوله آبده افزایش پیدا می‌کند. اما این روند در شرایط آبیاری با آب غیر شور تعادل پخش نمک را در فواصل غیر صفر مشاهده می‌کنیم.

با کاهش فاصله نوارهای آبیاری در تیمار T2 (فاصله لترال ۶۰ سانتی‌متر) در هر دو شوری آب آبیاری (شکل ۷) روند افزایشی کندی را در تغییرات شوری به ازای تغییر فاصله از مرکز نوارها مشاهده می‌کنیم. قطعا مقدار شوری خاک تحت تاثیر شوری آب آبیاری قرار گرفته و در تیمار آبیاری با آب شور در محدوده مجاز برای گیاه نمی‌باشد.



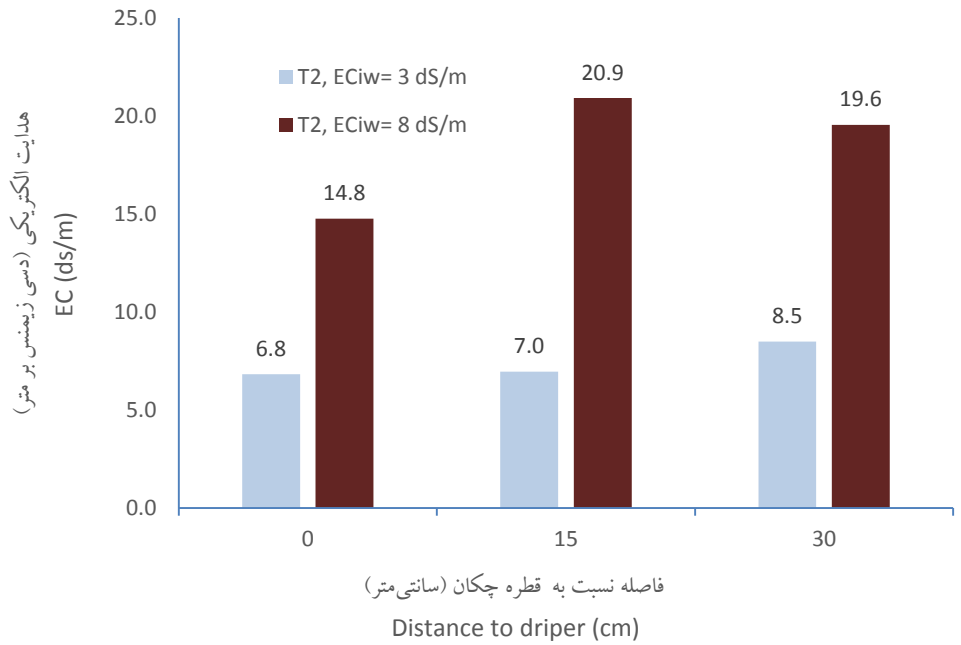
شکل ۵- روند تغییرات مکانی شوری خاک ناحیه ریشه گندم در تیمار T4 در هر دو شوری (هدایت الکتریکی ۳ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر)

Figure 5- The trend of spatial variations in soil salinity of wheat root area in T4 treatment at both salinities (EC of 3 and 8 dS/m)



شکل ۶- روند تغییرات مکانی شوری خاک ناحیه ریشه گندم در تیمار T3 در هر دو شوری (هدایت الکتریکی ۳ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر)

Figure 6- The trend of spatial variations in soil salinity of wheat root area in T3 treatment at both salinities (EC of 3 and 8 dS/m)



شکل ۷- روند تغییرات مکانی شوری خاک ناحیه ریشه گندم در تیمار T2 در هر دو شوری (هدایت الکتریکی ۳ و ۸ دسی‌زیمنس بر متر)

Figure 7- The trend of spatial variations in soil salinity of wheat root area in T2 treatment at both salinities (EC of 3 and 8 dS/m)

مقایسه نتایج با سایر مطالعات

اکثر پژوهش‌های انجام شده بر مبنای عملکرد محصول مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند و بر اساس روابط موجود با افزایش شوری بیش از حد آستانه، قطعا عملکرد تحت تاثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد. اما توجه و بررسی استفاده از سیستم تیپ با فواصل بین لترال بیشتر نسبت به تحقیقات انجام شده از نوآوری‌های این مطالعه می‌باشد که فواید آن در نفوذ عمقی آب بیشتر و جنبه‌های اقتصادی و بهره‌وری بیشتر نسبت به سیستم‌های آبیاری سنتی است. بنابراین در این پژوهش و برمبنای شوری خاک، در مقایسه نتایج می‌توان گفت که فاصله ۶۰ تا ۷۰ سانتی‌متر بهترین فاصله برای قرار گرفتن شوری خاک در محدوده مجاز بوده و همپوشانی جبهه رطوبتی نیز ایجاد می‌گردد و در مطالعات پیشین نیز این فاصله توصیه شده است (Torknezhad *et al*., 2006; Rahimian., 2013; Chen *et al*., 2015). اما در شرایط محدودیت منابع افزایش فاصله به ۹۰ و حتی ۱۰۰ سانتی‌متر نیز در صورت افزایش عمق آبیاری و تغییر آرایش کشت می‌تواند مفید واقع گردد (Zhao *et al*., 2016). فواصل بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر قطعا شوری خاک را در بین فواصل افزایش داده و باعث کاهش عملکرد شدید خواهند شد، بنابراین بیشتر از جنبه اقتصادی مورد توجه قرار گرفته و با توجه به عدم همپوشانی آب و تجمع نمک در لبه جبهه رطوبتی حتی در شرایط آبیاری با آب شیرین، ایجاد فواصل نکاشت در بین لترال‌ها ضروری می‌باشد.

نتیجه‌گیری

سیستم‌های آبیاری غرقابی دارای راندمان کاربرد پایینی بوده و به دلیل کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، استفاده از روش‌های آبیاری قطره‌ای (نظیر Tape در مزارع گندم) توصیه می‌شود. بحث شوری آب در منطقه از مشکلات عمده کشت‌های زراعی است. همچنین بحث اقتصادی استفاده از تیپ برای کشت‌های زراعی مانند گندم نیز مساله مهمی است. این روش در مزارع گندم به دلیل هزینه‌ها و همچنین احتمال بروز مشکلات شوری خاک، دارای محدودیت‌هایی است که می‌تواند از طریق افزایش فاصله لوله‌های آبده و کاهش مصرف نوارهای آبیاری قطره‌ای در واحد سطح مزرعه مرتفع شود. این پژوهش بر آن شد تا تأثیر فاصله لوله‌های آبده (نوارهای آبیاری Tape) بر توزیع سطحی و عمقی شوری خاک برای گیاه گندم را مورد بررسی قرار دهد. اگرچه روش آبیاری تیپ در شرایط شور (تیمارهای شوری آب آبیاری ۸ دسی‌زیمنس‌بر متر) نسبت به شرایط غیر شور (تیمارهای شوری آب آبیاری ۳ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به تجمع بیشتر املاح در خاک و احتمال بروز خسارت به گیاه را تشدید می‌کند، اما نتایج نهایی این پژوهش نشان داد که با افزایش فواصل لترال‌های آبیاری و به‌تناسب آن افزایش عمق آبیاری و دور نگه‌داشتن املاح از بستر کاشت، می‌توان محیط مناسب‌تری را برای رشد گیاه آماده کرد و از مزایای اقتصادی این کار نیز بهره برد. همچنین، از نظر نحوه کنترل شوری اعماق خاک نیز شرایط به‌گونه‌ای

بوده اســت که تیمار با فاصــله لترال بزرگ‌تر (تیمار T4) نســبت به تیمارهای T2 و T3، منجر به مقادیر کمتر شــوری خاک در لایه‌های زیرین گردیده و شرایط بهتری را برای گیاه فراهم کرده است. کاهش شــوری خاک در لایه‌های زیرین می‌تواند در میزان عملکرد محصــول موثر باشــد. این نتایج کاملا کاربردی اســت و بر اســاس هر یک از مســائل موجود در هر منطقه‌ای به‌کارگیری آن نتایج مفیدی خواهد داشت. مخصوصا در شرایطی که محدودیت منابع آب و شوری آب مساله منطقه می‌باشد. البته نتایج محدود به منطقه نیست و در مناطق مشابه از نظر اقلیمی، قابل اجراست. بنابراین تعمیم آن به سایر شرایط و مناطق اقلیمی، مســتلزم تحقیقات تکمیلی و بیشــتری در آن مناطق خواهد بود. این مطالعه در واقع بخشی از نتایج یک طرح تحقیقاتی در حال انجام توسط مرکز ملی تحقیقات شــوری است که مواردی نظیر عملکرد محصول و تغییرات رطوبتی خاک در فواصل مختلف نسبت به لترال و دیگر موارد مهم توســط مجری مربوطه اندازه‌گیری و در قالب پژوهش‌های دیگری ارائه و تحلیل خواهد شــد. همچنین پیشــنهاد می‌گردد تحقیقات تکمیلی بیشتری (به‌ویژه در شرایط مختلف اقلیمی) در خصوص تاثیر این روش بر عملکرد محصول، بیلان آب و املاح در خاک و شاخص بهره‌وری آب در مزارع گندم انجام شود.

سپاسگزاری

بدینوســیله از مرکز ملی تحقیقات شــوری به خاطر حمایت در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Abbasi, F., Naseri, A., Sohrab, F., Baghani, J., Abbasi, N., & Akbari, M. (2015). *Improving Water Consumption Productivity, Agricultural Technical and Engineering Research Institute, Karaj, Iran*. Agricultural Research, Education and Extension Organization Publications. 68 pages. (In Persian)
2. Afshar, H., Sharifan, H., Ghahraman, B., & Bannayan Aval, M. (2020). Investigation of wheat water productivity in drip irrigation (tape) (Case study of Mashhad and Torbat-e-Heydariyeh). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage 14*(1): 39-48. (In Persian with English abstract)
3. Akhavan, K. (2015). *The application of drip irrigation system (tape) in wheat cultivation Ardabil agricultural Jihad Organization*. Agricultural Extension Coordination Management. Extension Manual, Number 83. (In Persian)
4. Ayers, R.S., & Westcott, D.W. (1989). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1, Rome.
5. Burt, C., Othman, A.A., & Paolini, A. (2003). Salinity patterns on row crops under Subsurface Drip Irrigation (SDI) on the Westside of the San Joaquin Valley of California, irrigation training and research center (ITRC), 64 pp. http://www.itrc.org/reports/pdf/rowcropsalinity.pdf
6. Chen, R., Cheng, W., Cui, J., Liao, J., Fan, H., Zheng, Z., & Ma, F. (2015). Lateral spacing in drip-irrigated wheat: The effects on soil moisture, yield, and water use efficiency. *Field Crops Research* 179: 52–62. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.021.
7. Díaz, F.J., Grattan, S.R., Reyes, J.A., de la Roza-Delgado, B., Benes, S.E., Jiménez, C., & Tejedor, M. (2018). Using saline soil and marginal quality water to produce alfalfa in arid climates. *Agricultural Water Management* 199: 11-21. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.003.
8. Etemadi, H., Goli, A., & Shahabi, M. (2018). *Relationship between electrical conductivity of saturation past extract and different soil: water ratios*. 13th National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran and 3rd National Conference on Natural Resources and Environment Protection. Mohaghegh Ardabili University. (In Persian with English abstract)
9. Ghaemi, A.A., Hoseinabadi, Z., & Sepaskhah, A.R. (2008). Water use efficiency and yield of sugar beet under conventional and alternate tape and furrow irrigation. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries) 22*(2): 85-94. (In Persian with English abstract)
10. Ghadami Firouzabadi, A., & Baghani, J. (2019). Effects of different wheat planting patterns in drip tape irrigation on yield and water productivity of bread wheat in Hamedan. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage 13*(2): 528-539. (In Persian with English abstract)
11. Ghadami Firouzabadi, A., Baghani, J., Jovzi, M., & Albaji, M. (2021). Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. *Agricultural Water Management* (251). https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106868.
12. Gharahdaghi, M.M., Tabatabaei, S.M., & Hasanli, M. (2016). Simulation of soil salinity and corn yield under saline water application conditions using Swap and Saltmed models. Journal of Water Research in Agriculture. (30)1: 51–64. (In Persian). http://dx.doi.org/10.22092/jwra.2016.106201.
13. Gharahdaghi, M.M., Tabatabaei, S.M., Maroufpoor, A., & Hosseinpanahi, F. (2019). Effects of laterals and emitters spacing on winter wheat yield and water use efficiency in drip-tape irrigation system. *Journal of Water Research in Agriculture 4*(33): 645–660. (In Persian with English abstract)
14. Kangkang, H., Yonghui, Y., Yanmin, Y., Suying, Ch., Qiuli, H., Xiaojing, L., & Feng., G. (2017). Hydrus simulation

of sustainable Brackish water irrigation in a winter wheat-summer maize rotation system in the north China plain. *Water Journal* 9: 536-554. http://doi.org/10.3390/w9070536.

15. Khorsandi, F., & Alaei, Y. F. (2007). Gypsum and texture effects on the estimation of saturated paste electrical conductivity by two extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38: 1105–1117.
16. Khoshsimay Chenar, M., & Noory, H. (2019). The effect of drip irrigation (Tape strips) with saline water on some soil chemical properties. *Journal of Water Research in Agriculture 4*(33): 565-581. (In Persian)
17. Li, X., Kang, Y., Wan, S., Chen, X., & Xu, J. (2015). Effect of drip-irrigation with saline water on Chinese rose (*Rosa chinensis*) during reclamation of very heavy coastal saline soil in a field trial. *Scientia Horticulturae* 186: 163-171. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.024.
18. Malash, N., Flowers, T.J., & Ragab, R. (2005). Effect of irrigation system and water management practices using saline and non-saline water on tomato production. *Agricultural Water Management 78*(1-2): 25–38. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.016.
19. Mirzaei Alamouti, L., Nazari, B., Sotoudehnia, A., & Ramezani Etedali, H. (2020). Investigation of salinity distribution in cultivated soil profiles under drip irrigation. *Journal of Soil and Water Resources Protection 2*(10): 69-81. (In Persian with English abstract)
20. Monjshirini, M., Salari, A., Mostafazadeh Fard, B., & Landy, A. (2015). Effect of irrigation water salinity on soil chemical characteristics under drip irrigation system (T-Tape). *Journal of Irrigation and Water Engineering 22*(6): 102-113. (In Persian with English abstract)
21. Rahimian, M.H. (2013). *The effect of lateral spacing in drip irrigation (Tape) on increasing the yield and water use efficiency of wheat*. National Conference on Passive Defense in Agriculture. (In Persian). https://civilica.com/doc/323911.
22. Rahimian, M.H., Aziziannasab, A., Nikkhah, M., & Dehghan, H. (2016). *Considerations of using Tape system for irrigation of wheat in saline conditions*. Extension Magazine No.204. Yazd Province Agricultural Extension Coordination Management. (In Persian)
23. Ramezani Etedali, H., Pashazadeh, M., Nazari, B., Sotoudehnia, A., & Kaviani, A. (2018). Study of salinity changes in soil profile of four agricultural crops in Qazvin plain under drip-tape irrigation with AquaCrop model. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries) 3*(32): 475-487. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.20084757.1397.32.3.3.1.
24. Tabatabaei, S.H., & Mousavi, S.M. (2017). Soil nitrate transport in subsurface drip irrigation with different lateral spacing under turfgrass culture using municipal wastewater. *Journal of Soil and Water Resources Protection 7*(2): 15-26. (In Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1396.7.2.2.4
25. Tarighi, J., & Maleki, R. (2017). *Drip irrigation system (Tape) is a new method to increase the productivity of water resources to develop sustainable agriculture*. Fifth National Conference and First International Conference on Organic and Conventional Agriculture. 25-26 August. Mohaghegh Ardabili University. (In Persian with English abstract)
26. Torknezhad, A., Aghaei, M., Jafari, H., Shirvani, A., Roeintan, R., Nemati, A., & Shahbazi, Kh. (2006). Technical and economic evaluation of drip irrigation method in wheat and its comparison with surface irrigation method. *Journal of Research and Construction* 72: 36-44. (In Persian with English abstract)
27. Zhao, Y.,Wang, F., Zhou, Q., Yang, K., & Zhang, Y. (2016). Effect of drip tape distance and irrigation amount on spring wheat yield and water use efficiency. College of Water Resource and Civil Engineering. China Agricultural University. *Chinese Agricultural Science Bulletin 14*(32): 194-199. https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb15120040.
28. Zhaoyan, L., Ming, D., Weihua, L., Jian, C., Qin, Zh., Xiao, W., Tingbo, D., Weixing, C., & Dong, J. (2019). Impacts of lateral spacing on the spatial variations in water use and grain yield of spring wheat plants within different rows in the drip irrigation system. *Agricultural Water Management* 212: 252-261. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.015.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 545-559

Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran

R. Fazloula[1]*, H. Pouryazdankhah[2]

Received: 14-07-2022
Revised: 25-09-2022
Accepted: 02-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Fazloula, R., & Pouryazdankhah, H. (2022). Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran. *Journal of Water and Soil 36*(5): 545-559. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.77702.1182

Introduction

Mazandaran province is one of the most important rice and citrus-producing areas in Iran, where most of the citrus orchards and agricultural fields are irrigated with groundwater. On the other hand, irrigation water pH is one of the basic qualitative factors that determine the solubility and biological availability of chemical components in the soil such as nutrients and heavy metals, and it can affect agricultural production.

Materials and Methods

The coastal strip of Mazandaran Province toward the southwest of the Caspian Sea is situated in the north of Iran with an area of 8,252 km^2 between 35.77 to 36.99 N latitudes and 50.36 to 57.13 E longitudes. In this study, the temporal and spatial variations of groundwater salinity were studied in the coastal strip using data from 300 wells, collected by Mazandaran Regional Water Company. Data included mean pH for each 6-month period of 9 consecutive years, from 2012 until the end of 2020. pH maps and maps of the risk probability area for rice and citrus growth were obtained by using Ordinary Kriging (OK) and Indicator Kriging (IK) in ArcGIS 10.7.1 software, respectively. Classifications were selected according to the properties pH range for the growth of citrus (5.8, 8) and the optimum pH for rice (6.8) in OK method. The indicator amount of pH was considered equal to 6.8 in IK method. Thereby, areas belonging to different pH classes were outlined and places with the risk probability for growing the rice and citrus were identified.

Results and Discussion

The 11 different models for semivariograms were drawn, and the best one was chosen according to the lowest nugget-to-sill ratio, and thus Stable and Exponential were obtained as the highest frequency for first and second half-years. The indices of cross validation for each selected semivariogram were estimated within acceptable ranges. In Ik method, the pH of studying area was classified into 4 ranges of <5.8, 5.8–6.8, 6.8–8.0, >8, and the percentage area of each classification derived from the ArcGIS software, the average area of each classification during the studying period was calculated zero, 0.6, 83.5 and 15.9 percent, respectively. It showed that most part of the study area located in the range of 6.8-8. It means most rice fields and citrus orchards were irrigated by the groundwater with the pH close to neutral. The obtained maps in the OK method indicated that the pH of the groundwater was not acidic in any points and alkaline conditions were observed in the western and eastern parts of the province. Therefore, The IK method was used to further investigate and determine the vulnerable areas. The probability of pH risk in rice and citrus growth was classified into 4 ranges (0-20%, 20-40%, 40-60% and 60-100%), and the average percentage area of each classification along the period was estimated 94.9, 4.8, 0.3 and zero percent, respectively. Using the IK method, higher probability of groundwater pH reducing the yield in citrus orchards and rice fields was found in eastern parts of Mazandaran province, which was about 5% of total studying

1 and 2- Associate Professor and Postdoctoral Researcher, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: r.fazloula@sanru.ac.ir)

area. Also, the results of the study in these 9 consecutive years did not show any decreasing or increasing trend in pH changes and consequently the area under each classification.

Conclusion

Generally, the results indicated that the pH of groundwater for irrigating the citrus orchards and rice fields was appropriate in the most parts of the province and merely in the eastern part of the province, low water alkalinity may make a risk probability for rice and citrus growth in both western and eastern parts of the province. Due to the fact that alkaline water causes soil alkalinity and consequently reduces the solubility of phosphorus and some other plant nutrients in soil, it is suggested to supply the optimum required fertilization amounts of the nutrients in soil. However, the amount of fertilization should be on the basis of field research results. It is also proposed to study the condition of rice and citrus growth and the irrigated water in more details through the farms of western parts of the province. Due to the fact that most citrus orchards in this province are irrigated under the pressurized irrigation systems and using groundwater for irrigation, it is suggested that the Langelier Saturation Index (LSI) be examined in future research.

Keywords: Caspian coastal strip, Indicator Kriging, Mazandaran province, Ordinary Kriging, pH

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۵۵۹-۵۴۵

پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی و تعیین مناطق حساس برای رشد مرکبات و برنج در مازندران

رامین فضل‌اولی[1*]- هدیه پوریزدان‌خواه[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۰

چکیده

استان مازندران یکی از مهم‌ترین مناطق در زمینه‌ی تولید برنج و مرکبات در ایران است که بخشی از باغ‌ها و مزارع کشاورزی آن با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شوند. با توجه به این امر که pH آب آبیاری تأثیر مهمی در عملکرد محصولات کشاورزی دارد، در این تحقیق، pH آب‌های زیرزمینی ۳۰۰ حلقه چاه مربوط به شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران، به صورت مکانی و زمانی در نوار ساحلی استان مازندران به مساحت ۸۲۵۲ کیلومترمربع از ابتدای سال ۱۳۹۱ تا پایان سال ۱۳۹۹، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 با روش کریجینگ معمولی (OK) براساس میانگین pH در دوره‌های شش‌ماهه پهنه‌بندی شد. برای شناسایی مناطق با خطرپذیری بیشتر از روش کریجینگ شاخص (IK) استفاده شد. نتایج نشان داد که بهترین نیم‌تغییرنما برای پارامتر pH مدل Stable و Exponential است. طبقه‌بندی کلاس‌ها در روش OK براساس حساسیت مرکبات و برنج تعریف شد. نتایج نشان داد که در روش OK، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی pHهای ۵/۸>، ۶/۲-۵/۸، ۸-۶/۲ و ۸< به‌ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد و در روش IK، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی با احتمال خطر آسیب‌پذیری ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۶۰ درصد به‌ترتیب برابر با ۹۴/۹، ۴/۸، ۰/۳ و صفر درصد بود. نقشه‌های حاصل از روش OK نشان دادند که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و در کناره‌های غربی و شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شد. نقشه‌های حاصل از روش IK نشان دادند که در اکثر مناطق استان مازندران احتمال خطر آسیب‌پذیری براساس pH آب‌های زیرزمینی برای باغ‌های مرکبات و مزارع برنج منطقه مورد مطالعه، در محدوده‌ی ۲۰-۰ درصد قرار دارد و در بخشی‌های بسیار کمی در قسمت‌های شرقی استان احتمال خطر به ۴۰-۲۰ درصد می‌رسد. با توجه به آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج درpHهای بالا در آب آبیاری، توصیه می‌شود که در دو محدوده‌ی غربی و شرقی استان برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، با انجام تحقیقات مزرعه‌ای کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود.

واژه‌های کلیدی: استان مازندران، کریجینگ شاخص، کریجینگ معمولی، نوار ساحلی دریای خزر، pH

مقدمه

آب برای حفظ و بقای حیات ضروری است. در این میان، آب‌های زیرزمینی یکی از ارزشمندترین منابع طبیعی است که از سلامت انسان، توسعه اقتصادی و تنوع اکولوژیکی حمایت می‌کند. با توجه به انفجار جمعیت، رشد صنعت و توسعه کشاورزی، استخراج آب‌های زیرزمینی افزایش یافته است (Grace, 2020). از طرفی، با توجه به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، خشک شدن تالاب‌ها و افزایش نفوذ آب دریا که نشان‌دهنده‌ی کاهش کیفیت آب است، پایداری در استفاده از منابع آب زیرزمینی و بحث تأمین آب در سراسر جهان مورد توجه قرار گرفته است (Gunarathna *et al.*, 2016). بنابراین اقدامات عملی برای حفاظت از کیفیت طبیعی آب‌های زیرزمینی ضروری است. همان‌طور که بسیاری از متخصصان اشاره می‌کنند، نقشه‌برداری کیفیت آب‌های زیرزمینی در مناطق وسیع اولین گام در برنامه‌ریزی منابع آب است (Todd and Mays, 2004) و تنها زمانی می‌توان با استفاده بهینه از آب‌های زیرزمینی به پایداری منابع آبی کمک نمود که کمیت و کیفیت آن به درستی ارزیابی شود (Kharad *et al.*,

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشیار و پژوهشگر پسا دکترای، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: r.fazloula@sanru.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.77702.1182

2010).

در کشور ایران، استان مازندران در زمینه‌ی کشاورزی، به‌عنوان اولین قطب تولید برنج و مرکبات در سطح کشور ایران شناخته می‌شود، به‌طوری که با دارا بودن ۲۲۸/۷ هزار هکتار مزارع برنج، که ۴۰ درصد از مزارع برنج سطح کشور را شامل می‌شود، رتبه نخست تولید برنج در کشور را دارا است (Yousefian *et al.*, 2019). در زمینه‌ی تولید و صادرات مرکبات نیز، استان مازندران، جزء ۱۰ تولید کننده‌ی بزرگ مرکبات در سطح جهانی است و رتبه نخست را در سطح کشور دارد (Hosseini and Rafiei, 2008). برنج، غذای قالب در بسیاری از کشورهای در حال توسعه و یک غذای پایدار برای بیش از نیمی از جمعیت جهان محسوب می‌شود (Pouryazdankhah *et al.*, 2019)، به‌طوری که سطح زیر کشت آن در جهان، طی سال‌های اخیر از ۱۴۵ میلیون هکتار به ۱۶۷/۲ میلیون هکتار افزایش یافته است (FAO, 2018). در ایران، کشت برنج الگوی غالب تولیدات کشاورزی در منطقه شمال ایران (استان‌های مازندران، گیلان و گلستان) است که مجموعاً حدود ۲/۷ میلیون تن برنج تولید می‌کند (Statistical Center of Iran, 2011). مرکبات نیز به‌عنوان یک گروه درختی میوه با اهمیت زیاد در بخش کشاورزی جهانی شناخته شده است زیرا ۱۴۰ کشور تولید کننده‌ی مرکبات در جهان قرار دارد (Ziogas *et al.*, 2021). برای دستیابی به تولید محصولات با راندمان بالا به‌عنوان یکی از مهمترین اهداف کشاورزی، کیفیت آب آبیاری در کشاورزی از عوامل مهم و اثرگذار است. با توجه به این امر که بسیاری از مزارع کشاورزی در استان مازندران به‌صورت برداشت‌های مجاز و غیرمجاز چاه‌ها در سطح استان، با آب‌های زیرزمینی آبیاری می‌شوند (IRNA, 2021)، ارزیابی و بررسی دقیق‌تر و شناخت بیشتر از کیفیت آب زیرزمینی موجود، به منظور دستیابی به تولید بهینه محصول در این استان به‌عنوان اولین قطب تولید برنج و مرکبات در کشور، نیاز است. از تحقیقات جامعی که در زمینه شناخت کیفیت آب‌های زیرزمینی استان مازندران انجام شده است می‌توان به تحقیق کاراندیش و شاهنظری (Karandish and Shahnazari, 2014) اشاره نمود که سه روش درون‌یابی با ArcGIS جهت پهنه‌بندی پارامترهای هدایت الکتریکی (EC)، pH، کل مواد جامد محلول در آب (TDS)، نسبت جذب سدیم (SAR)، سختی کل (TH)، غلظت یون کلرید (Cl^-)، یون سدیم (Na^+)، یون پتاسیم (K^+)، یون بی‌کربنات (HCO_3^-)، یون منیزیم (Mg^+)، یون کلسیم (Ca^+) و یون سولفات (SO_4^{2}) با داده‌برداری در پاییز و بهار سال ۲۰۰۴ با نمونه‌برداری از ۲۳ حلقه چاه انجام شد، میانگین آماری مقادیر EC، SAR، pH به‌ترتیب برابر با µmohs/cm ۱۴۸۰، ۳/۲۶، ۷/۷۶ و میانگین غلظت TDS، TH، Cl^-، Na^+، K^+، HCO_3^-، Mg^+، Ca^+ و SO_4^{2-} به‌ترتیب برابر با ۹۴۹، ۳۸۹، ۵/۰۴، ۶/۶۶، ۰/۰۷، ۷/۰۱، ۳/۳۳، ۴/۴۶ و ۲/۴۰ میلی‌گرم بر لیتر ارائه شد. پس از تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مناطق با کیفیت آب آلوده شناسایی شد.

pH آب یک پارامتر کیفی پایه است و حلالیت و در دسترس بودن بیولوژیکی اجزای شیمیایی مانند مواد مغذی و فلزات سنگین را تعیین می‌کند، به‌طوری که استفاده از آب با pH بیشتر و یا کمتر از محدوده‌ی بهینه برای رشد گیاه، می‌تواند مضر باشد (Gunarathna *et al.*, 2016). از حساس‌ترین پارامترهایی است که نقش بسیار مهمی در میزان عملکرد محصولات مورد کشت در منطقه ایفاء می‌کند. طی تحقیقاتی عنوان شده است که افزایش pH آب آبیاری در برنج می‌تواند منجر به افزایش و یا کاهش عناصر موجود در خاک به‌ویژه نیتروژن و فسفر شود که این امر متعاقباً باعث کاهش عملکرد محصول شود (van Asten et al., 2005) و در مرکبات نیز، عملکرد درختان با افزایش pH کاهش می‌یابد (Ghimire et al., 2020). به‌این منظور، کیفیت آب‌های زیرزمینی در بلندمدت باید بررسی شود، به‌طوری که تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب در یک دوره‌ی چند ساله مشخص شود. برای شناخت و ارزیابی تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب، نیاز به پهنه‌بندی این پارامترها در محدوده‌ی مورد مطالعه است. GIS می‌تواند به درک بهتر روابط مکانی و الگوها کمک کند (Grace, 2020). معمول‌ترین روش در علوم آب و خاک برای دستیابی به توزیع مکانی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک روش کریجینگ معمولی (OK[1]) است (Mishra *et al.*, 2009; Yasrebi *et al.*, 2009). روش OK یک روش درون‌یابی زمین‌آماری برای تخمین متغیرهای مکانی پراکنده است (Lee *et al.*, 2007). اما نمی‌تواند دقت ارزیابی و برآورد بر اساس میزان خطرپذیری و احتمال خطر در منطقه را بیان کند (Goovaerts *et al.*, 1997). در مقابل، کریجینگ شاخص (IK[2]) یکی دیگر از روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری برای ارزیابی مکانی متغیرها است که میزان خطر را با تعیین یک مقدار آستانه خاص بیان می‌کند (Belkhiri *et al.*, 2017). روش IK در بسیاری از مطالعات ارزیابی پارامترهای کیفی آب آبیاری و زیرزمینی مانند غلظت نیترات، Cl^-، Na^+، SAR، EC و فلزات سنگین استفاده شده است (Chica-Olmo *et al.*, 2014; Pouryazdankhah *et al.*, 2019; Delbari *et al.*, 2016; Piccini *et al.*, 2012; Belkhiri *et al.*, 2017).

طی تحقیق انجام شده در حوضه آبریزی واقع در یک منطقه‌ی کشاورزی به مساحت یک کیلومترمربع در سریلانکا، توزیع مکانی pH آب‌های زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.2 رسم شد. برای این منظور اطلاعات مربوط به ۴۰ حلقه چاه برداشت شد و برای

1- Ordinary Kiriging

2- Indicator Kiriging

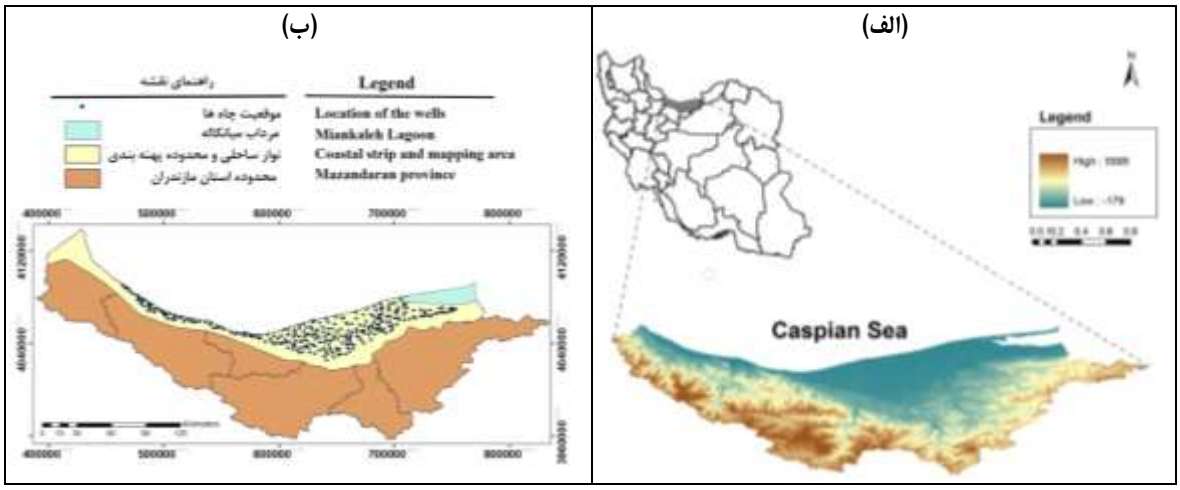
پهنه‌بندی از سه روش وزن دادن معکوس فاصله (IDW)، تابع پایه‌ای شعاعی (RBF) و روش درون‌یابی کریجینگ استفاده شد. در نهایت روش کریجینگ با مدل نیم‌تغییرنمای خطی (Liner) به‌عنوان بهترین روش برای پهنه‌بندی pH معرفی شد (Gunarathna *et al.*, 2016). در استان فارس نیز تحقیقی به‌منظور انتخاب مناسب‌ترین روش درون‌یابی زمین‌آمار در تهیه نقشه پهنه‌بندی پارامترهای pH و TDS در آب‌های زیرزمینی دشت ارسنجان، روش‌های میان‌یابی کریجینگ ساده (SK)، OK، IDW و RBF با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS با یکدیگر مقایسه شدند. با رسم نیم‌تغییرنمای مربوطه، روش SK برای پارامتر TDS و روش OK برای پارامتر pH به عنوان بهترین روش‌ها انتخاب شدند و در نهایت نقشه‌ی هم‌تراز مربوط به دو پارامتر فوق برای آب‌های زیرزمینی رسم شد (Shabani, 2009). طی مطالعه موردی در استان زنجان، پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی شامل، SAR، pH، TDS، TH، Cl^-، Na^+، K^+، HCO_3^-، Mg^{2+}، Ca^{2+} و SO_4^{2} برای ۱۵ حلقه چاه، طی ۴ بار نمونه‌برداری، اندازه‌گیری شدند، سپس با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS و با در نظر گرفتن شاخص آماری ضریب همبستگی ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در منطقه، طبق استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای شرب مناسب است (Asghari *et al.*, 2018). در تحقیق انجام شده در دشت خفر، در ایران، سه روش درون‌یابی IDW، Spline و کریجینگ برای پهنه‌بندی پارامترهای کیفی آب‌های زیرزمینی منطقه از جمله EC، SAR و pH برای دوره بهار و پاییز مورد ارزیابی قرار گرفتند. کریجینگ به‌عنوان بهترین مدل برای پاییز و Spline به‌عنوان بهترین روش در پاییز شناخته شد. نتایج نشان داد بیشترین مقادیر EC در مرکز و جنوب‌شرقی و بالاترین مقدار SAR در جنوب‌شرقی منطقه مشاهده شد. نتایج پهنه‌بندی pH نشان داد که pH از مرکز به شمال و شمال‌غربی افزایش یافته است (Mohammadi *et al.*, 2021). تحقیقی در استان مازندران با هدف بررسی وضعیت شوری آب‌های زیرزمینی طی یک دوره ۲۶ ساله، از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۳ (۱۳۶۶-۱۳۹۲) انجام شد. از روش OK برای پهنه‌بندی و تهیه نقشه شوری استان استفاده شد. نتایج نشان داد که همبستگی مکانی در اکثر سال‌های مورد مطالعه در سطح متوسط بود. بیشترین احتمال شوری در قسمت‌های شرقی استان و در نواحی پست‌تر مشاهده شد. درکل، با در نظر گرفتن حد آستانه ۱ دسی‌زیمنس بر متر نتیجه گرفته شد که استفاده از آب‌های زیرزمینی در بلندمدت می‌تواند باعث کاهش عملکرد برنج در منطقه شود (Amiri-Bourkhani *et al.*, 2017). اگرچه تحقیقات بسیاری در استان مازندران در زمینه‌ی بررسی کیفیت آب‌های زیرزمینی انجام شده است، اما تحقیقی در زمینه‌ی بررسی pH آب‌های زیرزمینی که به‌عنوان آب آبیاری در کشاورزی منطقه استفاده می‌شود، انجام نشده است. با توجه به اینکه استان مازندران، اولین تولید کننده‌ی مرکبات و برنج در کشور است، نیاز است وضعیت کنونی کیفیت آب‌های آبیاری منطقه، بررسی شود. بنابراین مهمترین اهداف این تحقیق عبارتند از بررسی مکانی pH آب‌های زیرزمینی طی نیم‌سال‌های اول و دوم سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۱ با روش OK در ArcGIS براساس محدوده‌های حساس به pH در مرکبات و برنج که کشت غالب منطقه به‌شمار می‌روند و تعیین مکان‌های تحت خطر بیشتر براساس روش IK و ارائه راهکارهای مدیریتی.

مواد و روش‌ها

معرفی محدوده‌ی مطالعه

استان مازندران بین ۳۵/۷۷ تا ۳۶/۹۷ درجه عرض شمالی و ۵۰/۳۶ تا ۵۷/۱۳ درجه طول شرقی، در شمال ایران قرار دارد و دارای مرز مشترک طولانی با دریا است. قسمت هموار و جلگه‌ای مازندران، سرزمین هلالی شکل به مساحت ۸۲۵۲ کیلومترمربع است که مساحت پهنه‌بندی شده در این تحقیق را شامل می‌شود و از سواحل دریا در شمال به سمت قسمت کوهپایه‌ای در جنوب استان امتداد می‌یابد (Omrani *et al.*, 2003). شکل ۱ محدوده‌ی مورد مطالعه و موقعیت ۳۰۰ چاه نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. اقلیم منطقه معتدل و مرطوب است و میانگین بارندگی استان مازندران ۶۷۳ میلی‌متر است (Ghadami Firouzabadi, 2015). pH آب‌های زیرزمینی برای ۳۰۰ حلقه چاه در طی ۱۸ بازه زمانی به‌صورت شش ماهه از ابتدای سال ۱۳۹۱ تا پایان سال ۱۳۹۹ خورشیدی، توسط سازمان آب منطقه‌ای استان مازندران اندازه‌گیری شد و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این امر که در نیم‌سال اول، بارندگی کم‌تر و برداشت آب برای کشاورزی بیشتر است، و در نیم‌سال دوم، بارندگی و تغذیه آب‌های زیرزمینی زیاد است، جهت بررسی جزئی‌تر بازه‌های زمانی مورد مطالعه به‌صورت دوره‌های شش ماهه درنظر گرفته شد. میانگین پارامترهای کیفی منطقه نوار ساحلی نیز طی دوره مطالعاتی محاسبه شد که مقادیر TDS، SAR و EC به ترتیب برابر با ۶۹۴/۵ میلی‌گرم بر لیتر، ۱/۶ و ۱/۱ دسی‌زیمنس بر متر بدست آمد.

زمین‌های کشاورزی در منطقه، شامل باغ‌های مرکبات و مزارع برنج هستند. به‌دلیل محدودیت آب سطحی در منطقه، آبیاری در این استان، از طریق برداشت از چاه‌های حفر شده و انتقال آب‌های زیرزمینی به مزارع و باغ‌ها نیز صورت می‌گیرد.



شکل ۱- الف) نقشه استان مازندران و موقعیت آن در کشور ایران، ب) محدوده مورد مطالعه در نوار ساحلی استان مازندران و موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری به صورت نقاط (۳۰۰ حلقه چاه)

Figure 1- a) Map of Mazandarn Province and its location in Iran, b) Study area along the coastal strip of Mazandaran Province and the location of sampling wells (300 wells)

روش پهنه‌بندی

تجزیه و تحلیل داده‌های مورد نظر که شامل ۱۸ مجموعه داده بود در چهار مرحله انجام شد؛ ۱- نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح معنی‌داری ۵ درصد با نرم‌افزار SPSS 26 بررسی گردید و درصورت نرمال نبودن، با در نظر گرفتن مقدار تابع انتقال Log در نرم‌افزار ArcGIS، داده‌ها به شرایط نرمال نزدیک شدند. ۲- بهترین نیم‌تغییرنماها با در نظر گرفتن بالاترین همبستگی از بین ۱۱ روش Circular، Spherical، Gaussian، Rational Quadratic، Tetraspherical، Pentaspherical، Exponential، Hole Effect، K-Bessel، J-Bessel و Stable با استفاده از ابزار Geostatistical wizard موجود در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 برای هر مجموعه داده در روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص انتخاب شدند؛ ۳- با استفاده از دورن‌یابی OK، نقشه‌های حاصل از پهنه‌بندی pH برای دوره‌های شش ماهه به‌دست آمد و براساس محدوده مناسب pH برای مرکبات و برنج، طبقه‌بندی انجام شد. ۴- بررسی نقاط خطرپذیر از نظر pH برای برنج با روش درون‌یابی IK انجام شد و مناطق حساس از نظر pH مشخص شد.

روش کریجینگ معمولی

با توجه به اینکه هدف اصلی از پهنه‌بندی pH، اثر آن بر عملکرد محصولات کشاورزی منطقه (برنج و مرکبات) است، در روش OK طبقه‌بندی براساس میزان حساسیت مرکبات و برنج به pH مناسب صورت گرفت. طی تحقیق انجام شده در زمینه‌ی مرکبات بهترین بازه pH برای دستیابی به عملکرد بالا بازه‌ی (۸ ، ۵/۸) بیان شده است، همچنین در این تحقیق عنوان شد که مرکبات تحت بیماری میوه سبز (Huanglongbing) که یکی از رایج‌ترین بیماری مرکبات است، در pHهای کمتر از ۵/۸ و بیشتر از ۸، بیشترین تلفات و ریزش برگ را دارند و همچنین ارتفاع رشد و میزان رشد زیست توده در آنها کمتر است (Ghimire *et al.*, 2020). در گیاه برنج نیز بهترین pH برای آب آبیاری ۶/۲ عنوان شده است (van Asten *et al.*, 2005; Honma *et al.*, 2016)، همچنین عنوان شد که قلیایی بودن آب آبیاری باعث قلیائیت خاک شده و میزان حلالیت فسفر و نیتروژن در خاک را که از عوامل مهم رشد و بازده عملکرد بالای گیاه برنج هستند را کاهش می‌دهد (van Asten *et al.*, 2005). بر این اساس، حدود کلاس‌های طبقه‌بندی به‌صورت ۵/۸، ۶/۲ و ۸ تعریف شد و براساس آنها نقشه‌های پهنه‌بندی انجام شد.

روش کریجینگ شاخص

با استفاده از روش IK، فرایند تخمین براساس مقادیر شاخص است و مستقل از توزیع نرمال داده‌ها است (Emery, 2006). در این تحقیق با توجه به موارد مذکور در بخش فوق، pH برابر ۶/۲ به‌عنوان بهترین pH برای مرکبات و برنج انتخاب شد و در این تحقیق، در روش کریجینگ شاخص، مقدار شاخص برابر با ۶/۲ درنظر گرفته شد. بر این اساس، نقشه احتمال خطر کاهش عملکرد در pH بالا، به‌دست آمد که مقادیر صفر و یک به‌ترتیب نشان‌دهنده‌ی کمترین و بیشترین میزان خطر است.

تجزیه و تحلیل آماری

برای انتخاب بهترین نیم‌تغییرنما، از نمایه نسبت واریانس اثر

قطعه‌ای به آستانه ($\frac{C_0}{C_0+C}$) استفاده شد که نشان‌دهنده میزان همبستگی نیم‌تغییرنما با داده‌های موجود است. به‌طوری‌که مقدار نمایه کمتر از ۲۵ درصد، نشان‌دهنده همبستگی بالا، مقادیر بین ۲۵ تا ۷۵ درصد نشان‌دهنده‌ی همبستگی متوسط و مقادیر بیشتر از ۷۵ درصد نشان‌دهنده همبستگی ضعیف آن است (Cambardella *et al.*, 1994). بر این اساس بهترین نیم‌تغییرنما با درنظر گرفتن کمترین مقدار این نمایه برای هر نیم‌سال انتخاب شد. سپس، برای مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده از شاخص‌های آماری، در بخش predication performances در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 از گزینه‌ی cross validation استفاده شد که شامل نمایه‌های میانگین خطای پیش‌بینی (ME)، ریشه‌ی دوم میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای استاندارد (ASE)، میانگین خطای استاندارد شده (MSE) و ریشه‌ی دوم میانگین خطای استاندارد شده (RMSSE) است. برای داشتن یک پیش‌بینی دقیق و معتبر، لازم است مقدار MSE نزدیک به صفر، ME، RMSE، ASE حداقل ممکن و RMSSE نزدیک به یک باشد (Johnstone *et al.*, 2001). معادلات هر یک از شاخص‌های آماری ME، RMSE، ASE، MSE و RMSE به‌ترتیب در رابطه‌های ۱ تا ۵ ارائه شده است.

$$ME=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Z^{*}(x_i)-Z(x_i)\right)}{n} \quad (۱)$$

$$ASE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\sigma(x_i)}{n}} \quad (۲)$$

$$MSE=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(Z^{*}(x_i)-Z(x_i)\right)/\sigma(x_i)\right)}{n} \quad (۳)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Z^{*}(x_i)-Z(x_i)\right)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$RMSSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\left(Z^{*}(x_i)-Z(x_i)\right)/\sigma(x_i)\right)^2}{n}} \quad (۵)$$

که در آنها، $Z^*(x_i)$ مقدار پیش‌بینی شده، $Z(x_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده، $\sigma(x_i)$ خطای استاندارد پیش‌بینی در مکان (x_i) و n تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

با آزمون کلموگروف-اسمیرنف موجود در نرم‌افزار SPSS 26 نرمال بودن داده‌ها در سطح معنی‌داری ۵ درصد بررسی شد، نتایج نشان‌دهنده‌ی توزیع غیرنرمال داده‌های مربوط به pH در هر یک از ۱۸ مجموعه داده‌ای مورد بررسی بود. برای هر ۱۸ داده در هر نیم‌سال، از تابع انتقال Log در ArcGIS 10.7.1 استفاده شد. برای درون‌یابی از روش‌های OK و IK در هر نیم‌سال استفاده شد، نیم‌تغییرنما به ۱۱ روش رسم شد و مقدار نمایه نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه برآورد گردید. کمترین مقدار نمایه به عنوان بهترین روش انتخاب شد. جدول‌های ۱ و ۲، مدل‌های نیم‌تغییرنمای انتخابی، نسبت اثر قطعه‌ای به آستانه و شعاع تأثیر را در هر نیم‌سال به‌ترتیب برای روش‌های OK و IK ارائه می‌دهد، نتایج نمایه‌های آماری مربوط به اعتبارسنجی متقابل برای روش‌های OK و IK نیز به‌ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۱ تمام مقادیر حد آستانه به اثر قطعه‌ای برآورد شده کمتر از ۷۵٪ و در بعضی موارد کمتر از ۲۵٪ بود که به‌ترتیب نشان دهنده همبستگی متوسط و قوی بین مقادیر داده‌های ورودی و مدل نیم‌تغییرنمای منتخب است.

جدول ۱- پارامترهای مدل نیم تغییرنما در کریجینگ معمولی، برای مدل‌های منتخب برای نیم‌سال‌های اول و دوم

Table 1- Semivariogram model parameters in the ordinary kriging method for the first and second half-years

سال Year	نیم‌سال اول First half-year			نیم‌سال دوم Second half-year		
	مدل نیم‌تغییرنما Model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (٪) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)	مدل نیم‌تغییرنما model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (٪) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)
1391 (2012)	Exponential	10.7	20.5	Stable	0.0	48.8
1392 (2013)	Circular	72.7	13.6	Exponential	0.0	5.2
1393 (2014)	Stable	8.9	1.8	Stable	67.1	1.9
1394 (2015)	Stable	0.0	4.7	Exponential	0.0	35.2
1395 (2016)	Stable	20.7	18.3	Stable	20.7	1.2
1396 (2017)	K-Bessel	0.0	14.5	Exponential	2.0	7.8
1397 (2018)	Stable	0.0	0.7	Stable	0.0	6.7
1398 (2019)	Gaussian	9.1	0.8	K-Bessel	19.8	9.1
1399 (2020)	Exponential	13.4	45.7	Exponential	69.8	3.2

جدول ۲- پارامترهای مدل نیم تغییرنما در کریجینگ شاخص، برای مدل‌های منتخب برای نیم‌سال‌های اول و دوم

Table 2- Semivariogram model parameters in the indicator kriging method for the first and second half-years

سال Year	نیم‌سال اول First half-year			نیم‌سال دوم Second half-year		
	مدل نیم‌تغییرنما Model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (٪) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)	مدل نیم‌تغییرنما model	حد آستانه به اثر قطعه‌ای (٪) Nugget-to-sill ratio (%)	شعاع تاثیر (km) Rang (km)
1391 (2012)	Exponential	0.0	1.5	Stable	0.0	2.1
1392 (2013)	Circular	0.0	8.1	Stable	0.0	0.7
1393 (2014)	Exponential	59.5	20.8	Exponential	0.0	7.5
1394 (2015)	Exponential	0.0	5.4	Exponential	68.3	18.8
1395 (2016)	Pentaspherical	0.0	8.3	Circular	0.0	3.9
1396 (2017)	Stable	0.0	17.3	Exponential	0.0	3.4
1397 (2018)	Exponential	0.0	8.9	Exponential	0.0	2.4
1398 (2019)	Stable	0.0	1.4	Stable	0.0	1.4
1399 (2020)	Exponential	72.7	21.6	Stable	0.0	1.2

جدول ۳- نمایه‌های آماری حاصل از اعتبارسنجی متقابل در روش کریجینگ معمولی برای نیم‌سال‌های مورد بررسی

Table 3- The indices of cross-validation in the ordinary kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year					نیم‌سال دوم Second half-year				
	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
1391 (2012)	0.002	0.373	0.006	1.129	0.330	0.008	0.435	0.017	0.931	0.465
1392 (2013)	0.004	0.366	0.010	1.052	0.349	0.007	0.387	0.012	0.635	0.618
1393 (2014)	0.004	0.364	0.012	1.038	0.350	0.007	0.438	0.014	0.930	0.474
1394 (2015)	0.003	0.360	0.984	0.984	0.366	0.000	0.462	0.009	0.528	0.880
1395 (2016)	-0.002	0.359	-0.006	0.971	0.369	0.003	0.389	0.005	1.102	0.349
1396 (2017)	0.001	0.399	0.003	1.029	0.389	-0.006	0.497	-0.008	0.781	0.656
1397 (2018)	0.002	0.478	0.005	0.875	0.547	-0.004	0.379	-0.005	0.727	0.523
1398 (2019)	-0.003	0.417	-0.004	0.685	0.616	-0.012	0.458	-0.015	0.704	0.674
1399 (2020)	-0.010	0.409	-0.015	0.711	0.588	-0.002	0.431	-0.003	1.079	0.395

جدول ۴- نمایه‌های آماری حاصل از اعتبارسنجی متقابل در روش کریجینگ شاخص برای نیم‌سال‌های مورد بررسی

Table 4- The indices of cross-validation in the indicator kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year					نیم‌سال دوم Second half-year				
	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE	ME	RMSE	MSE	RMSSE	ASE
1391 (2012)	0.976	0.983	0.731	1.079	0.153	0.983	0.989	1.370	1.476	0.081
1392 (2013)	0.983	0.989	1.370	1.476	0.081	0.771	0.850	0.170	0.188	0.454
1393 (2014)	0.938	0.955	0.525	0.535	0.179	0.939	0.996	2.332	2.470	0.045
1394 (2015)	0.987	0.991	1.155	1.517	0.102	0.941	0.957	0.528	0.537	0.178
1395 (2016)	0.987	0.991	1.801	3.489	0.069	0.993	0.996	1.810	3.359	0.086
1396 (2017)	0.976	0.983	1.058	1.206	0.103	0.983	0.989	1.137	1.741	0.111
1397 (2018)	0.994	0.996	2.175	2.910	0.061	0.994	0.996	1.298	1.829	0.093
1398 (2019)	0.881	0.921	0.257	0.269	0.342	0.745	0.833	0.169	0.189	0.444
1399 (2020)	0.363	0.657	0.082	0.148	0.445	0.238	0.686	0.048	0.137	0.501

با توجه به نتایج جدول ۱، در تحقیق حاضر، دو مدل نیم‌تغییرنمای برازش شده Stable، Exponential بیشترین فراوانی را در هردو روش OK و IK در نیم‌سال‌های مورد بررسی داشته است و با دارا بودن کمترین مقادیر حد آستانه به اثر قطعه‌ای، بالاترین همبستگی در آنها مشاهده شد. در تحقیق انجام شده توسط شیت و همکاران نیز برای پهنه‌بندی pH آب‌های زیرزمینی، مدل نیم‌تغییرنمای Exponential به‌عنوان بهترین مدل‌های برازش شده با روش OK در غرب بنگال، هند معرفی شد (Shit *et al.*, 2016). نتایج مربوط به اعتبارسنجی متقابل در جدول ۳ و ۴ به‌ترتیب برای روش‌های IK و OK ارائه شده است که نشان‌دهنده‌ی صحت و دقت مقادیر پیش‌بینی شده است. مساحت تحت هر عملکرد مرکبات متأثر از pH با نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1 برآورد شد و درصد هر یک کلاس طبقه‌بندی شده نسبت به کل مساحت پهنه‌بندی شده محاسبه شد و نتایج مربوط به روش‌های IK و OK به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد بیشترین مساحت منطقه تحت کلاس pH برابر ۶/۲–۸ هستند.

جدول ۵- مساحت تحت هر کلاس طبقه‌بندی در نیم‌سال‌های اول و دوم به‌صورت درصدی از کل مساحت نوار ساحلی در روش کریجینگ معمولی

Table 5- The amounts of each classified area calculated as the percentage of the total area using the ordinary kriging method for the first and second half-year

سال Year	نیم‌سال اول First half-year				نیم‌سال دوم Second half-year			
	<5.8	5.8-6.8	6.8-8.0	>8.0	<5.8	5.8-6.8	6.8-8.0	>8.0
1391 (2012)	0.0	0.0	81.6	18.4	0.0	0.0	78.8	21.2
1392 (2013)	0.0	3.7	85.5	10.8	0.0	0.0	84.5	15.5
1393 (2014)	0.0	0.8	82.8	16.4	0.0	0.0	83.4	16.6
1394 (2015)	0.0	0.0	85.0	15.0	0.0	0.0	84.6	15.4
1395 (2016)	0.0	0.0	85.1	14.9	0.0	0.0	85.1	14.9
1396 (2017)	0.0	4.2	80.1	15.6	0.0	0.0	83.9	16.1
1397 (2018)	0.0	1.1	83.6	15.3	0.0	0.0	84.6	15.4
1398 (2019)	0.0	0.0	84.6	15.4	0.0	0.1	83.0	17.0
1399 (2020)	0.0	0.0	83.3	16.7	0.0	1.2	83.5	15.3

جدول ۶- مساحت تحت هر محدوده‌ی احتمال خطر در نیم سال‌های مورد بررسی به صورت درصدی از کل مساحت نوار ساحلی در روش کریجینگ شاخص

Table 6- The amounts of each classified area based on the risk probability calculated as the percentage of the total area using the indicator kriging method for the first and second half-year

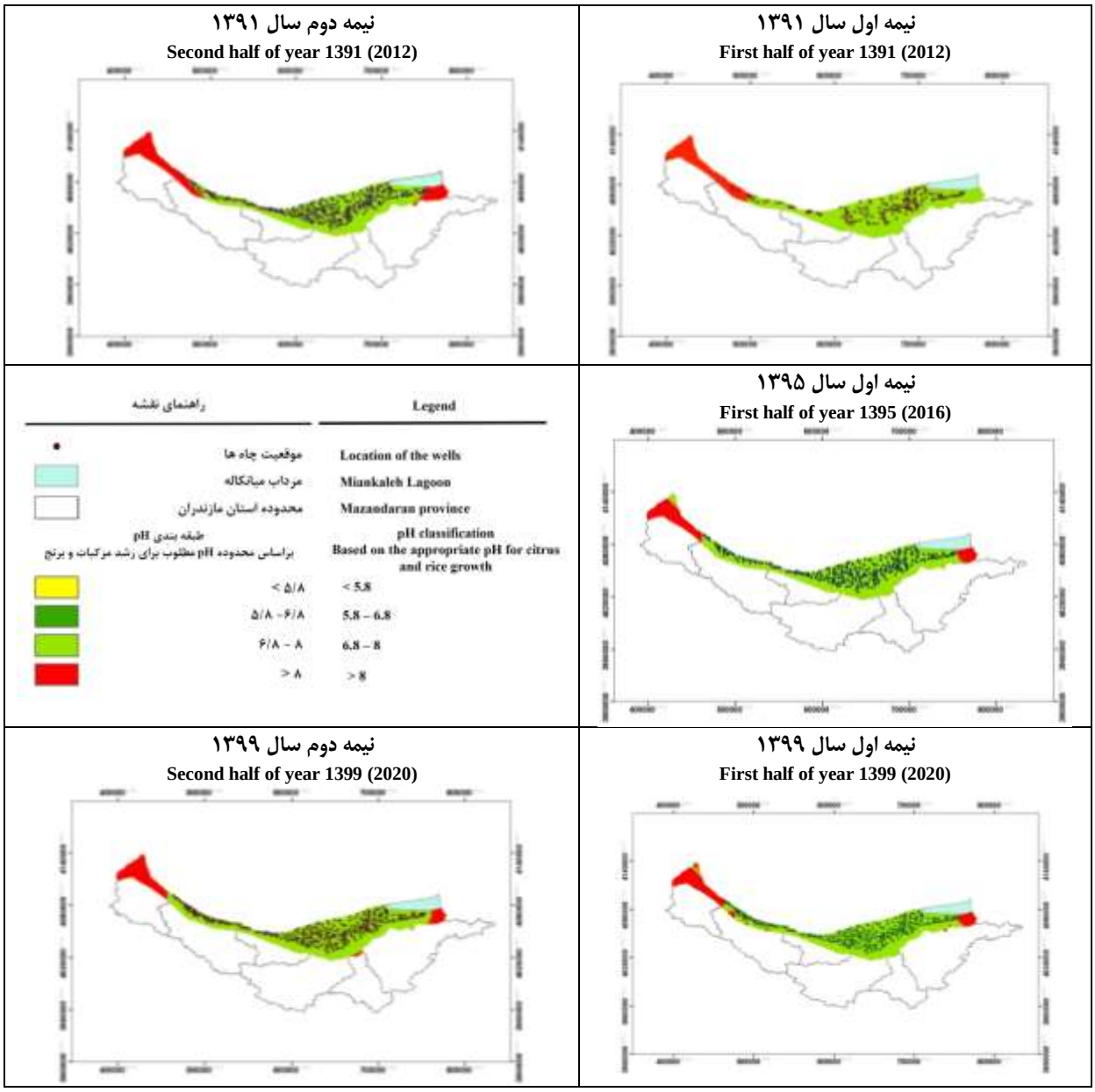
سال Year	نیم‌سال اول First half-year				نیم‌سال دوم Second half-year			
	0-20%	20-40%	40-60%	60-100%	0-20%	20-40%	40-60%	60-100%
1391 (2012)	87.2	12.8	0.0	0.0	85.4	12.5	2.1	0.0
1392 (2013)	100.0	0.0	0.0	0.0	80.8	16.7	2.5	0.0
1393 (2014)	82.5	17.5	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1394 (2015)	100.0	0.0	0.0	0.0	83.3	16.7	0.0	0.0
1395 (2016)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1396 (2017)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1397 (2018)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1398 (2019)	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0
1399 (2020)	89.7	10.3	0.0	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0

بعد از آن بیشترین فراوانی در بازه pH بیشتر از ۸ قرار دارند که این امر نشان‌دهنده‌ی این است که در باقی موارد آب‌های زیرزمینی قلیایی هستند و تقریباً هیچ سطحی از منطقه دارای آب‌های زیرزمینی با خاصیت اسیدی نیست. در کل، به‌طور میانگین مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی ۵/۸ >، ۶/۲-۵/۸، ۲-۶/۸ و < ۸ به‌ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد بدست آمد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بین سال‌های مورد بررسی و نیم‌سال‌های مورد بررسی روند و تفاوت مشهودی مشاهده نشده است.

نتایج جدول ۶ مساحت تحت احتمال‌های خطر با تعریف مقدار pH شاخص برابر با ۶/۲ را، در دو ستون مجزا برای نیم‌سال‌های اول و دوم نشان می‌دهد. مقادیر جدول ۶ نشان دهنده‌ی این است که تقریباً تمام سطح استان در محدوده‌ی امن از نظر pH است، به‌طوری‌که در بیشتر نیم‌سال‌های مورد بررسی ۱۰۰ درصد از مساحت استان مازندران در محدوده‌ی ۲۰-۰٪ احتمال خطر وجود دارد. این امر نشان دهنده‌ی این است که اگرچه حدود ۱۶ درصد از سطح استان مازندران تحت آب‌های زیرزمینی با pH قلیایی است اما از نظر احتمال خطر در محدوده‌ی امن ۲۰-۰ درصد است. در کل، نتایج جداول ۵ و ۶ نشان دهنده‌ی این است که pH آب‌های زیرزمینی در استان مازندران برای رشد محصولات باغ‌های مرکبات و مزارع برنج در وضعیت بسیار مطلوب قرار دارد. طی تحقیق انجام شده در نیشابور، با نمونه‌برداری از ۴۰۲ حلقه چاه طی سال‌های ۲۰۱۰-۲۰۱۳، وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی از نظر شرب بررسی شد، pH آب زیرزمینی یکی از پارامترهای مورد بررسی بود که با نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی صورت گرفت و نتایج نشان داد که حدود ۷۵ درصد آب‌های زیرزمینی منطقه دارای pH مناسب برای شرب هستند (Bhunia *et al.*, 2018). براساس نتایج تحقیق حاضر نیز ۸۳/۵ درصد از مساحت استان مازندران دارای pH مناسب و در محدوده‌ی نزدیک به خنثی، (۸ ، ۶/۲) هستند. در تحقیق انجام شده در سریلانکا نیز، بررسی آب‌های زیرزمینی را به‌عنوان منبع آب آبیاری در منطقه را بااهمیت دانستند و با ارزیابی پارامترهای کیفی ۲۹ حلقه چاه، از جمله EC، pH و SAR اعلام نمودند که به‌ترتیب ۴ و ۹۶ درصد از محدوده مورد مطالعه دارای آب مناسب و نسبتاً مناسب برای کشاورزی هستند (Kumari *et al.*, 2019).

برای نمونه، نقشه‌های مربوط به هر دو نیم‌سال، در سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۹ به‌عنوان شرایط ابتدایی و انتهای دوره‌ی بررسی شده و نیم‌سال اول سال ۱۳۹۵ به‌عنوان شرایط میانی دوره‌ی مورد بررسی در تحقیق حاضر، به‌ترتیب برای روش کریجینگ معمولی و کریجینگ شاخص در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در نقشه‌های پهنه‌بندی در شکل ۲ مشاهده می‌شود، pH آب‌های زیرزمینی استان مازندران در قسمت مرکزی استان در محدوده‌ی ۸-۶/۸ قرار دارد که وضعیت مطلوب pH برای رشد گیاهان منطقه است. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی نشان می‌دهند که درقسمت نوار غربی استان و قسمت بسیار کوچکی در انتهای شرقی استان، در زیر تالاب میانکاله در محدوده‌ی بیشتر از ۸ است که نشان دهنده‌ی وضعیت قلیایی آب‌های زیرزمینی در این نواحی است. نکته حائز اهمیتی که در نقشه‌های پهنه‌بندی شده نشان می‌دهد این است که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و تنها در کناره‌های غربی و شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شده است. از آنجایی که افزایش pH آب آبیاری برای مرکبات و گیاه برنج می‌تواند مشکل‌ساز باشد (Ghimire *et al.*, 2020; van Asten *et al.*, 2005)، پیشنهاد می‌گردد در این مناطق برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود. شایان ذکر است که تعیین میزان کود مورد نیاز، مستلزم تحقیقات جزئی و مزرعه‌ای می‌باشد.

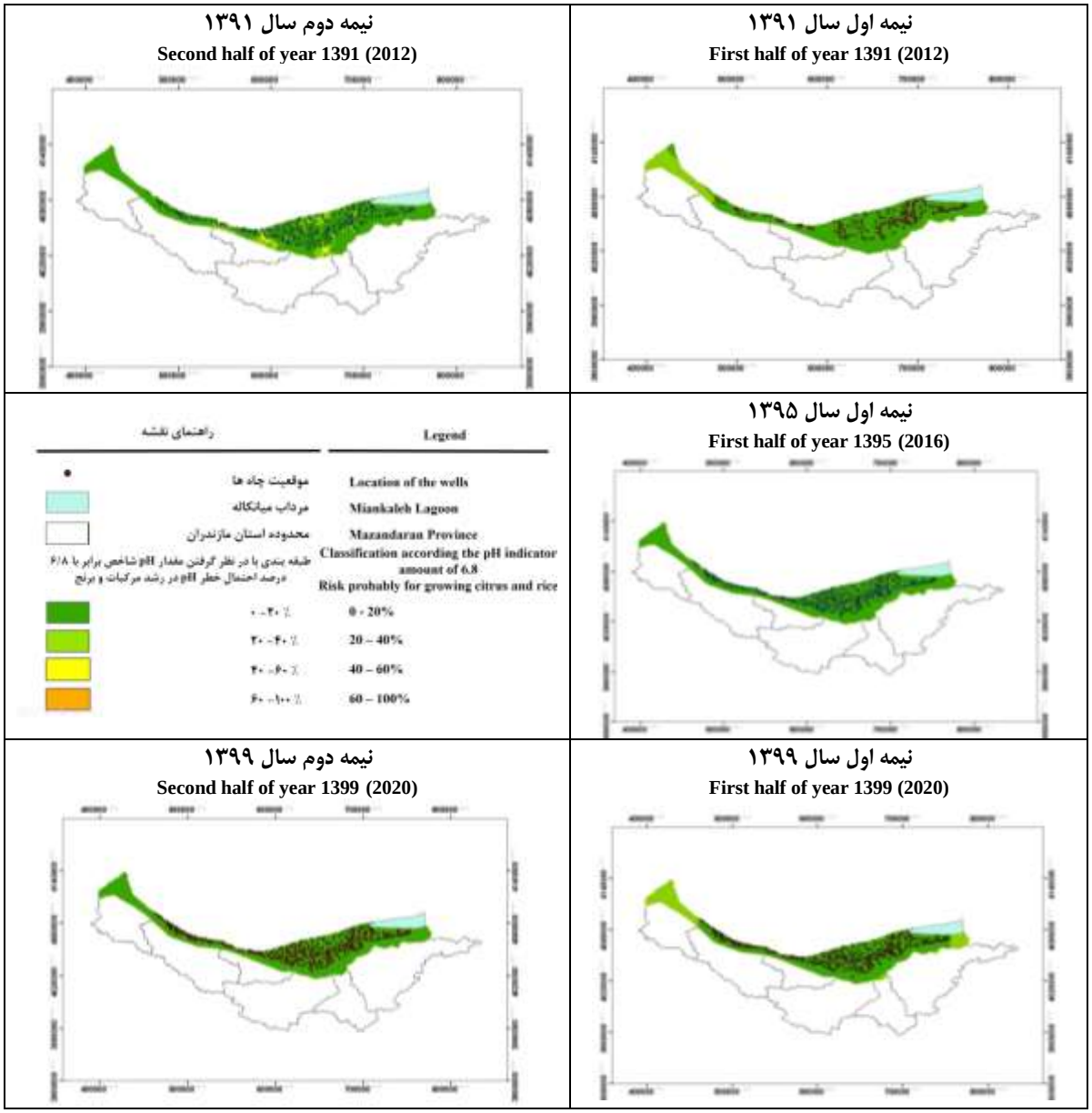
نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که در اکثر مناطق استان مازندران احتمال خطر آسیب‌پذیری براساس pH آب‌های زیرزمینی جهت آبیاری باغ‌های مرکبات و مزارع برنج منطقه در محدوده‌ی ۲۰-۰ درصد قرار دارد و در بخشی‌های بسیار کمی احتمال خطر به ۴۰-۲۰ درصد می‌رسد، که در قسمت‌های شرقی استان مشهودتر است. با توجه به نقشه‌های بدست آمده می‌توان نتیجه گرفت که بیشترین سطح استان در محدوده‌ی امن قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی وضعیت مطلوب pH آب‌های زیرزمینی استان برای آبیاری باغ‌های مرکبات و مزارع برنج است. اگرچه در نیمه‌ی دوم سال‌های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ احتمال خطر در محدوده‌ی ۶۰-۴۰ درصد در بعضی از مناطق مرکزی استان به‌صورت پراکنده مشاهده شده است، اما نقشه‌های بدست آمده در سال‌های بعد از آن نشان داد که روند خطر کاهشی بوده و در نهایت مساحت تحت این محدوده در آن سال‌ها صفر درصد برآورد شده است. با توجه به اینکه کریجینگ شاخص روشی است برای نشان دادن مناطق با احتمال خطر بیشتر است، در تحقیقات مختلف در زمینه‌ی بررسی کیفی آب‌های زیرزمینی با تعریف حد آستانه پارامترهای مورد بررسی از آن استفاده شده است که می‌توان به تحقیق انجام شده در زمینه بررسی وضعیت نیترات، EC، SAR شاخص کیفی آب (WQI) و عناصر مختلف در آب‌های زیرزمینی اشاره نمود (Chatterjee *et al.*, 2010; Sheikhy Narany *et al.*, 2013; Pouryazdankhah *et al.*, 2019).



شکل ۲- نمونه‌ای از نقشه‌های پهنه‌بندی pH در نوار ساحلی استان مازندران با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ معمولی در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1

Figure 2- Samples of the spatial maps depicting groundwater pH by the ordinary kriging method in ArcGIS 10.7.1

طی تحقیق انجام شده در منطقه‌ای در ایالت آندرا پرادش در هند، با استفاده از روش کریجینگ شاخص، پارامترهای کیفی آبهای زیرزمینی ۱۱۶ حلقه چاه از جمله، کلرید، منیزیم، فلوراید، TDS و pH برای مصارف شرب بررسی شدن، در تحقیق انجام شده نیز همان تحقیق حاضر، نیم‌تغییرنمای Exponential به عنوان بهترین نیم‌تغییرنما معرفی شد و درکل، نتیجه گرفته شد که روش‌های زمین‌آمار و GIS دارای قابلیت بالایی در زمینه‌ی تفسیر مسائل مربوط به منابع آب زیرزمینی است (Chandra and Sahoo, 2020). طی تحقیق انجام شده در بیرجند نیز، به‌منظور بررسی آبخوان بیرجند، اطلاعات جمع‌آوری شده از ۲۷ حلقه چاه مشاهده‌ای ازجمله pH، EC، SAR و شاخص اشباع لانژیلر (LSI)، طی سال ۱۳۹۵، جهت استفاده در کشاورزی و آبیاری با استفاده از روش کریجینگ شاخص مورد بررسی قرار گرفت، در این تحقیق روش کریجینگ شاخص را به‌عنوان روشی مناسب برای تهیه نقشه‌های احتمالی آلودگی، با در نظر گرفتن آستانه مجاز آلودگی دانستند و نتایج تحقیق نشان داد که اراضی مناسب آبیاری تحت فشار در قسمت‌های شرقی و مرکزی دشت می‌باشد (Hamraz *et al.*, 2019).



شکل ۳- نمونه‌ای از نقشه‌های پهنه‌بندی pH در نوار ساحلی استان مازندران با استفاده از روش میان‌یابی کریجینگ شاخص در نرم‌افزار ArcGIS 10.7.1

Figure 3- Samples of the spatial maps depicting groundwater pH by the indicator kriging method in ArcGIS 10.7.1

در تحقیق حاضر نیز در قسمت‌های مرکزی استان احتمال خطر بسیار کم است، پیشنهاد می‌گردد در قسمت‌های غربی استان مناطق به‌صورت جزئی‌تر و در مقیاس مزرعه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه بسیار از باغ‌های مرکبات با روش آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند، پارامترهای دیگر از جمله LSI آب‌های زیرزمینی استان با روش کریجینگ شاخص بررسی گردد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی وضعیت pH آب‌های زیرزمینی استان مازندران و طبقه‌بندی آن بر اساس حساسیت مرکبات و برنج، که کشت غالب در این استان است، انجام شد. بدین منظور از دو روش کریجینگ معمولی به‌منظور پهنه‌بندی وضعیت pH آب‌های زیرزمینی و از روش کریجینگ شاخص، به‌منظور بررسی احتمال خطر pH برای رشد مرکبات و برنج در منطقه، استفاده شد. یافته‌های حاصل از این

پژوهش نشان داد که pH آب‌های زیرزمینی در قسمت مرکزی استان در حد مطلوب برای رشد گیاهان و در محدوده‌ی ۸-۶/۲ قرار دارد. در قسمت‌های غربی و شرقی استان pH آب زیرزمینی در محدوده قلیایی و بیشتر از ۸ قرار داشتند که در صورت تداوم و افزایش مقدار pH می‌تواند برای باغ‌های مرکبات و مزارع برنج در این نواحی خطرپذیر باشد، از این‌رو احتمال آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج با در نظر گرفتن pH برابر با ۶/۲ به‌عنوان مقدار شاخص با روش کریجینگ شاخص بررسی شد. نقشه‌های بدست آمده نشان دادند که در بیشتر نیم‌سال‌های مورد بررسی احتمال خطر در محدوده‌ی ۲۰-۰ درصد قرار داشتند. مساحت تحت هر محدوده در هر دو روش برای هر ۱۸ نیم‌سال بدست آمد. در روش کریجینگ معمولی، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی ۵/۸ >، ۶/۲-۵/۸، ۲-۶/۸ و < ۸ به‌ترتیب برابر با صفر، ۰/۶، ۸۳/۵ و ۱۵/۹ درصد و در روش کریجینگ شاخص، میانگین درصد مساحت تحت کلاس‌های طبقه‌بندی با احتمال خطر آسیب‌پذیری ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۱۰۰-۶۰ درصد به‌ترتیب برابر با ۹۴/۹، ۴/۸، ۰/۳ و صفر درصد برآورد شد. در هردو روش OK و IK دو مدل نیم‌تغییرنمای برازش شده Stable و Exponential بیشترین فراوانی را در نیم‌سال‌های مورد بررسی داشتند. نقشه‌های حاصل از روش OK نشان داد که در هیچ منطقه‌ای pH آب زیرزمینی اسیدی نیست و تنها در کناره‌های غربی و شرقی استان شرایط قلیایی مشاهده شده است. با توجه به احتمال آسیب‌پذیری مرکبات و گیاه برنج درpHهای بالا در آب آبیاری، پیشنهاد می‌گردد در مناطق کناره‌های غربی و شرقی استان برای رشد بهتر گیاه برنج و عدم آسیب‌پذیری محصول به دلیل کمبود نیتروژن و فسفر، کودهای حاوی عناصر مذکور به مزارع افزوده شود که تعیین میزان کود مورد نیاز، مستلزم تحقیقات به‌صورت مزرعه‌ای است. همچنین با توجه به اینکه بسیار از باغ‌های مرکبات با روش آبیاری تحت فشار آبیاری می‌شوند، پیشنهاد می‌شود که پارامترهای دیگر به‌ویژه LSI آب‌های زیرزمینی استان با روش کریجینگ شاخص بررسی گردد.

سپاسگزاری

این پژوهش با حمایت مالی شرکت آب منطقه‌ای مازندران براساس قرارداد فی‌مابین آن شرکت و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به شماره: ۲۶/۹۸/۳۸۴۷/۱۱۳ مورخ ۱۳۹۸/۰۵/۱۰ و قرارداد داخلی به شماره: ۹۹/۲۰۴۲/ و مورخ ۱۳۹۹/۰۲/۲۳ با عنوان: "بررسی و ارزیابی مسایل مدیریت آب و ارایه راهکارهای ارتقاء و بهبود آن در استان مازندران" انجام شده است که به این وسیله سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Amiri-Bourkhani, M., Khaledian, M.R., Ashrafzadeh, A., & Shahnazari, A. (2017). The temporal and spatial variations in groundwater salinity in Mazandaran Plain, Iran, during a long-term period of 26 years. *Geofizika 34*(1): 119-139. https://doi.org/10.15233/gfz.2017.34.4.
2. Asghari, F.B., Mohammadi, A.A., Dehghani, M.H., & Yousefi, M. (2018). Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanjan, Iran. *Data in Brief* 18: 375. https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.03.059.
3. Belkhiri, L., Mouni, L., Sheikhy Narany, T., & Tiri, A. (2017). Evaluation of potential health risk of heavy metals in groundwater using the integration of indicator kriging and multivariate statistical methods. *Groundwater for Sustainable Development* 4: 12–22. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.10.003.
4. Bhunia, G.S., Keshavarzi, A., Shit, P.K., Omran, E.S.E., & Bagherzadeh, A. (2018). Evaluation of groundwater quality and its suitability for drinking and irrigation using GIS and geostatistics techniques in semiarid region of Neyshabur, Iran. *Applied Water Science 8*(6): 1-16. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0795-6.
5. Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco, R.F., & Konopka, A.E. (1994). Field- scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal 58*(5): 1501. https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.
6. Chandra, N.A., & Sahoo, S.N. (2020). *Indicator kriging approach using a GIS to classify groundwater quality parameters of east Godavari District*. Andhra Pradesh, India. In III Indian National Groundwater Conference on Groundwater Resources Management for Sustainable Development: Special Emphasis on Coastal and Urban Environment, CWRDM, Kozhikode, 18-20 February 2020. (http://hd1.handle.net/2080/3512).
7. Chatterjee, R., Tarafder, G., & Paul, S. (2010). Groundwater quality assessment of Dhanbad district, Jharkhand, India. *Bulletin of Engineering geology and the Environment 69(1)*: 137-141. https://doi.org/10.1007/s10064-009-0234-x.
8. Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J.A., Rodriguez-Galiano, V., Pardo-Igúzquiza, E., & Chica-Rivas, L. (2014). Categorical indicator kriging for assessing the risk of groundwater nitrate pollution: the case of Vega de Granada aquifer (SE Spain). *Science of the Total Environment* 470–471: 229–239. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.077.
9. Delbari, M., Amiri, M., & Motlagh, M.B. (2016). Assessing groundwater quality for irrigation using indicator

kriging method. *Applied Water Science 6*(4): 371–381. https://doi. org/10.1007/s13201-014-0230-6.
10. Emery, X. (2006). Ordinary multigaussian kriging for mapping conditional probabilities of soil properties. *Geoderma 132*(1–2): 75–88. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2005.04.019.
11. FAO. (2018). *Food and Agriculture Organization rice market monitor (RMM)*. Available at http://www.fao.org/economic/est/publications/ricepublications/rice-market-monitor-rmm/en/ (visited 27 April 2022).
12. Ghadami Firouzabadi, A. (2015). *The water use management and soil changes by full irrigation and partial rootzone drying (PRD) in sunflower*. Ph.D. Thesis, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran: 174p. (In Persian with English abstract).
13. Ghimire, L., Kadyampakeni, D., & Vashisth, T. (2020). Effect of Irrigation Water pH on the Performance of Healthy and Huanglongbing-affected Citrus. *Journal of the American Society for Horticultural Science 145*(5): 318-327. https://doi.org/10.21273/JASHS04925-20.
14. Goovaerts, P., Webster R., & Dubois, J.P. (1997). Assessing the risk of soil contamination in the Swiss Jura using indicator geostatistics. *Environmental and Ecological Statistics 4*(1): 49–64. https://doi.org/10.1023/A:1018505924603.
15. Grace, M.S. (2020). A Geospatial Analysis of Ground Water Quality Mapping using GIS in Sangareddy District. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* 9: 1150-1153. https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS070508.
16. Gunarathna, M.H.J.P., Kumari, M.K.N., & Nirmanee, K.G.S. (2016). Evaluation of interpolation methods for mapping pH of groundwater. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management and Applied Science* 3: 1-5.
17. Hamraz, B., Shahidi, A., & Khashei Saiyuki, A. (2019). Qualitative assessment of Birjand plain aquifer for pressurized irrigation by using geostatistic Indicator Kriging method. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage 13*(1): 34-44. (In Persian with English abstract)
18. Honma, T., Ohba, H., Kaneko-Kadokura, A., Makino, T., Nakamura, K., & Katou, H. (2016). Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains. *Environmental Science and Technology 50*(8): 4178-4185. https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05424.
19. Hosseini, S.S., & Rafiei, H. (2008). Investigation of citrus market behavior in Mazandaran province, case study of Sari. *Agricultural Economics 2*(4): 73-92. (In Persian with English abstract)
20. IRNA. (2021). *10 million cubic meters are extracted annually from illegal wells in Mazandaran*. The Islamic Republic News Agency, News Cod: 84206632, Reporter Code: 1045, date: 2021.02.01. available at https://www.irna.ir/news/84206632 (visited 14 May 2022). (In Persian)
21. Johnston, K., Ver Hoef, J.M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS geostatistical analyst 380*. Esri Redlands: 273p.
22. Karandish, F., & Shahnazari, A. (2014). Appraisal of the geostatistical methods to estimate Mazandaran coastal ground water quality. *Caspian Journal of Environmental Sciences 12*(1): 129-146.
23. Kharad, S.M., Rao, K.S., & Rao, G.S. (2010). *GIS based groundwater assessment model*, GIS@development, Nov–Dec 1999. https://doi.org/10.5897/AJEST11.134.
24. Kumari, M.K.N., Sakai, K., Kimura, S., Yuge, K., & Gunarathna, M.H.J.P. (2019). Classification of groundwater suitability for irrigation in the Ulagalla tank Cascade landscape by GIS and the analytic hierarchy process. *Agronomy 9*(7): 351. https://doi.org/10.3390/agronomy9070351.
25. Lee, J.J., Jang, C.S., Wang, S.W., & Liu, C.W. (2007). Evaluation of potential health risk of arsenic-affected groundwater using indicator kriging and dose response model. *Science of the Total Environment 384*(1–3): 151–162. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.021.
26. Omrani, S.J., Almasian, M., Poshtekohi, M., & Asa′di, R. (2003). *Geological Atlas (National Atlas of Iran)*. National Cartographic Center (Plan and Budget Organization): 110p. (In Persian)
27. Mishra, U., Lal, R., Slater, B., Calhoun, F., Liu, D., & Van Meirvenne, M. (2009). Predicting soil organic carbon stock using profile depth distribution functions and ordinary kriging. *Soil Science Society of America Journal 73*(2): 614–621. http://doi.org/10.2136/sssaj2007.0410.
28. Mohammadi, E., Rostami Ravary, A., & Fararouie, A. (2021). Salinity assessment and ground water quality mapping using principle component analysis, Case study: Khafr plain. *Water Resources Engineering*. (In Persian with English abstract)
29. Piccini, C., Marchetti, A., Farina, R., & Francaviglia, R. (2012). Application of indicator kriging to evaluate the probability of exceeding nitrate contamination thresholds. *International Journal of Environmental Research 6*(4): 853–862. https://doi.org/10.22059/ijer.2012.556.
30. Pouryazdankhah, H., Shahnazari, A., Ahmadi, M.Z., Khaledian, M., & Andersen, M.N. (2019). Rice yield estimation based on forecasting the future condition of groundwater salinity in the Caspian coastal strip of Guilan Province, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment 191*(8): 1-16. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7613-y.

31. Shabani, M. (2009). Determination of most sutible geostatistical method for the pH and TDS mapping of groundwater resources (Case study: The Arsanjan plain). *Water Engineering 1*(1): 47-57 (In Persian with English abstract)
32. Sheikhy Narany, T., Firuz Ramli, M., Zaharin Aris, A., Azmin Sulaiman, W.N., & Fakharian, K. (2013). Spatial assessment of groundwater quality monitoring wells using indicator kriging and risk mapping, Amol-Babol Plain, Iran. *Water 6*(1): 68-85. https://doi.org/10.3390/w6010068.
33. Shit, P.K., Bhunia, G.S., & Maiti, R. (2016). Spatial analysis of soil properties using GIS based geostatistics models. *Modeling Earth Systems and Environment 2*(2): 1-6. http://dx.doi.org/10.1007/s40808-016-0160-4.
34. Statistical Center of Iran. (2011). *Selected findings of the 2011 national population and housing census*. Available at www.amar.org.irde/.
35. Todd, D.K., & Mays, L.W. (2004). *Groundwater hydrology*. John Wiley & Sons.
36. van Asten, P.J., Van Bodegom, P.M., Mulder, L.M., & Kropff, M.J. (2005). Effect of straw application on rice yields and nutrient availability on an alkaline and a pH-neutral soil in a Sahelian irrigation scheme. *Nutrient Cycling in Agroecosystems 72*(3): 255-266. http://doi.org/10.1007/s10705-005-3108-z.
37. Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., & Gazni, R. (2009). Evaluation and comparison of ordinary kriging and inverse distance weighting methods for prediction of spatial variability of some soil chemical parameters. *Research Journal of Biological Sciences 4*(1): 93–102. https://medwelljournals.com/abstract/?doi=rjbsci.2009.93.102.
38. Yousefian, M., Soltani, A., Dastan, S., & Ajamnoroozi, H. (2019). Documenting production process and the ranking factors causing yield gap in rice fields in Sari, Iran. *Iran Agricultural Research 38*(1): 101-109. https://doi.org/10.22099/iar.2019.5316.
39. Ziogas, V., Tanou, G., Morianou, G., & Kourgialas, N. (2021). Drought and salinity in citriculture: optimal practices to alleviate salinity and water stress. *Agronomy 11*(7): 1283. https://doi.org/10.3390/agronomy11071283.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 561-577

Evaluation and Variability of Flood-Oriented Health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from Watershed Management Structures

S.H.R. Sadeghi[1*], M. Tavosi[2], S. Zare[3], V. Beiranvandi[4], H. Shekohideh[5], F. Akbari Imamzadeh[6], M. Bahlekeh[7], F. Khurshid Sokhangouy[8], R. Chamani[9]

Received: 11-08-2022
Revised: 30-09-2022
Accepted: 11-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Sadeghi, S.H.R., Tavosi, M., Zare, S., Beiranvandi, V., Shekohideh H., Akbari Imamzadeh, F., Bahlekeh, M., Khurshid Sokhangouy, F., Chamani, R. (2022). Evaluation and Variability of Flood-Oriented Health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from Watershed Management Structures. *Journal of Water and Soil 36*(5): 561-577. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.78150.1190

Introduction

Currently, many disasters threaten the health of ecosystems. The pressures caused by extensive human interventions and the unprincipled exploitation of natural resources have led to the degradation of natural resources and the structure and functioning of ecosystems. Hence, evaluating the consequences of human intervention in nature and meeting the growing need of humans to receive diverse services has made it necessary to evaluate the performance of watershed ecosystems in providing different services. Healthy watersheds play an important role in providing a wide variety of ecosystem services. Therefore, watershed health monitoring and evaluation is vital for the conservation of ecosystems and achieving the optimal level of services. In such a way a suitable collaborative and executive approach is established between research and watershed management. In this connection, watershed health analysis can provide valuable help in achieving the goals of integrated management of watersheds and, of course, the balance between the needs of human societies and ecosystems. However, the assessment of the health and sustainability of the watershed affected by human activities has not been sufficiently documented yet.

Materials and Methods

The current pilot research has evaluated the health of the Shiraz Darwazeh Quran Watershed in Fars Province, Iran, and the effect of existing watershed management structures in the region on the health of the watershed with a focus on floods. For this purpose, 36 key criteria from a set of climatic, anthropogenic, and hydrologic factors were identified based on the conditions of the region and the analysis of the flood occurrence process in the watershed. The selected criteria were then categorized into the three indices of pressure (P), state (S), and response (R). After screening the selected criteria in exploring the conceptual approach of pressure, state, and response (PSR), the health status was evaluated in two cases with and without watershed management structures.

Results and Discussion

The results showed that the health condition without considering the watershed management structures was at average conditions with health index of 0.55. In addition, the results of the watershed health assessment verified the non-significant effects of stone and mortar structures on improving watershed health. So that, the health conditions was remained at average status with health index of 0.53. Therefore, it can be acknowledged that the existing watershed management structures, due to the limited both number and spatial coverage, have not been

1- Professor Department of Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University
(*- Corresponding Author Email: sadeghi@modares.ac.ir)
2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 and 9- Ph.D. Students of Watershed Science and Engineering, Tarbiat Modares University

able to noticeably affect the improvement of the general conditions of the watershed, despite the effect on the factors affecting the health of the sub-watersheds where the structures have been constructed. The spatial changes of the calculated variables showed that the abandoned lands, time of concentration, area under military activities, surface of sensitive formations to erosion, high density of the drainage network, density of the roads, areas of regions with high potential in producing runoff and sediment, and size of the residential areas were the most important factors affecting the health situation of the Darwazeh Quran Watershed.

Conclusion

According to the results of the analysis of the indicators and criteria considered in evaluation of the health of the Shiraz Darwazeh Quran Watershed based on the PSR approach, it was found that the watershed had an average health status. Therefore, it can be acknowledged that the existing watershed management structures have not been able to impose a noticeable effect on the prosperity and improvement of watershed health conditions. In general, it can be said that abandoned lands, short concentration time, military activities, the presence of formations sensitive to erosion, high density of drainage network and road, and the potential of high runoff and sediment production, and the size of residential areas are among the most important factors affecting the declining the health of Darwazeh Quran Watershed. Therefore, it is necessary to pay further attention to the aforesaid factors by conducting periodical monitoring with more comprehensive data, in time and also analyzing the trend of relative changes of the indicators in order to explain the adaptive and intelligent management of the watershed. The necessary measures should also be taken into account simultaneously. Therefore, it is suggested to turn the weak points of the region into strong points by applying bioengineering measures and use the opportunities in the region such as the potential of tourism and ecological features in order to improve the health status of the watershed.

Keywords: Fars province, Health degree, Watershed adaptive management, Watershed health criteria, Watershed sustainability

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۵۷۷-۵۶۱

ارزیابی و تغییرپذیری سیل‌محورِ سلامتِ حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز از سازه‌های آبخیزداری

سیدحمیدرضا صادقی[۱*]- محمد طاوسی[۲]- سمیه زارع[۳]- وحید بیرانوندی[۴]- هنگامه شکوهیده[۵]- فاطمه اکبری امام‌زاده[۶]- مرجان بهلکه[۷]- فائزه خورشید سخن‌گوی[۸]- رضا چمنی[۹]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۹

چکیده

در حال حاضر خطرات زیادی سلامت بوم‌سازگان را تهدید می‌کند. تنش‌های ایجادشده ناشی از دخالت‌های گسترده انسان و بهره‌برداری غیراصولی از منابع طبیعی، منجر به تخریب منابع طبیعی و ساختار و عملکرد بوم‌سازگان شده است. از این‌رو، ارزیابی پیامدهای ناشی از دخالت انسان در طبیعت و تأمین نیاز روزافزون انسان به دریافت خدمات متنوع، بیش‌ازپیش ارزیابی عملکرد آبخیزها را ضروری ساخته است. حوزه‌های آبخیز سالم نقش مهمی در ارائه انواع گسترده‌ای از خدمات بوم‌سازگان دارند. بنابراین پایش و ارزیابی سلامت حوزه آبخیز برای حفاظت بوم‌سازگان‌ها و دستیابی به سطح بهینه از خدمات است. به‌نحوی‌که به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی و اجرایی مناسب بین پژوهش و مدیریت حوزه آبخیز محسوب می‌شود. در همین ارتباط تحلیل سلامت حوزه آبخیز می‌تواند کمک شایانی در راستای رسیدن به اهداف مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز و همچنین تعادل بین نیازمندی‌های جوامع انسانی و شرایط بوم‌شناختی ارائه نماید. حال آن‌که ارزیابی سلامت و پایداری حوزه آبخیز و متأثر از فعالیت‌های انسانی به حد کفایت موردتوجه قرار نگرفته است. ازاین‌رو پژوهش الگویی حاضر به ارزیابی سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز و اثر سازه‌های آبخیزداری موجود در منطقه، بر سلامت آبخیز با محوریت سیلاب پرداخته است. برای این منظور بر اساس شرایط منطقه و تحلیل فرآیند وقوع سیل در منطقه، ۳۶ معیار کلیدی از مجموعه عوامل اقلیمی، انسانی و هیدرولوژی در قالب شاخص‌های فشار (P)، حالت (S) و پاسخ (R) شناسایی شد. پس از غربال معیارهای منتخب در کنکاش رویکرد مفهومی فشار، حالت و پاسخ (PSR)، در دو حالت با و بدون وجود سازه‌های آبخیزداری سلامت ارزیابی شد. نتایج نشان داد که شاخص سلامت حوزه آبخیز موردمطالعه بدون در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری برابر ۰/۵۵ و شرایط متوسط بوده است. همچنین نتایج ارزیابی سلامت آبخیز با لحاظ سازه‌های اصلاحی سنگی‌سیمانی نیز مؤید عدم تأثیر معنی‌دار بر سلامت کل آبخیز بوده به‌نحوی‌که شاخص سلامت با مقدار ۰/۵۳ همچنان در وضعیت متوسط قرار داشته است. بنابراین می‌توان اذعان داشت که سازه‌های آبخیزداری موجود به سبب محدودیت تعداد و پوشش مکانی محدود علی‌رغم تأثیر بر عوامل مؤثر بر سلامت زیرآبخیزهای موردنظر، نتوانسته است بر بهبود شرایط کلی آبخیز تأثیر محسوسی داشته باشد. تغییرات مکانی متغیرهای محاسبه‌شده نشان داد که اراضی رهاشده، زمان تمرکز، گستره تحت فعالیت‌های نظامی، سطح سازندهای حساس به فرسایش، تراکم بالای شبکه زه‌کشی، تراکم جاده، پتانسیل تولید رواناب و رسوب بالا و وسعت مناطق مسکونی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر وضعیت سلامت آبخیز دروازه قرآن محسوب می‌شوند. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در تبیین ارزیابی سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن و تصمیم‌گیری در خصوص اتخاذ بهترین اقدامات مدیریتی و پیش‌بینی برنامه‌های اجرایی آینده منطقه مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: استان فارس، پایداری آبخیز، درجه سلامت، مدیریت سازگار آبخیز، معیار سلامت آبخیز

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

(*- نویسنده مسئول: Email: Sadeghi@modares.ac.ir)

۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸ و ۹- دانشجویان دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه تربیت مدرس

DOI: 10.22067/JSW.2022.78150.1190

مقدمه

امروزه خطرات بسیاری سلامت بوم‌سازگان را تهدید می‌کند. فشارهای وارده در اثر فعالیت‌های گسترده انسان و بهره‌برداری غیراصولی از منابع طبیعی، تخریب منابع را به دنبال داشته و ساختار و عملکرد بوم‌سازگان را تغییر داده است (Sadeghi and Hazbavi, 2016; Sadoddin *et al.*, 2016). حوزه‌های آبخیز سالم نقش مهمی در ارائه طیف وسیعی از خدمات بوم‌سازگان، مانند چرخه مواد مغذی، تصفیه آب، زیستگاه، کنترل فرسایش و رسوب، کنترل سیل و اقلیم دارند (Hazbavi *et al.*, 2018). بنابراین ارزیابی و پایش سلامت حوزه آبخیز گامی مهم و بنیادی برای حفاظت بهینه بوم‌سازگان‌ها محسوب می‌شود و به‌عنوان یک رویکرد تلفیقی مناسب بین پژوهش و مدیریت حوزه آبخیز در نظر گرفته می‌شود (Hazbavi and Sadeghi, 2016b). با انجام ارزیابی و پایش سلامت علاوه بر اطلاع از هشدارهای اولیه تخریب محیط‌زیست، علت مشکلات موجود نیز شناسایی می‌شود (Hazbavi *et al.*, 2017). مفهوم سلامت بوم‌سازگان به‌عنوان مبنای ثبات و پایداری در تداوم حفظ شرایط تعادلی و ارائه خدمات در حد بهینه توانایی آن موردنظر مدیران آبخیز قرار گرفته است. به طور کلی سلامت بوم‌سازگان و روش‌های ارزیابی آن در محیط‌ها و فرایندهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌نحوی‌که هم اکنون ارزیابی سلامت بوم‌سازگان به یکی از اولویت‌های اساسی پژوهش‌گران و مدیران تبدیل شده است (Sadeghi *et al.*, 2019).

در دهه اخیر رویکردهای مختلفی برای ارزیابی سلامت آبخیز مورداستفاده قرارگرفته است. یکی از این رویکردها استفاده از رویکرد شاخص‌محور و مفهومی فشار، حالت و پاسخ[1] (PSR) است. رویکرد PSR با سامان‌دهی معیارها در قالب شاخص‌های جامع فشار، حالت و پاسخ توانسته است سلامت بوم‌سازگان را با درنظرگرفتن تمامی شرایط سامانه تعیین کند (Hazbavi *et al.*, 2018). در همین راستا یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2015) اثر عملیات اصلاحی و احیا را بر سلامت بوم‌سازگان تالاب Yellow River Delta واقع در چین با تحلیل رویکرد PSR بررسی نمودند. نتایج نشان‌دهنده ناسالم بودن تالاب با مقدار شاخص جامع ارزیابی سلامت برابر با ۰/۵۹ بوده است. آن و کیم (Ahn and Kim, 2017) در پژوهشی به ارزیابی سلامت آبخیز برای ارزیابی حفاظت و تعیین اولویت‌ها در رودخانه Han در کره جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد که سلامت زیرآبخیزها طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ کاهش یافته است. مالیا و همکاران (Mallya *et al.*, 2018) به ارزیابی اقدامات چندمنظوره از سلامت آبخیز از منظر کیفیت آب پرداختند. نتایج نشان داد که مقادیر سلامت آبخیز ازلحاظ غلظت رسوب معلق و نیتروژن در آبخیز رودخانه می‌سی‌سی‌پی فوقانی افزایش یافته است. رانی و همکاران (Rani *et al.*, 2019) به بررسی سلامت و پویایی بوم‌سازگان بر اساس شاخص تغییرات جهانی اقلیم پرداختند. آن‌ها بیان کردند که تغییرات غیرطبیعی در الگوی اقلیم می‌تواند سلامت بوم‌سازگان از طریق از بین رفتن گونه‌ها، انقراض گونه‌ها، مهاجرت گونه‌ها و تغییر در الگوی رفتاری را تغییر دهد. آن و همکاران (Ahn *et al.*, 2019) ارزیابی سلامت، آسیب‌پذیری و پتانسیل احیا آبخیز برای تعیین اولویت‌های حفاظت برای آبخیز رودخانه Han در کره جنوبی را موردبررسی قراردادند. درنهایت ۶۷ آبخیز از ۲۳۷ آبخیز موردمطالعه دارای اولویت‌های احیا با پتانسیل‌های بالا تشخیص داده شدند. ژانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2020) به ارزیابی وضعیت سلامت چرخه آب بر اساس مدل ابری[2] در ۱۳ شهر از محدوده Beijing-Tianjin-Hebei در چین پرداختند. بر اساس داده‌های آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴، میانگین توزیع درجه سلامت چرخه آب در محدوده موردمطالعه در طبقه‌های ناسالم، نسبتاً ناسالم، متوسط، نسبتاً سالم و سالم به ترتیب برابر با ۲۸، ۱۶، ۳۴، ۱۳ و ۹ درصد بود. هم‌چنین نتایج نشان داد که محدوده مورد بررسی به‌طورکلی در وضعیتی ناسالم قرار داشته که در آن ویژگی کمّیت آب بدترین وضعیت و ویژگی استفاده از آب بهترین وضعیت را به خود اختصاص داده‌اند. اخیراً لیو و همکاران (Liu *et al.*, 2022) در Tianjin چین، به مطالعه جامع منطقه منبع الگوهای امنیت بوم‌شناسی[3] از جنبه‌های عملکردی و چشم‌انداز پرداختند. ابتدا از رویکرد فشار-حالت-پاسخ برای ارزیابی کیفیت محیط زیست تحت تأثیر عوامل اجتماعی-اقتصادی-طبیعی استفاده شد. در مرحله دوم، ساختار بوم شناسی با ترکیب تحلیل الگوی فضایی ریخت شناسی و شاخص اتصال منظر ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مساحت کل منابع بوم‌شناسی شناسایی‌شده توسط رویکرد PSR در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۸/۸۸، ۱۶/۰۸ و ۱۵/۲۸ درصد از کل منطقه را تشکیل می‌دهد. درنهایت بررسی‌ها نشان داد که رویکرد PSR بر اساس معیارهای فشار، حالت و پاسخ می‌تواند به‌عنوان ابزار مدیریتی مطمئنی برای شناسایی و دسته‌بندی مشکلات و مسائل حوزه‌های آبخیز استفاده شود. حزباوی و صادقی (Hazbavi and Sadeghi, 2016a) طی یک مطالعه مروری سلامت آبخیز، استفاده از مدل PSR را به‌عنوان ابزار مدیریتی مطمئن و مناسب برای بررسی مسائل حاکم بر حوزه‌های آبخیز کشور توصیه نمودند. همچنین حزباوی و همکاران (Hazbavi *et al.*, 2018) کاربرد رویکرد

1- Pressure-State-Response

2- Cloud Model

3- Ecologic Security

مفهومی سلامت آبخیز مبتنی بر شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ در حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی در چهار سال ۱۳۶۵، ۱۳۷۷، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ را مورد ارزیابی قراردادند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، وضعیت آبخیز شازند بر اساس رویکرد PSR نسبتاً ناسالم ارزیابی شد و توزیع زمانی آن در سال‌های مختلف یکسان نبوده است. سعدالدین و همکاران (Sadoddin *et al.*, 2017) یک چارچوب عملیاتی برای ارزیابی جامع وضعیت سلامت و پایداری آبخیزهای کشور معرفی نمودند. بدین ترتیب امکان مقایسه آبخیزها و تعیین اولویت آن‌ها در راستای طرح‌ریزی اقدامات مدیریتی به منظور بهبود وضعیت سلامت و پایداری آبخیزها ارزیابی شد. مؤمنیان و همکاران (Momenian *et al.*, 2018) به ارزیابی و اولویت‌بندی زیرآبخیزهای قطورچای بر اساس درجه سلامت آبخیز واقع در شهرستان خوی در استان آذربایجان غربی پرداختند. نتایج اولویت‌بندی شاخص‌ها نشان داد که وضعیت سلامت تمامی زیرآبخیزها متوسط بوده است. صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2019) به بررسی اثرات متقابل فعالیت‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی بر سلامت حوزه آبخیز شازند در استان مرکزی پرداختند. هیچ یک از زیرآبخیزها در سال‌های موردمطالعه به صورت سالم ارزیابی نشد. به‌نحوی‌که وضعیت سلامت آبخیز در دوره‌های ۱۹۸۶–۱۹۹۸ و ۱۹۸۶–۲۰۰۸ به دلیل تأثیر صنعتی‌شدن و توسعه شهری حدود ۴ درصد کاهش داشته‌است. درحالی‌که وضعیت سلامت در سایر دوره‌های مطالعاتی از بهبود معنی‌داری برخوردار نبوده‌است. حزباوی و همکاران (Hazbavi *et al.*, 2020) ارزیابی سلامت آبخیز کوزه‌تپراقی در استان اردبیل در ۳۶ زیر آبخیز با استفاده از تحلیل ۲۷ معیار با رویکرد مفهومی PSR را انجام دادند. درجه‌های مختلف سلامت آبخیز در پنج طبقه سالم، نسبتاً سالم، متوسط، نسبتاً ناسالم و ناسالم طبقه‌بندی شدند. بر اساس نتایج مشخص شد که ازنظر کلی آبخیز دارای وضعیت متوسط ازلحاظ سلامت بوده است. هم‌چنین، حزباوی و همکاران (Hazbavi *et al.*, 2020) بر اساس یک مطالعه مروری و نیز مطالعه موردی در حوزه آبخیز شازند واقع در استان مرکزی، استفاده از مدل مفهومی PSR درزمینه ارزیابی سلامت آبخیزهای ایران به‌عنوان رویکردی مناسب و قابل توسعه را پیشنهاد دادند. زیرا این مدل می‌تواند سلامت آبخیز را بر اساس مهم‌ترین شاخص‌های بوم‌شناختی ارزیابی کند و نتایج آن توسط مدیران، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران حوزه منابع طبیعی به‌عنوان ابزار مدیریتی مطمئن و مناسب برای بررسی مسائل حاکم بر آبخیزهای کشور قابل درک است. ابراهیمی‌گت‌کش و صادقی (Ebrahimi Gatkash and Sadeghi, 2022) در حوزه آبخیز میخ‌ساز در غرب مازندران مبادرت به شناخت مشکلات آبخیز با استفاده از مدل مفهومی PSR و تعیین راهبرد مطلوب برای مدیریت مشکل با استفاده از تحلیل SWOT کردند. سپس راهبردهای مناسب مدیریت سازگار آبخیز مذکور با توجه به مشکلات شناسایی‌شده و تحلیل SWOT ارائه شد. اخیراً نیز در همین ارتباط صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2022)، سلامت حوزه آبخیز پیشکوه در استان یزد با استفاده از چارچوب PSR را ارزیابی و پهنه‌بندی آبخیز مذکور با توجه به میزان زیاد دخالت‌های انسانی را ارائه کردند.

بررسی پیشینه پژوهشی مرتبط با ارزیابی سلامت آبخیز دلالت بر توانمندی رویکرد علت–معلولی PSR در مقوله‌های مختلف داشته است. حال آن‌که کاربرد رویکرد مذکور در تحلیل و ارزیابی سیل‌محور[1] در آبخیزهای حساس و پرچالش موردتوجه قرار نگرفته است. بنابراین پژوهش حاضر باهدف کاربست رویکرد مفهومی PSR در ارزیابی سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز و مبتنی بر مشکل اصلی وقوع سیل در فروردین ۱۳۹۸ و تحلیل اثر نسبی سازه‌های آبخیزداری احداث‌شده در این حوزه آبخیز بر تغییر سلامت آبخیز انجام شد. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در ارزیابی سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن و تصمیم‌گیری در خصوص تبیین شیوه‌نامه بهترین اقدامات مدیریتی[2] در آبخیز مذکور و سایر مناطق مشابه مورداستفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

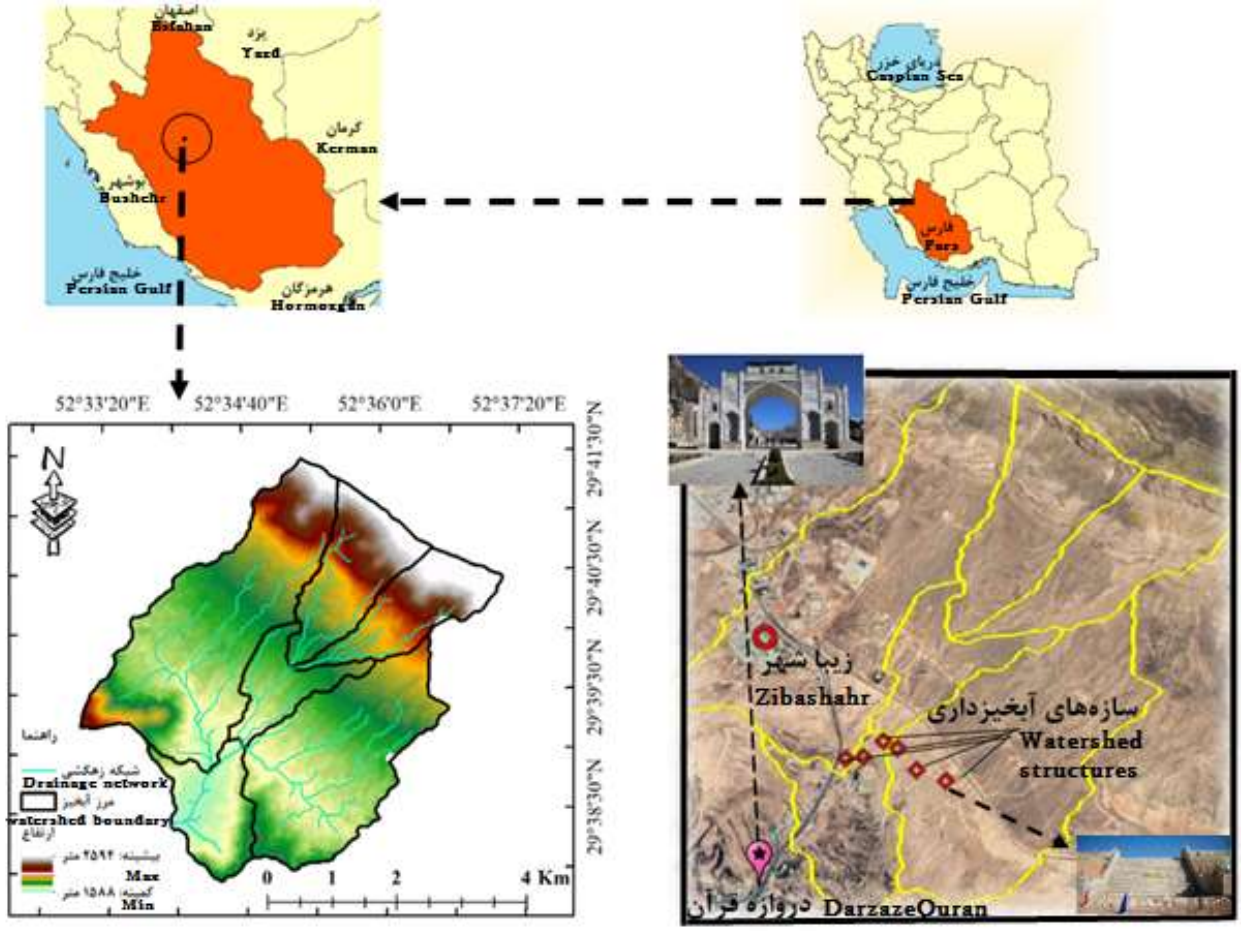
منطقه موردمطالعه

حوزه آبخیز دروازه قرآن (تنگ الله‌اکبر) از توابع استان فارس، در بخش مرکزی شهرستان شیراز قرار دارد. آبخیز مذکور با مساحت ۲۷۰۸/۸ هکتار در شمال شهرستان و مشرف بر شهر شیراز واقع‌شده است. این محدوده از شمال به پارک ملی بمو، از جنوب به شهر شیراز، از شرق به دره انجیری و کوه خرفتخانه و از غرب به شهرک زیباشهر (اکبرآباد) منتهی می‌شود. راه‌های اصلی دسترسی به محدوده از طریق محورهای شیراز–مرودشت و شیراز–خرامه است. بیش‌ترین ارتفاع در محدوده موردمطالعه ۲۶۳۲ متر و کم‌ترین ارتفاع ۱۵۹۹ متر از سطح دریاست. حوزه آبخیز دروازه قرآن دارای مناطق مسکونی در حاشیه رودخانه و شهری، محدوده‌های نظامی و پادگان‌ها، بزرگراه و اراضی تخریب‌شده در حاشیه جاده، اراضی زراعی و مراتع است. نمایی عمومی از آبخیز مذکور در شکل ۱ نشان داده‌شده است. آبخیز مذکور به سبب بروز سیل در بهار ۱۳۹۸ و خسارات جانی و مالی جدی ایجاد کرده موردتوجه بسیاری از مجامع علمی و اجرایی قرارگرفته و ضرورت انجام بررسی‌های گسترده در ابعاد مختلف را به‌خوبی توجیه می‌نماید. در همین راستا پس از وقوع سیلاب در سال ۱۳۹۸ شش سازه سنگی‌سیمانی با مشخصات مندرج در جدول ۱ و باهدف اصلی کنترل سیلاب در پایین‌دست محدوده مطالعاتی احداث‌شده است (Absar Fars Consulting Engineers, 2020).

1- Flood based Approach
2- Best Management Practices (BMP)

ارزیابی سلامت آبخیز

برای ارزیابی سلامت آبخیز دروازه قرآن شیراز از رویکرد علت-معلولی فشار-حالت-پاسخ (PSR) به سبب تجربه مناسب در کاربست، سهولت استفاده و عدم نیاز به حدود آستانه خاص استفاده شد. رویکرد مفهومی PSR توسط OCED (1993 and 2001) طبق شکل ۲ طراحی‌شده است. این رویکرد، موضوع نظام‌مند شاخص‌های پایداری محیط‌زیستی را برای اولین بار موردتوجه قرار داد. چارچوب اولیه PSR مبتنی بر چارچوب فشار-پاسخ بود که برای تحلیل بوم‌سازگان توسعه داده‌شده بود (Esty *et al.*, 2005). PSR یک رویکرد مفهومی و شامل سامانه ارتباطی بین سه شاخص فشار، حالت و پاسخ است و به‌صورت عمده به‌عنوان ابزاری برای مدل‌سازی سامانه‌های انسانی و طبیعی به کار می‌رود که درواقع از ارتباطات علّت و معلولی و به‌منظور ارتباط دادن عامل‌های محیطی، اقتصادی و اجتماعی استفاده می‌کند (Hazbavi *et al.*, 2020). منظور از شاخص فشار برای ارزیابی سلامت آبخیز شامل نیروهای محرکه مستقیم و غیرمستقیم ناشی از فعالیت‌های انسانی و طبیعی است که باعث تغییرات محیط می‌شوند. درحالی‌که شاخص حالت وضعیت و حالت فیزیکی، شیمیایی و زیستی محیط طبیعی به‌علاوه وضعیت سلامت و رفاه انسان و درنهایت هرگونه پاسخ یا تغییر در اثر اعمال فشارهای وارده را نشان می‌دهد (Hazbavi *et al.*, 2018). در این مطالعه به‌منظور تفکیک میزان اثر معیارهای مختلف بر وقوع سیل در منطقه مطالعاتی و امکان مدیریت مناسب و کمک به تصمیم‌گیرندگان در هر یک از معیارهای ارزیابی شاخص‌های اصلی رویکرد مفهومی PSR از سه دسته عوامل اقلیمی، انسانی، هیدرولوژی و منطبق بر جدول ۲ استفاده شد. به‌منظور ارزیابی نقش اقدامات سازه‌ای انجام‌شده در مؤلفه‌های مرتبط با مقوله سیل و سپس مؤثر بر سلامت آبخیز دروازه قرآن، ابتدا رویکرد مفهومی PSR بدون لحاظ اقدامات و مجدداً پس از منظور نمودن نقش اقدامات انجام‌شده در معیارهای ارزیابی سلامت مورداستفاده قرار گرفت. فرآیند اجرایی و کلیات روش پژوهش در شکل ۲ نمایش داده‌شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز و جانمایی سازه‌های آبخیزداری

Figure 1- Geographical location of the Shiraz Darwazeh Quran Watershed and location of watershed management structures

جدول ۱- مشخصات سازه‌های آبخیزداری موجود در حوزه آبخیز دروازه قرآن

Table 1- Characteristics of existing watershed management structures in the Shiraz Darwazeh Quran Watershed

شماره سازه Structure No.	جنس بدنه Body Material	نوع سرریز Spillway type	ارتفاع مفید سرریز Effective height of spillway (m)	حجم مخزن Reservoir volume (m^3)	هزینه اجرایی Implementation cost (billions of Iranian Rial)	سال اجرا Year of implementation
1	سنگی و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	10	194246	29	
2	سنگ و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	10	101390	37	
3	سنگ و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	10	45245	16	1398
4	سنگ و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	7	47149	26	
5	سنگ و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	8	36762	35	
6	سنگ و ملاتی Stone and mortar	پلکانی Staircase	8	55604	22	

محاسبه شاخص‌های فشار، حالت، پاسخ

از آنجایی‌که در مفهومی PSR، منظور از فشار تنش‌هایی است که به صورت انسانی و یا عیرانسانی و به صورت مستقیم و غیرمستقیم و در ابعاد مختلف اقلیمی، هیدرلوژیکی، انسانی به حوزه‌آبخیز وارد می‌شود. این در حالی است که حالت وضعیت آبخیز را متاثر از فشارهای وارده تشریح می‌کند و پاسخ هر گونه تغییری است که در اثر فشارهای وارده بر آبخیز ایجاد می‌شود و الزاماً محدود به پاسخ‌های رفتارهای انسانی در قبال فشارهای وارده و یا حالت‌های منتج از آن نیست (Hazbavi *et al.*, 2020). بنابراین عوامل مورد استفاده برای هر یک از شاخص‌های فشار، حالت و یا پاسخ صرفاً انسانی نیستند و ممکن است در دسته‌های مختلف اقلیمی، هیدرولوژی و زمین‌شناسی و انسانی تقسیم‌بندی شوند. طبیعی است برخی از این عوامل در ذات یک آبخیز نهفته است و وجود یا عدم وجود آن‌ها به اختیار انسان نیست و لذا ممکن است به عنوان یک توان‌مندی ذاتی برای بهبود و یا حتی آسیب‌رسانی سلامت آبخیز تلقی شود. بنابراین برای تعیین عوامل موثر بر سلامت آبخیز و مبتنی بر رویکرد PSR، جمیع عوامل مورد بررسی قرار می‌گیرند و این مورد در مرور عوامل مورداستفاده در پژوهش مدنظر قرار گرفته است. به عنوان مثال وسعت سازندهای حساس به فرسایش یک ویژگی ذاتی منطقه است که سلامت آبخیز را نسبت به منطقه فاقد سازند حساس به فرسایش متأثر می‌کند. شاید وسعت این سازند تغییر نکند اما می‌تواند تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی میزان فرسایش بیش‌تر شود. یا میزان رسوب حاصله از آن‌ها بر وضعیت اراضی پایین‌دست تاثیر بگذارد. اراضی سنگی اگرچه مساحت آن‌ها تغییر نمی‌کند و تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی نیستند اما در هنگام بارندگی سبب تشکیل رواناب شده و در پایین‌دست تشدید فرسایش‌ها را به دنبال دارند. همچنین اراضی با غالبیت برون‌زدگی سنگی ممکن است بسته به لایه‌بندی، جنس و حتی تراکم پراکنش بر وضعیت نفوذ آب به داخل زمین و تغییر ذخیره سفره‌های آب زیرزمینی تأثیر بگذارد. برخی از متغیرها صرفاً تحت تاثیر فعالیت‌های انسانی نیستند و عملکرد ذاتی آن‌ها مورد نظر است. شکل آبخیز، مجموع طول آبراهه‌ها و از این قبیل معیارها نیز از دسته عوامل هیدرولوژی مؤثر بر متغیر مطالعاتی پژوهش (سیل) هستند که قرار نیست تغییرپذیری آن‌ها توسط انسان مورد بررسی قرار گیرد بلکه هدف بررسی اثر معیارهای عامل هیدرولوژی و تأثیر آن‌ها بر سلامت آبخیز است. طبیعی است نتایج ارزیابی مزبور به مدیر آبخیز و سیاست‌گذار کمک می‌کند تا مهارپذیری عوامل مزبور از ویژگی‌های ذاتی را ارزیابی نماید. طبیعی است در حالت اول اقدامات مهار و یا مدیریت سیلاب در اولویت اقدامات قرار می‌گیرد حال‌آن‌که در شرایط ذاتی رویکرد سازگاری، دورکردن مردم از سیل و نهایتاً توقف دخالت‌های انسانی در آبخیز مورد تأکید خواهد بود. وسعت مناطق مسکونی نیز یک عامل انسانی است که می‌تواند به عنوان یک نیروی محرکه در آبخیز عمل کند و سطوح غیرقابل نفوذ و البته با الگوی متفاوت و مؤثر بر تشدید تولید رواناب و در نهایت تأثیر بر سلامت آبخیز را به دنبال داشته باشد. متغیرهای ترکیبی مثل تراکم جاده و یا تراکم زه‌کشی نیز به سبب تأثیر ترکیبی عوامل دیگر (برای مثال مجموع طول جاده و یا طول شبکه زه‌کشی و در تعامل با مساحت آبخیز که هرکدام می تواند به صورت جداگانه به عنوان عامل

محرکه و یا فشار تلقی شوند) در شاخص حالت مد نظر قرار گرفته است. بنابراین وسعت مناطق مسکونی فشاری است که به دنبال آن مثلا تراکم جاده تغییر می‌کند. همانطور که در ابتدای بحث نیز اشاره شد، منظور از پاسخ هرگونه تغییری است که آبخیز در اثر فشارهای وارد شده در خود ایجاد می‌کند. بنابراین صرفاً به مفهوم پاسخ مدیر به تنش‌ها نیست. اقدامات مدیریتی که انسان برای حل مسائل و مشکلات آبخیز اتخاذ می‌کند به عنوان یک نیروی محرکه (فشار) عمل می‌کند. می‌تواند مثبت باشد و سبب پاسخ مثبت آبخیز و بهبود سلامت آن شود و یا می‌تواند اثر نامطلوب گذاشته و سلامت را نزول دهد. بنابراین حجم مخزن سازه‌های آبخیزداری فشاری است که بر اثر ساخت سازه آبخیزداری بر آبخیز وارد می‌شود و می‌تواند حجم سیلاب آبخیز را کاهش و مهار کند و اثر مثبت بر سلامت داشته باشد.

در پژوهش حاضر و با توجه به توضیحات ارائه‌شده بالا، برای محاسبه شاخص فشار از ۲۰ معیار مختلف به شرح ارائه‌شده در جدول ۲ استفاده‌شده است. برای محاسبه اولین معیار از عوامل هیدرولوژی ابتدا شاخص شکل زیر آبخیز برای هر زیر آبخیز با استفاده از ضریب Gravelius و هم‌چنین زمان تمرکز و زمان پیمایش هر زیرآبخیز با استفاده از رابطه Kirpich به شرح مندرج در رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه شد (Mahdavi, 2013).

$$T = 0.949\left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$ رابطه (۱)

$$Cc = \frac{P}{2A} = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$$ رابطه (۲)

که در آن T زمان تمرکز حوزه آبخیز به دقیقه، L طول آبراهه اصلی به متر؛ H اختلاف ارتفاع حوزه آبخیز به متر، P محیط آبخیز به کیلومتر، A مساحت آبخیز به کیلومتر مربع و Cc ضریب فشردگی Gravelius است.

سپس مجموع طول آبراهه‌های درجه ۱ و درجه ۲ و بالاتر با استفاده از رتبه‌بندی آبراهه در نرم‌افزار ArcMap10.8 و با روش Strahler برای هر زیرآبخیز محاسبه شد (Mahdavi, 2013). با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) نقشه شیب منطقه تهیه و شیب متوسط برای هر زیرآبخیز محاسبه شد. مقادیر شدت بارندگی، تبخیر، بارش و دبی حداکثر لحظه‌ای بر اساس اطلاعات موجود در مطالعات آبخیزداری حوزه آبخیز دروازه قرآن (Absar Fars Consulting Engineers, 2020) برای زیر آبخیزهای موردمطالعه در نرم‌افزار ArcMap10.8 میان‌یابی شد. همچنین به‌منظور محاسبه وسعت سازندهای حساس به فرسایش، از نقشه زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ منطقه موردمطالعه استفاده شد (مطالعات تکمیلی بندهای کنترل سیلاب و تأخیری حوزه آبخیز، ۱۳۹۹). در گروه عوامل انسانی نیز برای تعیین طول فرسایش کنارآبراهه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Google Earth.pro مناطق دارای فرسایش کنار آبراهه‌ای مشخص و محاسبات برای هر زیرآبخیز به‌صورت مجزا انجام شد، هم‌چنین برای تعیین طول جاده خاکی/آسفالتی از لایه جاده موجود استفاده و تعداد تقاطع آن با شبکه زه‌کشی شمارش شد.

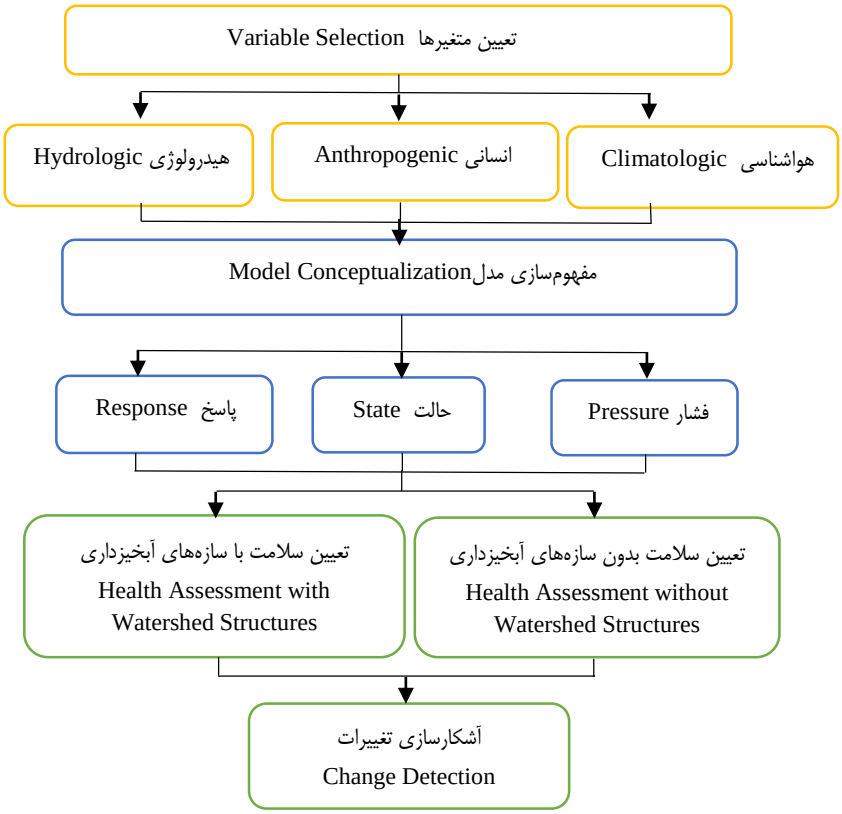
برای محاسبه وسعت مناطق مسکونی و مساحت مناطق با کاربری برون‌زدگی سنگی از نقشه کاربری اراضی موجود استفاده شد (Hazbavi *et al.*, 2020). با توجه به این‌که بخش زیادی از آبخیز موردمطالعه تحت تأثیر فعالیت‌های نظامی بود، لذا مساحت مناطق نظامی در زیرحوزه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Google Earth.pro محاسبه شد. برای محاسبه NDVI از محصول ۱۶ روزه سنجنده MODIS[1] استفاده شد، و تصاویر مربوط به بهار و تابستان استخراج و بررسی شد. درنهایت تصویری با بیش‌ترین NDVI بود (۱۳۹۷/۰۴/۲۱) به‌عنوان شاخص مزبور مدنظر قرار گرفت (Hazbavi *et al.*, 2020). در معیارهای مربوط به شاخص حالت نسبت تبخیر و تعرق پتانسیل به بارش سالانه با استفاده از مقادیر موجود در مطالعات قبل و هم‌چنین استفاده از نرم‌افزار ArcMap10.8 مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش سالانه برای هر زیرآبخیز میان‌یابی و سپس نسبت تبخیر و تعرق پتانسیل به بارش سالانه برآورد شد، هم‌چنین شاخص خشک‌سالی در نرم‌افزار SPI Generator با استفاده از مقادیر بارندگی سالانه مقادیر SPI برای هر زیر آبخیز محاسبه گردید (Hazbavi *et al.*, 2018). نسبت مساحت اراضی تخریب‌شده به مساحت آبخیز و هم‌چنین نسبت مناطق مسکونی به سطح زیرآبخیز با استفاده از نقشه کاربری اراضی منطقه در نرم‌افزار ArcMap.10.8 محاسبه شد.

تراکم جاده در هر زیر آبخیز از تقسیم طول کل جاده به مساحت زیرآبخیز محاسبه شد. تراکم زه‌کشی نیز برای هر زیرآبخیز از نسبت مجموع طول آبراهه به مساحت زیرآبخیز به دست آورده شد (Hazbavi *et al.*, 2020). نسبت اراضی مشارکت‌کننده در رواناب به سطح بر اساس ضریب رواناب هر زیرآبخیز با استفاده از رابطه (۳) برآورد شد.

$$R_C = \left[\prod_{i=1}^{2} \frac{A_i}{A_t}\frac{R_{ci}}{R_{ct}}\right]^{0.5}$$ رابطه (۳)

در این رابطه A_i، A_t، R_{ci} و R_{ct} به ترتیب بیان‌گر مساحت زیرآبخیز، مساحت کل، ضریب رواناب تهیه‌شده در زیرآبخیز و ضریب رواناب کل آبخیز است (Sadeghi *et al.*, 2017). در معیارهای شاخص پاسخ دبی اوج و رسوب ویژه نیز از مطالعات موجود (Absar Fars Consulting Engineers, 2020) اخذ و محاسبات مورد نیاز انجام شد (Alaei *et al.*, 2020). وسعت اراضی رهاشده با استفاده از نقشه کاربری اراضی منطقه و نرم‌افزار Google Earth.pro برای هر زیرحوزه تعیین شد.

1- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer



شکل ۲- چارچوب فرآیند اجرایی و کلیات کاربست رویکرد مفهومی PSR در ارزیابی سلامت آبخیز

Figure 2- Process framework and general steps of application of the conceptual approach of PSR in the watershed health assessment

تحلیل و پهنه‌بندی درجه سلامت

با توجه به تفاوت در واحدها و بزرگی معیارها، تمام داده‌های ورودی با استفاده از رابطه‌های (۴) و (۵) به ترتیب برای معیارهای دارای سهم مثبت و منفی استانداردسازی شدند.

$$S = \frac{\text{Value} - \text{Min value}}{\text{Max value} - \text{Min value}}$$ رابطه (۴)

$$S = \frac{\text{Max value} - \text{Value}}{\text{Max value} - \text{Min value}}$$ رابطه (۵)

که در آن S، Value، Min value و Max value به ترتیب مقدار استانداردشده، مقدار اولیه، حداقل مقدار اولیه و حداکثر مقدار اولیه است. در ادامه از طریق رگرسیون، میزان هم‌خطی و خودهمبستگی معیارها و شاخص‌های ارزیابی سلامت با استفاده از آماره عامل تورم واریانس[1] کم‌تر از ۱۰ موردبررسی قرار گرفتند (Bihamta and Zare Chahoki, 2015). سپس از میانگین حسابی برای محاسبه معیار متوسط هر شاخص استفاده شد (Hazbavi *et al.*, 2017).

درنهایت با محاسبه میانگین هندسی معیارهای شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ برای هر یک از زیرآبخیزها با استفاده از رابطه (۶)، درجه سلامت هر زیرآبخیز تعیین شد. در رابطه (۶)، x_n مقدار هر شاخص و k تعداد شاخص‌ها (سه) است. رده‌بندی سلامت آبخیز نیز در پنج طبقه سالم (۱-۰/۸۱)، نسبتاً سالم (۰/۸-۰/۶۱)، متوسط (۰/۶-۰/۴۱)، نسبتاً ناسالم (۰/۴-۰/۲۱) و ناسالم (۰/۲-۰) انجام شد (Hazbavi *et al.*, 2018). هم‌چنین درجه سلامت کل آبخیز بااستفاده از میانگین وزنی محاسبه شد.

$$Geometric\ mean = \left[\prod_{n=1}^{k} x_n\right]^{\frac{1}{k}}$$ رابطه (۶)

نتایج و بحث

تحلیل درصد مشارکت معیارهای مربوط به هر زیر آبخیز

با توجه به عدم دسترسی به برخی از آمار و اطلاعات منطقه موردمطالعه و یا عدم تأثیر معنی‌دار در سلامت، برخی از معیارهای مورداستفاده حذف و سپس مقادیر معیارهای باقی‌مانده از طریق

1- Variance Inflation Factor (VIF)

رابطه‌های (۴) و (۵) استاندارد شدند. نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل‌های آماری نشان داد که تمام معیارهای مورداستفاده برای شاخص‌های فشار، حالت و پاسخ دارای VIF و آماره Durbin-Watson قابل‌قبول بودند. به‌طوری‌که مقادیر VIF برای تمام متغیرها کم‌تر از ۱۰ محاسبه گردید و آماره Durbin-Watson در بازه بین ۱/۵ تا ۲/۵ قرار داشت. مقادیر استانداردشده معیارهای مورداستفاده در رویکرد PSR در زیرآبخیزهای موردمطالعه در جدول ۳ قابل‌مشاهده است.

جدول ۲- متغیرهای مورداستفاده در ارزیابی سلامت آبخیز دروازه قرآن شیراز مبتنی بر رویکرد مفهومی PSR

Table 2- The variables used in evaluating the health of the Shiraz Darwazeh Quran Watershed using the conceptual approach of PSR

شاخص Index	عامل Factor	معیار Criterion	نشانه Symbol	واحد Unit
فشار (P) Pressure	اقلیمی و زمین‌شناسی Climatic and Geologic	شدت بارندگی Rainfall intensity	P1	$mm.h^{-1}$
		متوسط حداکثر بارندگی روزانه Mean maximum daily rainfall	P2	mm
		وسعت سازندهای حساس به فرسایش Area of formations sensitive to erosion	P3	km^2
		مساحت مناطق با غالبیت برون‌زدگی سنگی Area of areas with the predominance of rocky outcrops	P4	km^2
	انسانی Anthropogenic	مساحت نخاله‌های ساختمانی Area of construction debris	P5	km^2
		جمعیت Population	P6	Person
		وسعت مناطق مسکونی Area of residential areas	P7	km^2
		وسعت مناطق تحت فعالیت‌های نظامی Area of the areas under military activities	P8	km^2
		طول جاده‌های خاکی/آسفالتی Length of dirt/asphalt roads	P9	km
		طول فرسایش کنار آبراهه‌ای ناشی از دخالت‌های انسانی Length of bank erosion due to anthropogenic interventions	P10	km
		تعداد تقاطع جاده با آبراهه Number of road intersections with waterways	P11	Dimensionless
		شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	P12	Dimensionless
		حجم مخزن سازه‌های آبخیزداری* Volume of reservoirs of watershed structures	P13	m^3
	هیدرولوژی Hydrologic	مجموع طول آبراهه‌های درجه ۲ و بالاتر Total length of waterway of rank 2 and above	P14	km
		مجموع طول آبراهه‌های درجه ۱ Total length of 1st rank waterway	P15	km
		شیب متوسط حوزه آبخیز Watershed Mean slope	P16	%
		شاخص شکل زیرآبخیز Watershed shape index	P17	Dimensionless
		زمان تمرکز Time of concentration	P18	h
		زمان پیمایش Travel time	P19	h
		دبی اوج لحظه‌ای Instantaneous peak flow discharge	P20	$m^3.s^{-1}$

ادامه جدول ۲- متغیرهای مورداستفاده در ارزیابی سلامت آبخیز دروازه قرآن شیراز مبتنی بر رویکرد مفهومی PSR

Table 2- Continued, the variables used in evaluating the health of the Shiraz Darwazeh Quran Watershed using the conceptual approach of PSR

حالت (S) State	اقلیمی Climatic	نسبت متوسط تبخیر ماهانه به متوسط بارش ماهانه Ratio of mean monthly evaporation to mean monthly precipitation	S1	بدون بعد Dimensionless
		شاخص خشک‌سالی[1] (SPI) Standardized Precipitation Index	S2	بدون بعد Dimensionless
	انسانی Anthropogenic	نسبت مساحت اراضی تخریب‌شده به مساحت زیرآبخیز Ratio of the area of degraded lands to the sub-watershed area	S3	بدون بعد Dimensionless
		تراکم جاده Road density	S4	$m.m^{-2}$
		نسبت مناطق مسکونی به سطح زیرآبخیز Ratio of residential areas to the sub-watershed area	S5	بدون بعد Dimensionless
		تراکم جمعیت Population density	S6	$Person.m^{-2}$
	هیدرولوژی Hydrologic	تراکم زه‌کشی Drainage density	S7	$m.m^{-2}$
		نسبت اراضی مشارکت‌کننده در رواناب به سطح زیرآبخیز Ratio of lands contributing in runoff to the sub-watershed aria	S8	بدون بعد Dimensionless
پاسخ (R) Response	انسانی Anthropogenic	مهاجرت Migration	R1	بدون بعد Dimensionless
		وسعت اراضی رهاشده Area of abandoned lands	R3	Km^2
	هیدرولوژی Hydrologic	خسارت ناشی از سیل Flood damage	R4	Billions of Iranian Rial
		دبی رواناب بالاتر از دبی مشخصه پرآبی Runoff discharges higher than high flow discharges	R5	$m^3.s^{-1}$
		دبی ویژه Specific flow discharge	R6	$m^3.s^{-1}. Km^{-2}$
		رسوب ویژه Specific sediment yield	R7	$t.Km^{-2}.year$
		کاهش حجم سیلاب ناشی سازه آبخیزداری* Reducing the flood volume caused by the watershed structure	R8	%

* این معیارها برای بررسی اثر سازه‌های آبخیزداری بر سلامت آبخیز و در مرحله دوم اجرای رویکرد مفهومی PSR استفاده شده‌اند.

درصد مشارکت معیارهای مورداستفاده در رویکرد PSR در زیرآبخیزهای موردمطالعه (جدول ۴) نشان می‌دهد که در زیر آبخیز شماره یک معیار تراکم جاده با ۲۵/۹۶ درصد مشارکت به سبب کوهستانی بودن و داشتن کم‌ترین تراکم، بیش‌ترین سهم را در تعیین سلامت داشته است. حال‌آنکه در زیر آبخیز شماره دو نسبت متوسط تبخیر ماهانه به متوسط بارش ماهانه با ۳۳/۳۳ درصد مشارکت به دلیل بیش‌تربودن نسبت تبخیر به بارش این زیرآبخیز نسبت به سایر زیرآبخیزها، سهم قابل‌توجهی را در میزان سلامت زیرآبخیز مذکور به خود اختصاص داده است. شیب متوسط با ۳۲/۱۳ درصد بیش‌ترین سهم را در سلامت زیرآبخیز شماره سه داشته است چراکه کم‌ترین شیب متوسط را در میان زیرآبخیزهای حوزه آبخیز دروازه قرآن به خود تخصیص داده است. در زیرآبخیز شماره چهار به دلیل آن‌که عمده سازه‌های آبخیزداری در آن واقع‌شده است، معیار حجم مخزن سازه‌های آبخیزداری با ۵۳/۴۹ درصد بیش‌ترین درصد مشارکت را در سلامت این زیرآبخیز داشته است. درصورتی‌که سازه‌های آبخیزداری را مدنظر قرار نگیرد، با توجه به وسعت بالای این زیرآبخیز، معیار زمان پیمایش با ۴۲/۶۴ درصد به‌عنوان یک معیار مثبت بیش‌ترین سهم را در تعیین سلامت این زیرآبخیز خواهد داشت. این در حالی است که در زیرآبخیز شماره پنج باوجود دو سازه آبخیزداری، معیار رسوب ویژه با ۵۳/۲۱ درصد به‌عنوان یک معیار کلیدی و منفی مهم‌ترین نقش را در تعیین سلامت این زیر آبخیز دارد. درواقع علی‌رغم جایگاه این زیرآبخیز در خروجی آبخیز، به دلیل وجود دو سازه مذکور، رسوب ویژه این زیرآبخیز کاهش‌یافته و همین امر سبب ارتقاء سلامت زیرآبخیز شده است. زیرآبخیز شماره پنج به دلیل شاخص SPI بالا، معیار خشک‌سالی با ۴۰ درصد بیش‌ترین نقش را در ارتقاء سلامت این زیر آبخیز داشته است. درواقع این معیار داری اثر مثبت بر سلامت بوده و نشان‌دهنده خشک‌سالی ناچیز این زیرآبخیز نسبت به سایرین است.

1- Standardized Precipitation Index

جدول ۳- مقادیر استانداردشده معیارهای مورداستفاده در رویکرد PSR در زیرآبخیزهای موردمطالعه حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز

Table 3- The standardized values of the criteria used in the PSR approach in the studied sub-watersheds of Darwazeh Quran Shiraz watershed

زیرآبخیز (Sub-watershed) / معیار (Criterion)	1	2	3	4	5	6
P1	0.50	0.50	1.00	0.50	1.00	0.00
P2	0.33	0.00	0.67	0.33	1.00	0.67
P3	0.86	0.96	0.83	0.00	1.00	0.90
P4	0.48	0.78	1.00	1.00	0.00	0.97
P7	1.00	1.00	1.00	1.00	0.72	0.00
P8	1.00	1.00	1.00	0.61	0.91	0.00
P9	1.00	1.00	0.93	0.50	0.94	0.00
P10	1.00	0.00	1.00	0.99	0.94	0.84
P11	1.00	0.96	0.81	0.65	1.00	0.00
P13	0.00	0.00	0.00	1.00	0.67	0.19
P14	0.71	0.53	1.00	0.12	0.92	0.00
P15	0.83	0.87	0.86	0.35	1.00	0.00
P16	0.08	0.00	1.00	0.90	0.50	0.63
P17	0.93	0.40	0.00	1.00	0.91	0.92
P18	0.47	0.65	0.47	1.00	0.00	0.64
P19	0.00	0.14	0.28	1.00	0.07	0.86
P20	0.50	0.50	0.00	0.50	1.00	0.90
S1	0.68	1.00	0.28	0.68	0.00	0.35
S2	0.00	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
S3	1.00	1.00	0.38	0.80	0.84	0.00
S4	1.00	0.81	0.11	0.94	0.97	0.00
S5	1.00	1.00	1.00	1.00	0.00	0.14
S7	0.65	0.12	0.00	0.66	1.00	0.62
S8	0.74	0.79	0.95	0.16	1.00	0.00
R3	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.58
R6	0.75	1.00	0.87	0.75	0.00	0.12
R7	0.00	1.00	0.07	0.43	1.00	0.27
R8	0.00	1.00	0.00	0.74	1.00	0.24

جدول ۴- درصد مشارکت معیارهای مورداستفاده در رویکرد PSR در زیرآبخیزهای موردمطالعه حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز

Table 4- The percentage of participation of the criteria used in the PSR approach in the studied sub-watersheds of Darwazeh Quran Shiraz watershed

زیرآبخیز (Sub-watershed) / معیار (Criterion)	1	2	3	4	5	6
P1	14.29	14.29	28.57	14.29	28.57	0.00
P2	11.11	0.00	22.22	11.11	33.33	22.22
P3	18.95	21.09	18.18	0.00	22.00	19.77
P4	11.33	18.46	23.61	23.61	0.00	22.99
P7	21.19	21.19	21.19	21.19	15.25	0.00
P8	22.12	22.12	22.12	13.50	20.13	0.00
P9	22.89	22.81	21.26	11.42	21.62	0.00
P10	21.00	0.00	20.91	20.82	19.73	17.55
P11	22.61	21.74	18.26	14.78	22.61	0.00
P13	0.00	0.00	0.00	53.49	36.07	10.43
P14	21.66	16.18	30.45	3.69	28.03	0.00
P15	21.14	22.22	22.06	9.04	25.54	0.00
P16	2.56	0.00	32.13	28.78	16.18	20.34
P17	22.39	9.55	0.00	24.03	21.94	22.09
P18	14.61	20.22	14.61	30.90	0.00	19.66
P19	0.00	5.88	11.76	42.65	2.94	36.76
P20	14.71	14.71	0.00	14.71	29.41	26.47
S1	22.76	33.33	9.48	22.76	0.00	11.67
S2	0.00	0.00	10.00	20.00	30.00	40.00
S3	24.81	24.81	9.54	19.85	20.99	0.00
S4	25.97	21.10	2.96	24.65	25.31	0.00
S5	24.14	24.14	24.14	24.14	0.00	3.45
S7	21.33	3.90	0.00	21.79	32.57	20.41
S8	20.38	21.66	26.11	4.46	27.39	0.00
R3	21.80	21.80	0.00	21.80	21.80	12.79
R6	21.43	28.57	25.00	21.43	0.00	3.57
R7	0.00	5.03	4.19	22.95	53.21	14.61
R8	0.00	0.00	0.00	37.40	50.43	12.15

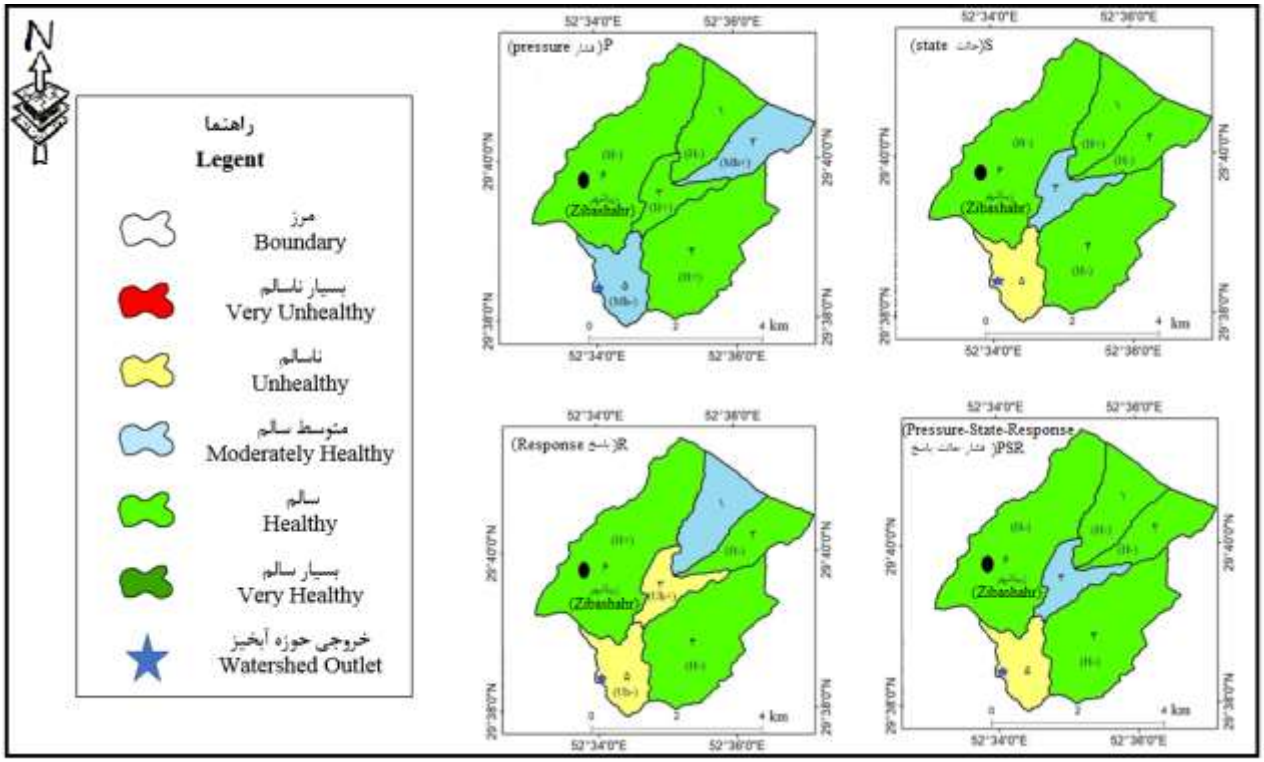
تحلیل سلامت آبخیز بدون لحاظ سازه‌های آبخیزداری

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی سلامت حوزه آبخیز دروازه قرآن، رویکرد PSR در حالت بدون در نظر گرفتن سازه آبخیزداری و با حضور سازه اجرا شد. نقشه شاخص‌های P، S، R و PSR برای آبخیز موردمطالعه به تفکیک زیرآبخیز و بدون در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری در شکل ۳ مشهود است. نتایج نشان می‌دهد که تمام زیر آبخیزها به‌جز زیرآبخیز دو و پنج در شاخص فشار دارای وضعیت سالم است. هرچند زیر آبخیز شماره یک و شش در وضعیت سالم رو به افول (-H) است. این در حالی است که دو زیرآبخیز شماره دو و پنج به ترتیب در وضعیت متوسط سالم رو به بالا(+MH) و رو به پایین (-MH) بوده است. در حالت کلی نتایج بررسی معیارهای فشار نشان می‌دهد که در زیر آبخیز دو به دلیل قرارگیری در بالادست و شیب متوسط بالا، و زیر آبخیز پنج به دلیل قرارگیری در پایین‌دست و خروجی آبخیز و زمان تمرکز کم‌تر فشار بیش‌تری را متحمل می‌شود که این امر با نتایج حزباوی و همکاران (Hazbavi *et al.*, 2020) مطابقت دارد. نتایج شاخص حالت نیز نشان می‌دهد که زیر آبخیز سه به دلیل تراکم بالای آبراهه و جاده دارای وضعیت متوسط سالم و زیر آبخیز پنج به سبب نسبت بالای مناطق مسکونی به سطح آبخیز دارای وضعیت ناسالم است. اما مابقی زیرآبخیزها از منظر شاخص حالت در وضعیت سالم قرار داشته است. هرچند زیرآبخیزهای دو، چهار و شش در وضعیت سالم رو به پایین قرار داشته است. بررسی شاخص پاسخ نشان می‌دهد که زیرآبخیزهای سه و پنج به ترتیب به دلیل وسعت بالای اراضی رهاشده و دبی ویژه بالا در پایین‌دست دارای وضعیت ناسالم قرار دارند که این با نتایج علایی و همکاران (Alaei *et al.*, 2020) و آن و کین (Ahn and Kin, 2019) مبنی بر حساسیت بوم‌شناختی مناطق پایین‌دست حوزه آبخیز مطابقت دارد. همچنین زیر آبخیز شماره یک به دلیل منشأ تولید رسوب و رسوب ویژه بالا در وضعیت متوسط سالم قرارگرفته و سایر زیرآبخیزها در وضعیت سالم قرار دارند. هرچند زیر آبخیز دو و چهار به ترتیب به دلیل تولید رسوب بالا و دبی ویژه بالا به سمت سالم رو به افول متمایل می‌باشند. به‌طورکلی نتایج رویکرد PSR نشان می‌دهد که زیرآبخیز شماره پنج به دلیل قرارگیری در خروجی آبخیز و تحت تأثیر دبی و رسوب ویژه بالا و همچنین زمان تمرکز پایین در وضعیت ناسالم قرار دارد و زیر آبخیز شماره سه به سبب تراکم بالای آبراهه و جاده، زمان تمرکز پایین و اراضی رهاشده در وضعیت متوسط سالم قرارگرفته است. سایر زیر آبخیزها نیز در وضعیت سالم قرار گرفتند. هرچند به دلیل حساسیت‌های موجود، درجه سلامت آن‌ها رو به افول است و درصورتی‌که تحت‌فشار بیش‌تری قرار گیرند از وضعیت سالم خارج می‌شوند. اما به‌طورکلی درجه سلامت آبخیز دروازه قرآن شیراز در شرایط بدون حضور سازه‌های آبخیزداری با مقدار ۰/۵۵ (جدول ۵) در وضعیت متوسط سالم قرار دارد.

تحلیل سلامت آبخیز با لحاظ سازه‌های آبخیزداری

در حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز شش سازه آبخیزداری سنگی‌سیمانی از سیلاب سال ۱۳۹۸ به‌منظور کنترل و مهار سیلاب احداث شد که موقعیت این سازه‌ها در شکل ۴ قابل‌مشاهده است. به‌طوری‌که سه سازه در زیرآبخیز چهار، دو سازه در زیر آبخیز پنج و یک سازه در زیر آبخیز شش احداث شد. به‌منظور ارزیابی اثر سازه‌های آبخیزداری بر سلامت آبخیز، پس از تعیین سلامت آبخیز بدون حضور سازه، برای دخالت سازه‌های احداث‌شده، دو معیار حجم مخزن سازه آبخیزداری و درصد کاهش حجم سیلاب ناشی از احداث سازه آبخیزداری به ترتیب در شاخص‌های فشار و پاسخ وارد شد و رویکرد PSR مجدد برای آبخیز اجرا شد. نقشه شاخص‌های P، S، R و PSR برای آبخیز موردمطالعه به تفکیک زیرآبخیز و با در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری در شکل ۴ نشان داده‌شده است. نتایج نشان می‌دهد که در شاخص فشار تفاوت معنی‌داری نسبت به حالت بدون سازه ایجاد نشده است. حتی در آبخیزهای یک، دو و سه که سازه‌ای در آن وجود نداشته و معیار حجم مخزن سازه صفر در نظر گرفته‌شده است، میزان سلامت به مقدار ناچیزی کاهش‌یافته است به‌طوری‌که آبخیز دو و سه که متوسط سالم و سالم و هر دو به سمت مثبت در حال رشد بوده‌اند، اکنون آبخیز دو به حالت متوسط سالم و آبخیز سه سالم با گرایش منفی پدیدار شده است. سایر زیرآبخیزها نیز تغییر محسوسی نداشته است. در مورد شاخص حالت نیز به دلیل آن‌که معیار جدیدی وارد نشد تغییری نسبت به حالت قبل نداشته است. در مورد شاخص پاسخ نیز همانند شاخص فشار سه زیر آبخیز اول به سبب آن‌که معیار درصد کاهش حجم سیلاب ناشی از احداث سازه آبخیزداری صفر قرار داده‌شده است وضعیت سلامت را تا حدودی نزولی کرده است اما در زیرآبخیز چهار و پنج وضعیت سلامت تا حدودی بهبودیافته است به‌طوری‌که به ترتیب از سالم و متوسط سالم رو به پایین به سمت بالا گرایش پیداکرده است. در زیرآبخیز شش به دلیل وسعت بالای آبخیز و وجود تنها یک سازه در پایین‌دست آن تأثیر معنی‌داری در وضعیت سلامت مشاهده نشده است. به‌طورکلی وضعیت سلامت زیرآبخیزها بر اساس رویکرد PSR باوجود سازه‌های آبخیزداری به نحوی بوده است که وضعیت سلامت زیرآبخیزهای یک، دو و سه به ترتیب از سالم رو به پایین (زیرآبخیز یک و دو) و متوسط سالم رو به بالا به سمت متوسط سالم رو به بالا (زیرآبخیز یک و دو) و متوسط سالم رو به پایین تنزل پیدا نموده است. زیرآبخیز چهار و شش هر دو از سالم رو به پایین به سالم رو به بالا ارتقاءیافته است و در زیرآبخیز پنج تغییر محسوسی مشاهده نشد. بنابراین به

سبب آن‌که سلامت اکثر زیرآبخیزها باوجود سازه آبخیزداری تنزل یافته است، سلامت کل آبخیز از ۰/۵۵ به ۰/۵۳ نزول یافته است (جدول ۴) اما طبقه سلامت تغییری پیدا نکرده است. با این تفاسیر عملاً سازه‌های احداث‌شده تأثیر چندانی در ارتقاء وضعیت حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز ایجاد نکرده است.



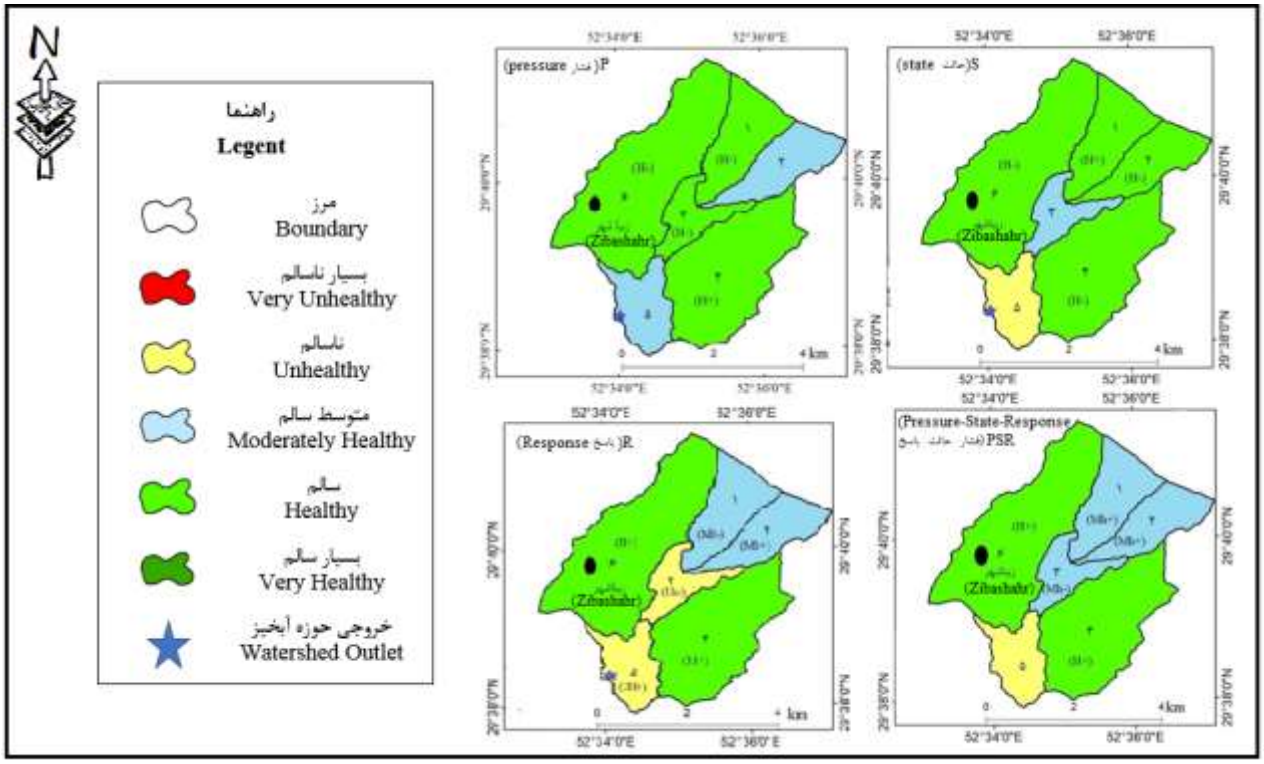
شکل ۳- پهنه‌بندی شاخص‌های P، S، R و PSR در حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز بدون در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری

Figure 3- Zoning of P, S, R and PSR indices in the Darwazeh Quran Shiraz Watershed without considering watershed management structures

جدول ۵- مقادیر شاخص‌های رویکرد PSR در حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز

Table 5- Values of the indicators of the PSR approach in Darwazeh Quran Shiraz watershed

	زیرآبخیز Sub-watershed	فشار (P) Pressure	حالت (S) State	پاسخ (R) Response	PSR	سلامت آبخیز Watershed health
بدون وجود سازه آبخیزداری Without watershed management structure	1	0.67	0.73	0.58	0.66	0.55
	2	0.58	0.67	0.70	0.65	
	3	0.74	0.43	0.32	0.47	
	4	0.65	0.68	0.73	0.69	
	5	0.74	0.65	0.66	0.69	
	6	0.46	0.30	0.33	0.36	
باوجود سازه آبخیزداری With watershed management structure	1	0.63	0.73	0.44	0.59	0.53
	2	0.55	0.67	0.52	0.58	
	3	0.70	0.43	0.24	0.42	
	4	0.67	0.68	0.73	0.70	
	5	0.74	0.65	0.75	0.72	
	6	0.44	0.30	0.31	0.35	



شکل ۴- پهنه‌بندی شاخص‌های P، S، R و PSR در حوزه آبخیز دروازه قرآن شیراز با در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری

Figure 4- Zoning of P, S, R and PSR indices in Darwazeh Quran Shiraz watershed by considering watershed structures

نتیجه‌گیری

در این پژوهش رخداد سیلاب به عنوان مشکل اصلی حوزه آبخیز دروازه قرآن مورد ارزیابی قرار گرفت. لذا شاخص‌ها و متغیرهای مرتبط و تأثیرگذار بر سیلاب با استفاده از بازدیدهای میدانی، مطالعات آبخیزداری و داده‌های اقلیمی تعیین گردید. با توجه به نتایج تجزیه‌وتحلیل شاخص‌ها و معیارهای در نظر گرفته‌شده در ارزیابی سلامت آبخیز دروازه قرآن شیراز مشخص شد که بر اساس رویکرد PSR آبخیز دارای وضعیت متوسط ازلحاظ سلامت بوده است. به‌طوری‌که خروجی نهایی مدل برابر با ۰/۵۵ محاسبه شد. همچنین نتایج ارزیابی سلامت آبخیز با در نظر گرفتن سازه‌های آبخیزداری نشان داد که تغییر معنی‌داری در درجه سلامت آبخیز رخ نداده است. به‌نحوی‌که میزان سلامت به ۰/۵۳ تنزل یافته است. بنابراین می‌توان اذعان داشت که سازه‌های آبخیزداری موجود نتوانسته است بر شکوفایی و بهبود شرایط آبخیز تأثیر محسوسی داشته باشد. به‌طورکلی می‌توان گفت اراضی رهاشده، زمان تمرکز کوتاه، فعالیت‌های نظامی، وجود سازندهای حساس به فرسایش، تراکم بالای شبکه زه‌کشی و جاده و پتانسیل تولید رواناب و رسوب بالا و وسعت مناطق مسکونی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تنزل سلامت آبخیز دروازه قرآن است. لذا لازم است این موارد مورد توجه قرار گیرد و با انجام پایش دوره‌ای با داده‌های جامع‌تر، به هنگام و همچنین تحلیل روند تغییرات نسبی شاخص‌ها در راستای تبیین مدیریت سازگار و هوشمند آبخیز اقدامات لازم صورت گیرد. بنابراین پیشنهاد می‌شود با اعمال اقدامات زیست‌مهندسی و نقاط ضعف منطقه را به نقاط قوت تبدیل کرد و از فرصت‌های موجود در منطقه نظیر پتانسیل توسعه گردشگری و ویژگی‌های بوم‌شناختی در جهت ارتقاء وضعیت سلامت آبخیز استفاده نمود.

منابع

1. Absar Fars Consulting Engineers. (2020). *Additional watershed studies of flood control dams and backwaters in Darwazeh Quran watershed*. General Department of Fars Natural Resources and Watershed Management.
2. Ahn, S.R., & Kim, S.J. (2017). Assessment of integrated watershed health based on the natural environment, hydrology, water quality, and aquatic ecology. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 5583-5602. https://doi.org/10.5194/hess-21-5583-2017.

3. Ahn, S.R., & Kim, S.J. (2019). Assessment of watershed health, vulnerability and resilience for determining protection and restoration priorities. *Environmental Modelling and Software* 122: 103926. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.014.
4. Alaei, N., Mostafazadeh, R., Esmaliouri, A., Sharari, M., & Hazbavi, Z. (2020). Assessment and comparison of landscape connectivity in KoozehTopraghi watershed, Ardabil province. *Iranian Journal of Applied Ecology 8*(4): 19-34. (In Persian with English abstract)
5. Bihamta, M.R., & Zare Chahouki, M.A. (2016). *Principles of statistics for the natural resources science (Fourth ed.)* (p. 300). Tehran: Tehran Univer-sity Publication. (In Persian)
6. Ebrahimi Gatkash, Z., & Sadeghi, S.H.R. (2022). Combined application of pressure-state-response and strategic planning approaches in integrated and problem-oriented management f the Makhsaz watershed in western Mazandaran, Iran. *Journal of Water and Soil Resources Conservation 11*(3): 89-109. (In Persian with English abstract)
7. Ebrahimi, P., Salajegheh, A., Mohseni Saravi, M., Malekian, A., & Sadoddin, A. (2018). Watershed health prediction based on surface water quality variables (case study: Taleghan watershed). *Geography and Environmental Sustainability 8*(1): 1-13. (In Persian)
8. Esty, D.C., Levy, M., Srebotnjak, T., & De Sherbinin, A. (2005). Environmental sustainability index: benchmarking national environmental stewardship. *New Haven: Yale Center for Environmental Law & Policy* 47-60.
9. Hazbavi, Z., & Sadeghi, S.H.R. (2016a). Watershed health (Part two): Pressure, state and response conceptual model, *Extension and Development of Watershed Management 4*(15): 25-30. (In Persian with English abstract)
10. Hazbavi, Z., & Sadeghi, S.H.R. (2016b). Watershed health characterization using reliability-resilience-vulnerability conceptual framework based on hydrological responses. *Land Degradation and Development 28*(5): 1528-1537. https://doi.org/10.1002/ldr.2680.
11. Hazbavi, Z., Keesstra, S.D., Nunes, J.P., Baartman, J.E.M., Gholamalifard, M., & Sadeghi, S.H.R. (2018). Health comparative comprehensive assessment of watersheds with different climates. *Ecology Indic* 93: 781–790. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.078.
12. Hazbavi, Z., Parchami, N., Alaei, N., & Babaei, L. (2020). Assessment and analysis of the Koozeh Topraghi Watershed health status, Ardabil Province, Iran. *Journal of Soil and Water Resources Conservation 9*(3): 121-142. (In Persian with English abstract)
13. Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., & Gholamalifard, M. (2017). *Comparative analysis of the variability of health assessment indicators of pressure, state and response in Shazand watershed*. The 13th National Conference of Iran Watershed Science and Engineering. (In Persian with English abstract)
14. Hazbavi, Z., Sadeghi, S.H.R., Gholamalifard, M., & Davudirad, A.A. (2020). Watershed health assessment using the pressure–state–response (PSR) framework. *Land Degradation and Development* 31: 3-19. https://doi.org/10.1002/ldr.3420.
15. Jin, Y., Yang, W., Sun, T., Yang, Zh., & Li, M. (2015). Effects of seashore reclamation activities on wetlands ecosystem, A case study in Yellow River Delta, China, *Ocean & Coastal Management* 123: 44-52.
16. Liu, X., Zhang, Z., Li, M., Fu, Y., & Hui, Y. (2022). Ecological source identification based on the PSR model framework and structural features: a case study in Tianjin, China. *Arabian Journal of Geosciences 15*(9): 1-17.
17. Mallya, G., Hantush, M., & Govindaraju, R.S. (2018). Composite measures of watershed health from a water quality perspective. *Journal of Environmental Management* 214: 104-124. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.049.
18. Mahdavi. (2013). *Applied hydrology*. Volume 2. Tehran University Publications, 8th edition.
19. Momenian, P., Nazarnejhad, H., Miryaghoubzadeh, M., & Mostafazadeh, R. (2018). Assessment and prioritizing of subwatersheds based on watershed health scores (case study: Ghotorchay, Khoy, West Azerbaijan). *Journal of Watershed Management Research 9*(17): 1-13. (In Persian with English abstract)
20. Mosaffaie, J., Salehpour Jam, A., Tabatabaei, M.R., & Kousari, M.R. (2021). Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. *Land Use Policy* 100: 104911. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911.
21. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) (2001). OECD Environmental Indicators: Towards Sustainable Development, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.
22. Rani, G., Kaur, J., Kumar, A., & Yogalakshmi, K.N. 2019. *Ecosystem health and dynamics*: *An indicator of global climate change*. Contemporary Environmental Issues and Challenges in Era of Climate Change, Springer, Singapore 1-23 p.
23. Sadeghi, S.H.R., & Hazbavi, Z. (2016). Watershed health (Part one): reliability, resilience and vulnerability conceptual model. *Journal of Extension and Development of Watershed Management 4*(14):39-42. (In Persian with English abstract)
24. Sadeghi, S.H.R., Ebrahimi, Z., Jafari, F., & Farzi, P. (2017). *Assessing the health of the Asiab Rood watershed with the conceptual model of pressure-state-response*, the 13th National Conference on Watershed Science and Engineering and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment with a focus on Watershed Management and Protection of Natural Resources and Environment, Ardabil, https://civilica

.com/doc/827403. (In Persian with English abstract).
25. Sadeghi, S.H.R., Hazbavi, Z., & Gholamalifard, M. (2019). Interactive impacts of climatic, hydrologic and anthropogenic activities on watershed health. *Science of the Total Environment* 648, 880-893. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.004.
26. Sadeghi, S.H.R., Vafakhah, M., Moosavi, V., Pourfallah Asadabadi, S., Sadeghi, P.S., Khaledi Darvishan, A., Bagheri Fahraji, R., Mosavinia, S.H., Majidnia, A., Gharemahmudli, S., & Rekabdarkolaei, H.M. (2022). Assessing the health and ecological security of a human induced watershed in central Iran. *Ecosystem Health and Sustainability 8*(1): p.2090447. https://doi.org/10.1080/20964129.2022.2090447.
27. Sadeghi, S.H.R., Sadoddin, A., Asadi Neivan, O.A., Zarekarizi, A., & Moayeri, M.H. (2019). *Watershed health and sustainability (fundamentals, approaches and assessment methods).* Tarbiat Modares University Press. First edition, 218 pages. https://doi.org/10.22067/jwsd.v5i2.69177.
28. Sadoddin, A., Sadeghi, S.H.R. Zaregarizi, A., Hizbavi, Z., & Asdinalivan, A. (2017). *Presenting an index-based framework for comprehensive assessment of the health and sustainability of watersheds with an emphasis on future research*, the 13th National Conference on Watershed Science and Engineering of Iran and the 3rd National Conference on Protection of Natural Resources and Environment, October 10 and 11, 2017, Mohaghegh Ardabili University, 1-7. (In Persian with English abstract)
29. Supplementary studies of flood and delay control dams in the watershed. (2019). Abar Fars Consulting Engineers Co.
30. Yang, W., Jin, Y., Sun, T., & Li, M. (2015). *Effects of seashore reclamation activities on Wetlands ecosystem, a case study in yellow river Delta*. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands. 28 June- 3 July, 2015: 1-3.
31. Zhang, Sh., Xiang, M., Xu, Z., Wang, L., & Zhang, Ch. (2020). Evaluation of water cycle health status based on a cloud model. *Journal of Cleaner Production* 245: 118850. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118850.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 579-591

Carbon Stock and Some Chemical Properties of Soil in Sacred Groves and Pollarded Forest Stands of Northern Zagros Forests

N. Koosha[1], K. Mohammadi-Samani[2]*, V. Hosseini[3]

Received: 13-07-2022
Revised: 07-09-2022
Accepted: 26-09-2022
Available Online: 15-01-2023

Koosha, N., Mohammadi-Samani, K., & Hosseini, V. (2022). Carbon Stock and Some Chemical Properties of Soil in Sacred Groves and Pollarded Forest Stands of Northern Zagros Forests. *Journal of Water and Soil 36*(5): 579-591. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.77579.1180

Introduction

A large part of forest and woodland ecosystems in Iran have been located in arid and semi-arid areas which low level of soil organic carbon (SOC) is considered as one of the main problems. Millions of trees together that make forest ecosystems, play a major role in carbon sequestration and can sequester it in the form of biomass, above ground in plants and also underground in plants root or in the soil. Forest ecosystems play a significant role in absorbing and reducing greenhouse gases and therefore, can play a crucial role in decreasing global warming. Soil is one of the great sources of carbon storage, which plays a significant role in the atmospheric carbon deposition and dioxide gas. The carbon stored in the soil changes under some important driving factors such as: land use change, animal grazing, pollarding, exploitation (included forest harvesting), topography and forest trees, and types. One of the main sources of income for forest stakeholders in Zagros area is the Zagros oak forest. These people livelihoods are heavily dependent on natural resources, especially forest, known as a kind of traditional land use system called “Galazani”. Each family, in this system, has its own common ownership and manages their proprietorships called “Gallajar” which is a part of the woodlands and use some kind of traditional silvopastoral techniques to use these areas. Dominant livestock in the most part of theses area are goats and sheep. In the growing season, they usually feed on ground vegetation and in the winter time, they use dried oak leaves (leaf hay) that is stored before on some special trees call “Daar-Galla”. In the northern part of Zagros oak forest (Kurdistan province), there are some very special stands that are found around every village called sacred groves and are totally intact because of some spiritual values and taboos. There are no exploitation and grazing and even land use changing in these areas, and they show the real undisturbed forest lands in Zagros. The aim of this research was to study and compare soil carbon stock and some essential soil properties in sacred groves and pollarded forests (Gallajar) of northern Zagros forests in order to obtain more precise data in soil after high exploitation and pollarding.

Materials and Methods

The average annual rainfall in 25 recent years in the study is 690 mm and the average annual temperature is 14.2 degrees Celsius. The dominant trees species in the region are Lebanon oak, Aleppo oak and Persian oak. To conduct this investigation, three study areas included both sacred groves and Gallajars, in three main slope aspects including north, east and south facing aspects, were chosen. Then six plots (10 a) were randomly selected in each area and tree canopy (%) and litter percentage were determined in the field. Soil samples took in two depths (0-15 and 15-30 cm) in the center of each plots and then bulk density (BD) and some chemical soil properties included soil organic carbon, soil carbon stock, total nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), electrical conductivity (EC) and pH were measured in the soil laboratory. A factorial randomized complete block design was used to analysis soil data.

Results and Discussion

1- Master,s Degree in Forest Biology, Department of Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran
2 and 3- Assistant Professors, Department of Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, and The Center for Research and Development of Northern Zagros Forestry, University of Kurdistan, Sanandaj, I.R. Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: k.mohammadi@uok.ac.ir)

The results showed that there were significant differences between soil depths for studied soil properties except BD, N and K and also there were significant differences in various slope aspects in studied parameters. However, no such a trend was observed in soil N and EC. The results also revealed that pollarding had significant effects on all studied soil properties. In addition, all studied soil properties including SOC stock, N, P, K and EC in sacred groves was higher than Gallajars while pH and BD were increased in pollarded areas. The amount of SOC stock, N, P and EC were greater at depth 0-15 compared to depth of 0-15 cm while, pH showed lower amount in the surface soil layer and K and BD had no significant differences in the two studied soil layers. SOC stock in northern, eastern and southern slope aspect were 72.6, 48.2 and 45 tons/ha, respectively. Pollarding and livestock grazing in Gallajars caused a significant decrease in tree canopy and, as a result, the litters on the grounds also reduced. Therefore, it seems that the reduction of trees and canopy cover affected soil properties significantly and reduced SOC stock meaningfully in the long term. Other essential chemical soil properties were also lower in Galajars compared to sacred groves.

Conclusion

Finally, we can claim that, some factors including pollarding and grazing can significantly reduce SOC stock and other studied soil properties in this research. On the one hand, people are using these forest areas as grazing pastures and also for pollarding trees to fed their livestock and the government could not have convinced them not to pollard the trees and, on the other hand, the results in this study showed that these pollarding operations are affecting forest stands and forest soil chemical properties and SOC stock significantly and reduce their quality considerably. It can be suggested that some new management treatments should be done in these forest areas through the training of local people, preparing sufficient fodder resources and providing enough facilities by the government to reduce pollarding by stakeholders. As a result, the natural process of production and decomposition of organic matter may be controlled in a better way, so that, the soil quality and carbon storage in these forests to be improved in the long term.

Keywords: Chemical properties of soil, Sacred stands, Slope aspects, Soil depth, Soil organic carbon

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۵۹۱-۵۷۹

ذخیره کربن و برخی خصوصیات شیمیایی خاک در آرامگاه‌های جنگلی و گلاجارهای جنگل‌های زاگرس شمالی

نیلوفر کوشا[۱]- کیومرث محمدی سمانی[۲*]- وحید حسینی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۰۴

چکیده

بخش وسیعی از اکوسیتم‌های جنگلی کشور، در محدوده خشک و نیمه‌خشک قرار دارند که یکی از مشکلات اصلی آن، پایین بودن مقدار کربن آلی خاک است. هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه ذخیره کربن خاک و برخی خصوصیات شیمیایی مهم خاک در آرامگاه‌های جنگلی و گلاجارهای بخشی از جنگل‌های زاگرس شمالی است تا بتوان، اطلاعات دقیق‌تری در مورد این خصوصیات پس از گلازنی و استفاده از شاخ و برگ درختان، به دست آورد. برای انجام این پژوهش، سه منطقه‌ی جنگلی در شهرستان بانه، در دو شرایط دست‌نخورده (آرامگاه) و بهره‌برداری شده (گلاجار)، در سه جهت شمالی، شرقی و جنوبی انتخاب شد و سپس در هر یک، شش قطعه نمونه ۱۰ آری به صورت تصادفی انتخاب و در مرکز هر قطعه نمونه از دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک، نمونه‌برداری شد. درصد تاج پوشش و لاشبرگ نیز در هر قطعه نمونه تعیین گردید. سپس وزن مخصوص ظاهری و خصوصیات شیمیایی خاک از جمله: کربن آلی خاک، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، هدایت الکتریکی و pH، در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، از آزمون فاکتوریل در قالب بلوک‌های کاملا تصادفی استفاده شد. نتایج نشان داد عمق خاک، اثر معنی‌داری بر روی تمام مشخصه‌ها به‌جز نیتروژن و پتاسیم دارد. جهت دامنه، به‌جز هدایت الکتریکی و نیتروژن، اثر معنی‌داری بر روی سایر متغیرها گذاشت، اما مدیریت، اثر معنی‌داری بر روی تمام مشخصه‌ها گذاشت. در تمامی مناطق، به استثنای وزن مخصوص ظاهری و pH، سایر موارد بررسی شده از جمله ذخیره کربن آلی خاک، نیتروژن، فسفر، پتاسیم و هدایت الکتریکی در آرامگاه‌ها بیشتر از گلاجار و میزان تمام مشخصه‌ها به‌جز پتاسیم و pH، در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری بیشتر از عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک بود. ذخیره کربن در دامنه شمالی، شرقی و جنوبی به ترتیب ۷۲/۶، ۴۸/۲ و ۴۵ تن در هکتار بود. در نهایت می‌توان گفت عواملی از جمله: قطع شاخ و برگ درختان و حذف پوشش درختی و شاخ و برگ آن‌ها، می‌تواند باعث تغییر خصوصیات شیمیایی خاک و کاهش معنی‌دار میزان ذخیره کربن آلی خاک در هر دو عمق مورد بررسی، در توده‌های جنگلی گردد.

واژه‌های کلیدی: توده‌های دست‌نخورده، جهت دامنه، خصوصیات شیمیایی خاک، عمق خاک، کربن آلی خاک

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
۲ و ۳- استادیاران، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان، و مرکز پژوهش و توسعه جنگلداری زاگرس شمالی دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: k.mohammadi@uok.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.77579.1180

مقدمه

امروزه، فعالیت‌های انسانی در طول زمان، توانسته است بیشترین تأثیر را بر روی اکوسیستم‌ها در مقیاس جهانی و در نهایت گرمایش جهانی کره زمین گذاشته و با افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای از جمله دی‌اکسید کربن، تأثیرات قابل توجهی بر تغییرات اقلیمی بگذارد. برای ایجاد تعادل بین مقدار گازهای گلخانه‌ای و کاهش دی‌اکسید کربن اتمسفر، کربن باید جذب و در شکل‌های مختلفی ترسیب شود (Wang *et al.*, 2017). اکوسیستم‌های جنگلی، به دلیل وجود درختان، نقش عمده‌ای در ترسیب کربن دارند و می‌توانند آن را به صورت تولیدات، زی‌توده و یا در خاک ترسیب کنند (Jouhos *et al.*, 2021). در واقع می‌توان گفت اکوسیستم‌های جنگلی، نقش قابل توجهی در جذب و کاهش گازهای گلخانه‌ای و کاهش گرمای کره زمین دارند (Heidarian and Ghasemi Aghbash., 2020 ; Prietzel *et al.*, 2016). شناخت کیفیت خاک که یکی از شاخص‌های آن خصوصیات شیمیایی و فرآیند تغییرات آن است، می‌تواند راهنمایی برای بررسی سلامت اکوسیستم‌های جنگل باشد. این عامل محیطی مهم، یکی از منابع بزرگ ذخیره کربن است که نقش به‌سزایی در ترسیب گاز دی‌اکسید کربن اتمسفر دارد (Jouhos *et al.*, 2021). کربن ذخیره شده در خاک، تحت تاثیر عواملی از جمله: تغییر کاربری (Chen *et al.*, 2022 ; Mohmmadi Samani *et al.*, 2020)، چرای دام (Sadeghi *et al.*, 2019) و تیپ جنگلی (Jafari Sarabi *et al.*, 2021)، تغییر می‌کند.

جنگل‌های زاگرس، تحت عنوان جنگل‌های نیمه خشک، وسیع‌ترین و مهمترین بوم سازگان‌های ایران محسوب می‌شوند (Biabani *et al.*, 2016). تنوع گونه‌های درختی و درختچه‌ای، در جنگل‌های زاگرس بسیار زیاد است؛ اما بیشترین درصد ترکیب گونه‌ای این جنگل‌ها، از نوع گونه بلوط است. محققان برای سهولت در مطالعه، این جنگل‌ها را به سه بخش زاگرس شمالی، میانی و جنوبی تقسیم‌بندی کرده‌اند (Jazirehi and Ebrahimi Rastaghi, 2003). در جنگل‌های زاگرس شمالی، مردم محلی، نیازهای معیشتی خود را از طریق جنگلداری سنتی (گلازنی، گلابری و رمه‌گردانی)، تامین می‌کنند (Ghazanfari *et al.*, 2004). گلازنی، نوعی سرشاخه زنی از درختان است که مردم محلی، در اواخر تابستان و اوایل پاییز، سرشاخه درختان بلوط را قطع و آن‌ها را بر روی درختان و یا روی زمین قرار می‌دهند. خانوارهای این مناطق، به صورت عرفی بخشی از جنگل را در اختیار دارند که به این مناطق گلاجار گفته می‌شود که به سه قسمت به نام شان گلا که دارای محصول برابر هستند تقسیم می‌شود و هر سه سال یک بار گلازنی در یکی از این شان‌گلاها انجام می‌شود (Ghazanfari *et al.*, 2004). گلابری نیز مانند گلازنی، نوعی از سرشاخه‌زنی درختان است؛ بدین طریق که در زمان کمبود علوفه کف جنگل و پوشش گیاهی، مردم محلی بعضی از شاخه‌ها و سرشاخه‌های درختان، بخصوص بلوط، را در فصل رویش و زمانی که دام‌ها در عرصه هستند، برای استفاده‌ی دام‌ها قطع می‌کنند (Fattahi, 1994). حضور مردم محلی و فعالیت‌های آن‌ها به طور مداوم و طولانی مدت، باعث شده این جنگل‌ها تا حد زیادی از شکل اولیه و کلیماکس خود فاصله داشته باشند (Shakeri *et al.*, 2008). گلازنی توده‌های بلوط و برداشت و استفاده از شاخه و برگ آن‌ها، باعث عدم بازگشت آن‌ها به خاک و کاهش مواد آلی خاک می‌شود که اثرات منفی بر روی خاک مناطق جنگلی می‌گذارد (Rahimi *et al.*, 2020).

در جنگل‌های زاگرس، ظرفیت ترسیب کربن، به‌خصوص در خاک، می‌تواند بسیار قابل توجه باشد، اما الگوهای مدیریتی و فعالیت‌های انسانی باعث خارج شدن جنگل‌های زاگرس از حالت بکر، تغییر ساختار جنگل، از بین رفتن زادآوری و پوشش علفی زیراشکوب، فرسایش و کوبیدگی خاک و در نهایت کاهش ترسیب کربن جنگل شده است (Rajan *et al.*, 2010 ; Marvie Mohajer, 2005). در این جنگل‌ها، با وجود گلازنی و بهره‌برداری از چوب و چرای دام، قطعاتی از جنگل به صورت پراکنده در محدوده آرامگاه‌های جنگلی نزدیک به هر روستا وجود دارند (Shakeri *et al.*, 2008) که به دلیل تقدسات و تابوهایی که مردم محلی به آن‌ها اعتقاد دارند، تا حد زیادی هیچ گونه دخالتی در آن صورت نگرفته و یا کمتر مورد تخریب قرار گرفته است که می‌توان اذعان کرد این توده‌ها، نزدیک‌ترین حالت ممکن به شکل کلیماکس خود را نشان می‌دهند (Jazirehi and Plieninger *et al.*, 2020 ; Ebrahimi Rastaghi, 2003). در همین راستا جعفری سرابی و همکاران (Jafari Sarabi *et al.*, 2021) در تحقیقی در جنگل‌های لرستان، اثر گونه‌های مختلف بر ترسیب کربن خاک را در دو عمق بررسی کردند و عنوان نمودند که ترکیب و درصد پوشش گیاهی در هر منطقه می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی ترسیب کربن و سایر خصوصیات خاک بگذارد. همچنین حیدریان و قاسمی‌آقباش (Heidarian and Ghasemi Aghbash., 2020) در بررسی میزان ترسیب کربن خاک و پوشش درختی در کوهدشت، نتیجه گرفتند تراکم و تنوع پوشش درختی می تواند بر میزان ترسیب کربن تأثیرگذار باشد. نگرانی‌ها در خصوص بهره‌برداری و تغییرات کاربری، یک نگرانی جهانی را ایجاد نموده است به طوری که پژوهش‌های دیگری در نقاط مختلف جهان انجام شده است از جمله گوجی و همکاران (Gogoi *et al.*, 2022)، در مطالعه خود عنوان نمودند که مهمترین منبع ذخیره کربن در شرق هیمالیا، جنگل‌های همیشه سبز حاره‌ای می‌باشند و همچنین میزان ذخیره کربن به طور قابل ملاحظه‌ای از تراکم توده درختان و درصد رطوبت خاک تأثیر می‌پذیرد. مالاگا و همکاران (Malaga *et al.*, 2021) در

بررسی تخریب و تغییر کاربری جنگل‌های مناطق حاره‌ای در پرو و اندونزی عنوان کردند حتی جنگل‌های تخریب شده هم تا حدی قادر به حفظ خدمات اکوسیستمی از جمله ذخیره کربن و تنوع زیستی هستند، اما با بهره برداری بیشتر از آن‌ها و تبدیل شدن به نخلستان‌ها، می تواند ذخیره کربن خاک را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. چن و همکاران (Chen *et al*., 2022)، در مطالعه خود در بررسی اثر جهت دامنه بر خصوصیات خاک از جمله کربن آلی خاک، بیان کردند که جهت دامنه به شدت بر روی متغیرهای زیستی و غیر زیستی خاک اثر می‌گذارد و همچنین ذخیره کربن آلی خاک در دامنه‌های رو به شمال شرقی بیشتر از دامنه‌های رو به جنوب غربی است.

در این جنگل‌ها، به دلیل فعالیت‌ها و دخالت‌های انسانی همانند گلازنی، استفاده از شاخ و برگ درختان بلوط، چرای دام، برداشت بی‌رویه و استفاده از محصولات چوبی و غیر چوبی تحت فشار زیادی قرار گرفته و باعث می‌شود که در طولانی مدت حاصلخیزی خاک کاهش یابد. که این امر به نوبه خود، می‌تواند بر میزان ذخیره کربن خاک در این جنگل‌ها نیز اثرگذار باشد. به دلیل حضور جنگل‌های زاگرس در مناطق نیمه خشک، این مناطق، مکانی مناسب برای ترسیب کربن محسوب می‌شوند. لذا، بررسی ذخیره کربن و عناصر اصلی شیمیایی خاک در آرامگاه‌های جنگلی به عنوان مناطق کمتر دست خورده و گلاجارها به عنوان مناطق تحت بهره‌برداری سنتی در جنگل‌های زاگرس شمالی، می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در اختیار جامعه جنگلبانی ایران قرار دهد تا از این پس، با دقت بیشتری نسبت به بهره‌برداری و یا هر گونه تغییر در آنها، تصمیم‌گیری شود. این تحقیق در پی پاسخگویی به این سوال است که:

آیا میزان ذخیره کربن خاک و خصوصیات شیمیایی خاک از جمله میزان درصد کربن، ذخیره کربن آلی، درصد نیتروژن، پتاسیم، فسفر، pH و هدایت الکتریکی در آرامگاه‌ها و گلاجارها در عمق‌های مختلف خاک، یکسان است؟

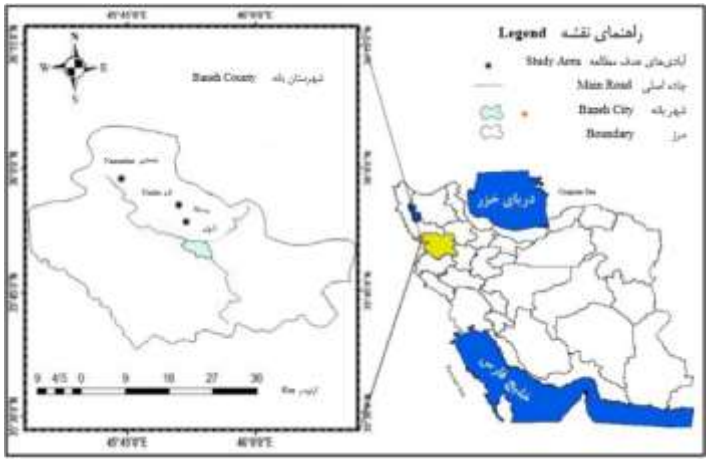
آیا خصوصیات شیمیایی خاک در دامنه‌هایی با جهت‌های متفاوت، تغییرات معنی‌داری را از خود نشان می‌دهند؟

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در جنگل‌های استان کردستان (شهرستان بانه) انجام گرفت. مناطق مورد مطالعه، شامل سه آرامگاه جنگلی و سه گلاجار هستند که در مناطق شوی (منطقه ۱، دامنه جنوبی)، نه‌مه‌شیر (منطقه ۲، دامنه شرقی) و نژو(منطقه ۳، دامنه شمالی) واقع شده‌اند (شکل ۱) که این مناطق در عرض جغرافیایی "۱۹´۰۲°۳۶ الی "۵۳´۰۷°۳۶ شمالی و طول جغرافیایی "۴۶´۴۳°۴۵ الی "۵۰´۵۱°۴۵ شرقی قرار دارند. مناطق انتخابی (آرامگاه‌ها و گلاجارها)، در ارتفاع ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ متری از سطح آب‌های آزاد واقع شده‌اند و دارای میانگین شیب ۲۰ درصد می‌باشند.

بر اساس اظهارات مردم محلی و بررسی‌های اجتماعی، بیشتر توده‌های مجاور آرامگاه‌ها، حدودا بیش از ۳۰۰ سال پیش، توسط مردم محلی، مورد برداشت چوبی و غیرچوبی، گلازنی و چرای دام قرار گرفته است (Plieninger *et al*., 2020). میانگین بارندگی سالانه، بر اساس اطلاعات به‌دست آمده از ایستگاه اقلیم شناسی منطقه (اطلاعات آماری از سال ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۸)، ۶۹۰ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد است. گونه‌های درختی غالب در منطقه، از نوع بلوط‌های ویول (*Quercus libani* Oliv.)، مازودار (*Quercus infectoria* Oliv.) و برودار (*Quercus brantii* Lind.) است (Mohmmadi Samani *et al*., 2022).



شکل ۱- نقشه مناطق مورد مطالعه در ایران و استان کردستان

Figure 1- Study areas of map in Iran and Kurdistan Province

نمونه‌برداری

روش نمونه‌برداری و انجام عملیات آزمایشگاهی در هر سه منطقه مورد مطالعه، دو توده گلاجار و آرامگاه جنگلی در مجاور هم، انتخاب و در هر توده شش نقطه به طور تصادفی، با رعایت فاصله ۲۰ متری به عنوان بافر، به منظور حذف اثر حاشیه‌ای، انتخاب شد. بنابراین در کل ۳۶ نقطه جهت پیاده نمودن قطعات نمونه ۱۰ آری انتخاب شد که درصد تاج پوشش درختان و درصد لاشبرگ سطح هر قطعه نمونه درجنگل برای هر نقطه تعیین گردید (Zobeiri, 2008). سپس از دو عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری خاک در هر شش نقطه، در دو توده گلاجار و آرامگاه، نمونه خاک جمع‌آوری شد. هر نمونه به صورت جدا از هم در کیسه‌های پلاستیکی ریخته و شماره‌گذاری شد. در نهایت ۷۲ نمونه خاک برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. تمامی نمونه‌ها بعد از خشک شدن، برای انجام آزمایش‌های شیمیایی، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. میزان درصد کربن آلی خاک به روش والکی-بلاک[1]، pH خاک به روش پتانسیومتری با کمک دستگاه pH سنج، هدایت الکتریکی به روش پتانسیومتری و با کمک EC سنج، نیتروژن خاک به روش کجلدال با کمک دستگاهی اتوکجلتیک، فسفر خاک به روش اولسن با کمک اسپکتوفتومتر و پتاسیم خاک به روش روش شعله سنجی و با استفاده از فلیم فتومتر اندازه گیری شد (Jafari Haghighi, 2003) و در نهایت پس از اندازه‌گیری وزن مخصوص ظاهری به روش کلوخه، ذخیره کربن خاک در واحد سطح (تن در هکتار)، با استفاده از معادله ۱ به‌دست آمد (Subedi *et al.*, 2011).

معادله ۱ $$SOC\text{-}Stock = SOC \times BD \times d$$

SOC-Stock: ذخیره کربن آلی خاک (تن در هکتار)

SOC: درصد کربن آلی خاک

BD: وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم در سانتی‌متر مکعب)

d: عمق نمونه‌برداری خاک (سانتی‌متر)

تجزیه و تحلیل داده‌ها

برای تجزیه و تحلیل داده‌های به‌دست آمده، از نرم افزارهای Excel 16 و SAS 9.1 استفاده شد. نرمال بودن داده‌ها، با کمک آزمون کولموگروف-اسمیرنوف[2] بررسی شد و همگنی واریانس‌ها، با کمک آزمون لون[3] بررسی شد. به منظور تحلیل داده‌های درصد تاج پوشش و درصد لاشبرگ، از آزمون تی مستقل، به صورت دو به دو بین گلاجارها و آرامگاه‌های جنگلی، استفاده شد. سپس از آزمون فاکتوریل با سه فاکتور عمق خاک (در دو سطح عمق ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ سانتی‌متری)، مدیریت کاربری (گلاجار و آرامگاه جنگلی) و جهت (شمالی، شرقی و جنوبی) استفاده شد. همچنین از آزمون دانکن برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد.

نتایج

بر اساس نتایج حاصله از آزمون تی مستقل، درصد تاج پوشش در آرامگاه‌های جنگلی در تمامی مناطق بررسی از نظر آماری ($P>0/01$) به صورت معنی داری بیش از گلاجارها بود (شکل ۲). همچنین درصد لاشبرگ نیز همواره در آرامگاه‌ها بیش از گلاجارها بود؛ بدین شکل که تفاوت آن‌ها در منطقه ۱ و ۳ در سطح ۰/۰۱ و در منطقه ۲ در سطح ۰/۰۵ می‌باشد (شکل ۳).

نتایج به‌دست آمده از آنالیز واریانس، بیانگر این بود که فقط عوامل جهت و مدیریت و اثرات متقابل آن دو ($P>0/01$) بر روی وزن مخصوص ظاهری اثر معنی‌داری داشتند (جدول ۱). نتایج حاکی از آن است که میانگین وزن مخصوص ظاهری در آرامگاه‌های جنگلی، ۱۱ درصد نسبت به گلاجارها کاهش یافت (جدول ۲). همچنین میانگین وزن مخصوص ظاهری در جهت دامنه شمالی به صورت معنی‌داری بیشتر از دامنه‌های جنوبی و شرقی بود (جدول ۲). نتایج حاصل از آنالیز واریانس، نشان داد هر سه عامل مدیریت، عمق و جهت دامنه اثر معنی‌داری ($P>0/01$) بر روی کربن و در نتیجه ذخیره کربن خاک داشت (جدول ۱). میانگین درصد کربن آلی در گلاجارها به میزان ۵۶ درصد نسبت به آرامگاه‌های جنگلی کاهش پیدا کرد و مقدار آن از عمق ۱۵-۰ به ۳۰-۱۵ سانتی‌متر به میزان ۲۹ درصد کاهش پیدا کرد (جدول ۲). میزان ذخیره کربن آلی خاک در گلاجارها، کاهشی ۴۹ درصدی را نسبت به آرامگاه‌های جنگلی نشان داد و مقدار آن در عمق دوم نیز به میزان ۲۸ درصد، نسبت به عمق اول، کاهش پیدا کرد (جدول ۲). همچنین درصد کربن و میزان ذخیره کربن آلی خاک در جهت دامنه‌های شمالی، بیشتر از شرقی و در شرقی بیشتر از دامنه‌های جنوبی بود (جدول ۲).

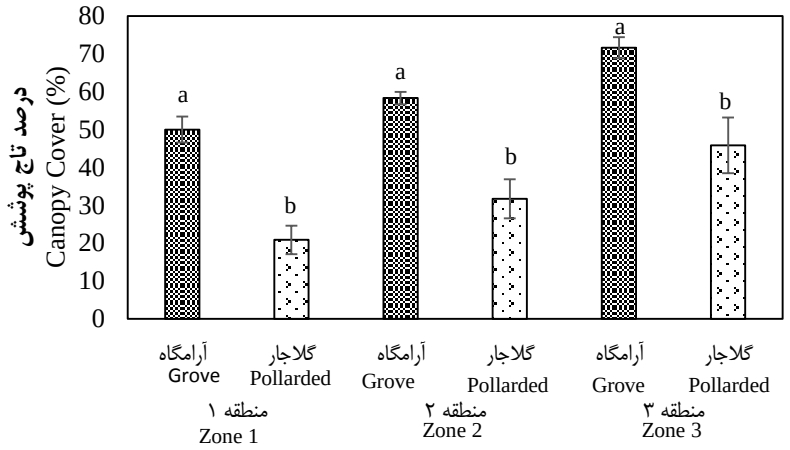
بر اساس نتایج حاصل از آنالیز واریانس، مقدار نیتروژن هر چند در مدیریت‌های مختلف دارای تفاوت معنی داری ($P>0/01$) بود، اما تفاوت معنی داری در عمق‌های و جهت‌های مختلف دیده نشد (جدول ۱). میانگین درصد نیتروژن در گلاجارها به میزان ۲۹ درصد نسبت به آرامگاه‌های جنگلی کاهش یافته و مقدار آن از عمق ۱۵-۰ به ۳۰-۱۵ سانتی‌متری به میزان ۸ درصد کاهش پیدا کرد نمود. همچنین میزان نیتروژن در دامنه شمالی، بیشتر از جهت‌های شرقی و جنوبی بود

1- Walkley-Black
2- Kolmogorov–Smirnov test
3- Levene's test

(جدول ۲). عوامل بررسی شده مدیریت، عمق و جهت دامنه، تأثیر معنی‌داری (P>۰/۰۱) بر میزان فسفر خاک گذاشتند (جدول ۱). میانگین میزان فسفر در گلاجارها به میزان ۲۳ درصد نسبت به آرامگاه‌های جنگلی کاهش یافته و میزان آن از عمق ۰–۱۵ به ۳۰–۱۵ سانتی‌متری به میزان ۱۸ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین مقدار آن در دامنه شرقی بیشتر از شمالی و در دامنه شمالی بیشتر از جهت جنوبی بود (جدول ۲).

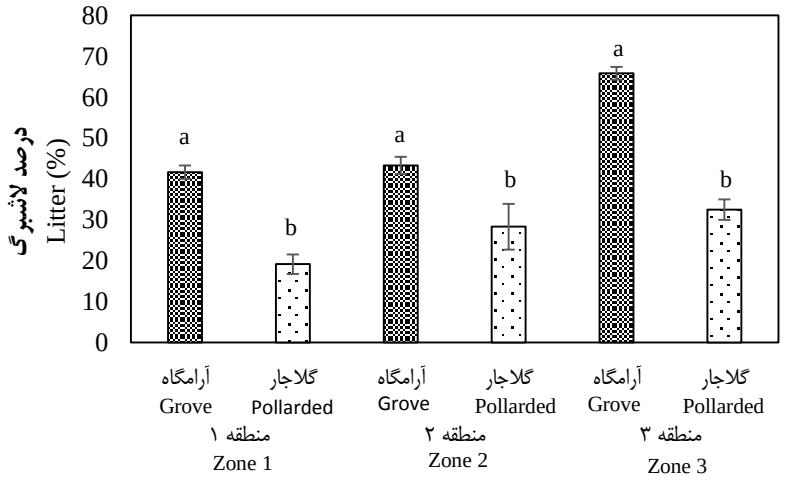
نتایج به‌دست آمده از آنالیز واریانس، نشان داد که جهت دامنه و مدیریت اثر معنی‌داری (P>۰/۰۱) بر روی میزان پتاسیم خاک گذاشت (جدول ۱). میانگین پتاسیم در گلاجارها به میزان ۱۸ درصد، نسبت به آرامگاه‌های جنگلی کاهش پیدا کرد و میزان آن در دامنه شمالی (۹۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و شرقی (۸۸/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بیشتر از دامنه جنوبی (۷۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) بود (جدول ۲).

میزان pH نیز در هر سه عامل عمق، جهت دامنه و مدیریت، تغییرات قابل ملاحظه‌ای (P>۰/۰۱) را از خود نشان داد (جدول ۱). میانگین pH در گلاجارها نسبت به آرامگاه‌های جنگلی، به میزان ۴٫۲٪ افزایش پیدا کرد و میزان آن از عمق اول به عمق دوم خاک، ۲٪ کاهش پیدا کرد. همچنین مقدار pH در دامنه جنوبی (۷/۳۵) و شرقی (۷/۲۱) بیشتر از دامنه شمالی (۶/۹۹) بود (جدول ۲). میزان هدایت الکتریکی دارای تغییرات معنی‌داری (P>۰/۰۱) در دو عامل عمق و مدیریت خاک بود (جدول ۱) به صورتی که میانگین آن در گلاجارها به میزان ۲۱ درصد نسبت به آرامگاه‌های جنگلی کاهش یافت. همچنین میزان هدایت الکتریکی در عمق ۱۵–۰ به ۳۰–۱۵ سانتی‌متری خاک، به میزان ۱۵ درصد کاهش پیدا کرد و در دامنه شمالی و شرقی، بیشتر از دامنه جنوبی بود (جدول ۲).



شکل ۲- میانگین درصد تاج پوشش در توده‌های مختلف

Figure 2- The Average canopy cover percentage in different stand



شکل ۳- میانگین مقدار لاشبرگ در توده‌های مختلف

Figure 3- The average amount of litter in different stand

جدول ۱- جدول تجزیه واریانس فاکتوریل در قالب طرح بلوک کاملا تصادفی

Table 1- Factorial Analysis ANOVA in Completely Randomized Block design

منبع تغییرات Source of variable	df	متغیرهای مورد بررسی Examined variables															
		وزن مخصوص ظاهری Bulk Density (gr/cm^3)		کربن SOC (%)		ذخیره کربن SOC Stock (ton/ha)		نیتروژن N (%)		فسفر P (mg/kg)		پتاسیم K (mg/kg)		pH		هدایت الکتریکی EC (dS/m)	
		میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F	میانگین مربعات Mean squares	F
عمق خاک Soil depth	1	0.00005	0.00^{ns}	13.23	30.11^{**}	6165	26.33^{**}	0.005	2.80^{ns}	599.4	17.7^{**}	25.66	0.31^{ns}	0.49	9.23^{**}	0.029	9.06^{**}
جهت دامنه slope aspects	2	0.57	21.23^{**}	3.57	8.13^{**}	5465	23.38^{ns}	0.002	1.37^{ns}	226.7	6.7^{**}	2185	26.59^{**}	0.83	15.49^{**}	0.0008	0.25^{ns}
مدیریت management	1	0.55	22.41^{**}	68.03	154.78^{**}	24036	102.8^{**}	0.105	52.02^{**}	953.1	28.25^{**}	5722	69.63^{**}	1.68	31.18^{**}	0.066	20.2^{**}
عمق × جهت depth× slope aspects	2	0.07	3.06^{ns}	0.82	81.8^{ns}	61.07	0.26^{ns}	0.003	1.61^{ns}	263.7	7.8^{**}	1721	20.95^{**}	0.17	3.22^{*}	0.0007	0.23^{ns}
عمق × مدیریت depth×management	1	0.01	0.50^{ns}	2.27	5.19^{*}	572.2	2.45^{ns}	0.005	2.46^{ns}	137.8	4.08^{*}	130.9	1.59^{ns}	0.014	0.27^{ns}	0.0001	0.04^{ns}
جهت × مدیریت slope aspects×management	2	0.17	6.92^{**}	3.56	8.11^{**}	1004	4.3^{*}	0.0007	0.39^{ns}	10.17	0.30^{ns}	26.73	0.33^{ns}	0.005	0.10^{ns}	0.008	2.75^{ns}
عمق × جهت × مدیریت depth×management	3	0.01	$0/07^{ns}$	2.78	6.33^{**}	1080	4.62^{*}	0.0003	0.19^{ns}	60.66	1.8^{ns}	26.5	0.32^{ns}	0.002	0.05^{ns}	0.005	1.81^{ns}
مدل model	11																
خطای کل Total error	71																

(** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱، * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ns عدم معنی‌داری)

(**significant at p≤0.01, * significant at p≤0.05 and ns non- significant)

جدول ۲- آزمون مقایسه میانگین‌های دانکن (± اشتباه معیار) برای متغیرهای بررسی شده در دو عمق خاک، دو منطقه مختلف و سه جهت متفاوت

Table 2- Duncan's multiple range test (± Standard Error) for studied soil properties in two soil depth, two different areas and three slope aspects

		وزن مخصوص ظاهری BD (g/cm³)	کربن SOC (%)	ذخیره کربن SOC Stock (ton/ha)	نیتروژن N (%)	فسفر P (mg/kg)	پتاسیم K (mg/kg)	pH	هدایت الکتریکی EC (dS/m)
مدیریت Management	آرامگاه Grove	1.43±0.04[b]	3.45±0.48[a]	73.57±10.8[a]	0.27±0.02[a]	31.1±2.9[a]	94.2±4.94[a]	7.03±0.11[b]	0.28±0.06[a]
	گلاجار Pollarded	1.6±0.03[a]	1.51±0.25[b]	37.03±5.35[b]	0.19±0.01[b]	23.8±3.1[b]	76.4±6.12[b]	7.30±0.11[a]	0.22±0.06[b]
عمق خاک Soil depth	0-15	1.5±0.04[a]	2.91±0.6[a]	64.55±12.6[a]	0.24±0.025[a]	30.3±3.29[a]	84.7±7.84[a]	7.10±0.13[b]	0.27±0.06[a]
	15-30	1.5±0.04[a]	2.05±0.43[b]	46.06±9.8[b]	0.22±0.02[a]	24.6±3.05[b]	85.9±5.25[a]	7.27±0.12[a]	0.23±0.06[b]
جهت دامنه Slope aspect	شمالی Northern	1.7±0.03[a]	2.86±0.43[a]	72.6±11.4[a]	0.25±0.029[a]	28.3±1.58[a]	92.7±5.54[a]	7±0.11[a]	0.25±0.07[a]
	شرقی Eastern	1.4±0.04[b]	2.46±0.7[b]	48.22±12.5[b]	0.23±0.021[a]	30.1±3.7[a]	88.6±4.99[a]	7.21±0.14[b]	0.26±0.07[a]
	جنوبی Southern	1.5±0.05[b]	2.10±0.4[b]	45.05±8.2[b]	0.22±0.02[a]	24.1±3[b]	74.5±6.96[b]	7.35±0.09[a]	0.25±0.05[a]

بحث

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق، درصد تاج پوشش و درصد لاشبرگ آرامگاه‌های جنگلی به طور معنی‌داری بیش از گلاجارها بود. در گلاجارها، عملیاتی از جمله: سرشاخه‌زنی، گلابری و گلازنی و چرای دام، باعث شده که درصد پوشش درختی به صورتی قابل توجهی کاهش پیدا کنند که به دنبال آن، درصد لاشبرگ سطح زمین نیز کاهش یافته است. بنابراین می‌توان گفت نوع استفاده از اراضی جنگلی و عملیات گلابری و گلازنی جهت تهیه علوفه‌ی دام، در طولانی‌مدت، باعث کاهش معنی‌دار درصد تاج پوشش شده است که این موید نتایج پژوهش صادقی و همکاران (Sadeghi *et al*., 2019) می‌باشد که در اراضی جنگلی زاگرس شمالی ارائه نموده‌اند. نه تنها عامل مدیریت، بلکه جهت دامنه نیز می‌تواند از جمله عوامل بسیار تأثیرگذار بر روی درصد پوشش درختی و گیاهی باشد (Marvie Mohajer, 2005) که خود به عواملی از جمله تفاوت در میزان تابش نور خورشید و رطوبت خاک برمی‌گردد. در این راستا، پورهاشمی (Poorhashemi, 2004)، در مطالعه خود بر روی جنگل‌های بلوط زاگرس شمالی، عنوان کرد که میزان جست‌دهی و زادآوری درخت بلوط، در دامنه‌های شمالی بیشتر از سایر جهت‌ها می‌باشد. چرای دام در مناطق گلازنی، سبب کوبیده شدن خاک و تشکیل میکروتراس‌های بسیار می‌گردد که این امر باعث کم شدن نفوذ پذیری آب و زیاد شدن هرز آب می‌شود (Jazirei and Ebrahimi Rastaghi, 2003). نتایج این پژوهش نشان داد، میزان وزن مخصوص ظاهری در گلاجارها نسبت به آرامگاه‌ها بیش‌تر شده است. از آنجایی‌که میزان کوبیدگی خاک و وزن مخصوص، رابطه مستقیمی با هم دارند (Moradi *et al*., 2008)، در مناطق گلازنی شده، احتمالا به دلایل مختلفی از جمله ورود دام و انسان به جنگل و کوبیده شدن خاک توسط آن‌ها در طول زمان، میزان وزن مخصوص زیاد شده باشد (Hajizaki, 2009) بنابراین افزایش آن در گلاجارها امری طبیعی به نظر می‌رسد. هرچه تراکم و فشردگی خاک بیش‌تر باشد، وزن مخصوص ظاهری را افزایش داده و در نتیجه ساختار خاک اثر منفی گذاشته، رطوبت خاک، تخلخل و نفوذ آب و هوا را کاهش می‌دهد (Toivio *et al*., 2017). در لایه‌های سطحی خاک، برعکس لایه‌های عمیق‌تر، وزن مخصوص ظاهری خاک می‌تواند به دلیل کاهش زی‌توده ریشه و بقایای گیاهی، افزایش یابد (Zhang *et al*., 2019)، اما در این پژوهش دو لایه خاک بررسی شده تغییری نکرد که ممکن است به دلیل شرایط محیطی مشابه برای دو لایه بوده باشد و ممکن است با عمیق‌تر شدت خاک، تغییراتی حاصل شود. نتایج حاصله حاکی از بیش‌تر بودن وزن مخصوص در دامنه‌های شمالی نسبت به دو دامنه دیگر بود. صالحی و همکاران (Salehi *et al*., 2011) عنوان نمودند که درصد تاج پوشش دارای همبستگی منفی با وزن مخصوص ظاهری است و دلیل این امر را مواد آلی اضافه شده به خاک به وسیله تاج پوشش درختان و افزایش خلل فرج در خاک دانسته‌اند که این خلاف نتایج به دست آمده در مطالعه حاضر است. دامنه‌های شمالی، در منطقه مورد مطالعه، به دلیل شرایط بهتر رطوبتی، همواره دارای پوشش علفی بیش‌تر در مدت زمان طولانی تری در سال هستند و بنابراین مدت زمان طولانی‌تری (نسبت به سایر جهت‌ها)، مورد چرای دام قرار می‌گیرند که احتمالا دلیل بیش‌تر بودن این پارامتر، چرای طولانی مدت‌تر دام در منطقه و متعاقباً کوبیدگی بیش‌تر خاک بوده است.

در تمامی مناطق مورد بررسی، ذخیره کربن خاک در آرامگاه‌های جنگلی بیش‌تر از گلاجارها بود. میزان کربن آلی خاک، به عوامل محیطی از جمله: پوشش درختی و گیاهی، اقلیم، توپوگرافی و مدیریت

بستگی دارد که از بین آن‌ها، مدیریت جنگل، می‌تواند بیشترین اثر ممکن را بر جای بگذارد (Mazouji *et al.*, 2020; Gogoi *et al.*, 2022; Mohammadi Samani *et al.*, 2022). و نوع استفاده از اراضی جنگلی، دارای همبستگی مثبت معنی‌داری با درصد پوشش درختی و لاشبرگ سطح خاک دارد (Mazouji *et al.*, 2020 و Sadeghi *et al.*, 2019). در این خصوص مازوجی و همکاران (Mazouji *et al.*, 2020)، رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2020) و محمدی‌سمانی و همکاران (MohammadiSamani *et al.*, 2022) نتایج مشابهی را به‌دست آوردند. در هر دو کاربری، ذخیره کربن در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متری خاک بیشتر از عمق ۳۰-۱۵ سانتی‌متری بود. در مناطق جنگلی، منبع اصلی کربن آلی در سطح خاک، بقایای گیاهی ناشی از شاخه، برگ و پوست درختان است که در آرامگاه‌های جنگلی، به دلیل پوشش گیاهی متراکم و وجود بقایای گیاهی، میزان کربن آلی خاک افزایش می‌یابد (Gholami *et al.*, 2016) که نتایج حاصل با نتایج محمدی‌سمانی و همکاران (Mohmmadi Samani *et al.*, 2020)، که عنوان کردند میزان کربن آلی در مناطق جنگلی زاگرس با کاهش عمق خاک، کاسته می‌شود، همخوانی دارد. درصد تاج پوشش درختی و لاشبرگ سطح زمین، در هر دو منطقه آرامگاه جنگلی و گلاجار، در دامنه شمالی بیش از دامنه شرقی و در دامنه شرقی بیش‌تر از دامنه جنوبی بوده است که با توجه به همبستگی معنی‌داری بین این عوامل و میزان مواد آلی خاک (Sadeghi *et al.*, 2019 ; Mazouji *et al.*, 2020)، بیشتر بودن درصد و ذخیره کربن در دامنه شمالی نسبت به سایر دامنه‌ها دور از انتظار نمی‌باشد. در این راستا صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2018) و بگوم و همکاران (Begum *et al.*, 2010)، نیز عنوان نمودند در دامنه‌های شمالی با پوشش جنگلی، میزان کربن آلی خاک به دلیل تنوع زیاد گیاهان و میکروارگانیسم‌های بیشتر و همچنین مقدار رطوبت بالاتر، از سایر دامنه‌ها بیشتر است.

مواد آلی، به عنوان منبع اصلی تامین کننده نیتروژن خاک و فسفر محسوب می‌شود (Sanchez-Maranon *et al.*, 2002). در مناطق مورد بررسی، مقدار نیتروژن و فسفر خاک در آرامگاه‌ها بیشتر از گلاجارها بود. در آرامگاه‌های مورد بررسی، به دلیل عدم استفاده از شاخ و برگ درختان و عدم چرای دام، میزان درصد تاج پوشش درختان و لاشبرگ سطح خاک به طور قابل ملاحظه‌ای بیش از گلاجارها می‌باشد. بنابراین می‌توان اذعان داشت میزان پوشش درختی و گیاهی، لاشبرگ و تجزیه آن‌ها و میزان مواد آلی، می‌تواند تأثیر به‌سزایی در افزایش میزان نیتروژن و فسفر خاک داشته باشد (Mazouji *et al.*, 2020; Rahimi *et al.*, 2020; Sanchez-Maranon *et al.*, 2002). که تاییدی بر نتایج سایر پژوهشگران از جمله محمدی‌سمانی و همکاران (Mohammadi Samani *et al.*, 2022)، صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2019)، صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2011) و روزتی و همکاران (Rosseti *et al.*, 2015) می‌باشد. میزان نیتروژن و فسفر در عمق دوم مورد بررسی کاهش پیدا کرد که تا حدی می‌توان آن را به کاهش مواد آلی و تهویه خاک مرتبط دانست. ریشه درختان و گیاهان در خاک، با جذب عناصر و بازگشت دوباره آن‌ها به خاک از طریق لاشبرگ‌ها و همچنین فضولات دامی می‌تواند دلیل دیگری برای افزایش نیتروژن و فسفر در بخش بالایی خاک باشد (Dhaou *et al.*, 2010; Foth and Ellis, 1988; Rahimi *et al.*, 2020 ; Salehi *et al.*, 2011). میزان نیتروژن و فسفر در دامنه‌های شمالی و شرقی، با درصد تاج پوشش و لاشبرگ بالاتر، از دامنه جنوبی بیش‌تر بود که می‌توان دلیل آن را، همبستگی بالای میزان مواد آلی و درصد تاج پوشش گیاهی با میزان نیتروژن و فسفر دانست. به‌طوری که با افزایش درصد تاج پوشش و درصد لاشبرگ سطح خاک، میزان نیتروژن و فسفر خاک افزایش یافته است (Maren *et al.*, 2015 ; Sadeghi *et al.*, 2019) که این نتایج موید پژوهش صادقی و همکاران (Sadeghi *et al.*, 2018) نیز می‌باشد.

پتاسیم، از جمله مشخصه‌های شیمیایی خاک است که نقش به‌سزایی در تعیین کیفیت خاک دارد (Mahmood *et al.*, 2021). در هر سه منطقه مورد بررسی، میزان پتاسیم خاک در آرامگاه‌ها بیشتر از گلاجارها بود. بیشتر بودن میزان این عامل را می‌توان به بازگشت زیادتر لاشبرگ و پسماندهای گیاهی به خاک در آرامگاه‌های جنگلی مرتبط دانست چون این مواد پس از تجزیه، به شکل ترکیبات قابل جذب در خاک در آمده و باعث استمرار حاصلخیزی خاک می‌گردند (Salehi *et al.*, 2011; Foth and Ellis, 1988; Rahimi *et al.*, 2020). البته باید به این نکته مهم نیز اشاره کرد که یکی از دلایل اصلی کاهش پتاسیم در گلاجارها و همچنین در دامنه جنوبی، احتمالاً آبشویی بیشتر و کاهش آن در این مناطق است زیرا مناطق یاد شده، دارای کمترین میزان درصد تاج پوشش بوده و دارای نقاط عاری از پوشش گیاهی بیشتری می‌باشند که خود مزید بر علت شده است (Salehi *et al.*, 2011; Rostamizad *et al.*, 2020; Foth and Ellis, 1988; Rahimi *et al.*, 2020). که این نتایج با نتایج پژوهشگران دیگر از جمله مازوجی و همکاران (Mazouji *et al.*, 2020)، رحیمی و همکاران (Rahimi *et al.*, 2020) و صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2011) نیز همخوانی دارد.

در تمامی مناطق مورد مطالعه، pH خاک در گلاجارها بیش‌تر از آرامگاه‌ها بود. محمدی‌سمانی و همکاران (Mohmmadi Samani *et al.*, 2020)، کم بودن pH در آرامگاه‌های جنگلی را به افزایش تنفس سلولی و تولید دی اکسید کربن و تولید ترکیبات اسیدی مربوط دانستند. عملیات گلازنی و گلابری و چرای دام در گلاجارها، از یکسو باعث کاهش سطح تاج پوشش درختان در گلاجارها شده که متعاقبا باعث افزایش تابش نور خورشید به کف جنگل، افزایش هوادیدگی

کانی‌ها می‌شود و از سوی دیگر وجود دام در گلاجارها و اوره موجود در ادرار آن‌ها، می‌تواند از علل دیگر افزایش pH در این مناطق باشد (Sadeghi *et al.*, 2019). میزان pH در لایه ۳۰-۱۵ سانتی‌متری بیشتر از سطح خاک بود که می‌توان آن را به آهکی بودن سنگ مادری منطقه مورد مطالعه نسبت داد (Jafari Sarabi *et al.*, 2021; Mohmmadi Samani *et al.*, 2020). میزان pH خاک، در دامنه شمالی کمترین و در دامنه جنوبی بیشترین مقدار را به خود اختصاص داد. دلیل این امر را می‌توان به میزان پوشش گیاهی کمتر و تابش بیشتر آفتاب، رطوبت کمتر، مقدار حجم لاشبرگ کمتر و فرایندهای خاکسازی کمتر در دامنه جنوبی است که منجر به نزدیک بودن pH خاک به سنگ بستر آهکی منطقه مرتبط دانست (Haiyan *et al.*, 2016).

قاعدتا از دلایل آن، عواملی از جمله مواد آلی و خصوصیات شیمیایی آب و خاک، می‌توانند بر روی هدایت الکتریکی خاک اثر بگذارند (Gholami *et al.*, 2016). با توجه به نتایج حاصله، هدایت الکتریکی در آرامگاه‌ها بیشتر از گلاجارها بود. در آرامگاه‌ها، به دلیل کم بودن چرای دام، پوشش درختی و گیاهی زیاد، تراکم بالای تاج پوشش و میزان لاشبرگ در سطح خاک، تابش نور خورشید به طور مستقیم به سطح خاک کم بوده که احتمالاً باعث تامین رطوبت کافی، جهت فعالیت میکروارگانیسم‌ها، برای تجزیه بقایای گیاهی شده است که در نهایت غلظت کاتیون‌های بازی محلول در خاک و هدایت الکتریکی را افزایش می‌دهد (Mazouji *et al.*, 2020; Mohmmadi Samani *et al.*, 2020). در توده‌های گلازنی‌شده، هدایت الکتریکی در خاک کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند کاهش ماده آلی و درصد کربن آلی خاک باشد (Gholami *et al.*, 2016). همچنین در این توده‌ها، به دلیل درصد تاج پوشش کم، سطح خاک در معرض بارندگی و شسته شدن کاتیون‌های بازی قرار گرفته که خود می‌تواند دلیلی برای کاهش EC باشد (Rahimi *et al.*, 2020). میزان هدایت الکتریکی در خاک دامنه‌های شمالی و شرقی، بیش‌تر از دامنه جنوبی بود که البته میزان تغییرات معنی‌دار نبود و این میزان کم تغییرات را تا حدی می‌توان به تراکم زیاد پوشش گیاهی و رطوبت مناسب در دامنه‌های شمالی و شرقی، نسبت به جهت جنوبی مرتبط دانست (Golmohammadi *et al.*, 2016).

نتیجه‌گیری

به طور کلی می‌توان گفت با توجه به اینکه مردم محلی در مناطق جنگلی زاگرس شمالی، برای تامین وضعیت اقتصادی و معیشتی خود در این جنگل‌ها فعالیت‌ها و دخالت‌هایی همانند: چرای دام، برداشت و قطع درختان، گلازنی و گلابری دارند، نمی‌توان تمام این جنگل‌ها را به منظور حفاظت، قرق کرد. از طرفی نتایج این تحقیق نشان داد که عواملی از جمله: چرای دام، گلابری و گلازنی می‌تواند بر روی درصد تاج پوشش و درصد لاشبرگ حاصله از آن‌ها، تأثیرگذار باشد، که به دنبال آن، می‌تواند بر وزن مخصوص و خصوصیات شیمیایی خاک اثر گذاشته و در نتیجه باعث کاهش حاصلخیزی خاک و همچنین کاهش ذخیره کربن آلی خاک گردد. نتایج حاصل از این تحقیق موید اثرات طولانی‌مدت گلابری و گلازنی در جنگل‌های زاگرس می‌باشد به صورتی که باعث کاهش ۵۰ درصدی آن در گلاجارها نسبت به آرامگاه‌های جنگلی شده است. جهت دامنه، بر فرایندهای خاکسازی اثر گذاشته و می‌تواند دلیلی برای تفاوت ویژگی‌های شیمیایی خاک باشد. به عبارتی جهت دامنه، بر رطوبت و دما و در ادامه بر کیفیت و حاصلخیزی خاک اثر می‌گذارد. به طور کلی دامنه‌های شمالی نسبت به دامنه‌های جنوبی، به دلیل کم بودن تابش نور خورشید و بالا بودن رطوبت و وجود پوشش گیاهی و ماده آلی، حاصلخیزی خاک جنگلی در زاگرس بیشتر است. با حفظ پوشش درختی و عدم برداشت آن‌ها به هر نحوی (گلازنی، سرشاخه‌زنی و گلابری)، می‌توان شرایط خاک در آن منطقه را بهبود بخشید. با اصلاح مدیریت این مناطق جنگلی از طریق آموزش مردم محلی و فراهم آوری امکانات و منابع علوفه‌ای کافی و کاهش فشار بهره‌برداری، فرآیند طبیعی تولید و تجزیه مواد آلی به صورت بهتری می‌تواند کنترل شود که خود، در بلند مدت، می‌تواند باعث افزایش کیفیت خاک و ذخیره کربن در این جنگل‌ها شود.

منابع

1. Begum, F., Bajracharya, R., Sharma, S., & Sitaula, B.K. (2010). Influence ofslope aspect on soil physico-chemical and biological properties in the mid hills of central Nepal. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 17: 438–443. http://dx.doi.org/10.1080/13504509.2010.499034.
2. Biabani, K., Pilehvar, B., & Safari, A. (2016). Comparison of spatial patterns and interspecific association of Gall Oak (*Quercus infectoriaOliv.*) and Lebanon Oak (*Q. libaniOliv.*) in two less degraded and degraded Oak stands in northern Zagros (Case study: Khedr Abad, Sardasht). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research 24*(1): 77-88. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijfpr.2016.106690.
3. Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Ecological Indicators* 134: 9 p. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470.
4. Dhaou, S.O., Abdullah, F., Belgacem, A.O., & Chaieb, M. (2010). The Protection effects on floristic diversity in a

North African Pseudo Savanna. *Pakistan Journal of Botany (Pak. J. Bot) 42*(3): 1501-1510.
5. Fattahi, M. (1994). *The study of Zagros Oak forests and their main degradation causes*. Published by Research Institute of Forests and Rangelands, Tehran 63p. (In Persian with English abstract)
6. Foth, H.D., & Ellis, B.G. (1988). *Soil fertility*. Published by Wiley. 304p. https://doi.org/10.1201/9780203739341.
7. Ghazanfari, H., Namiranian, M., Sobhani, H., & MarviMohajer, R.M. (2004). Traditional forest management and its application to encourage Public Participation for Sustainable forest management in the northern Zagros mountain of Kurdistan Province, Iran. *Scandinavian Journal of Forest Science 19*(4): 65-71. https://doi.org/10.1080/14004080410034074.
8. Gholami, L., Davari, M., Nabiollahi, K., & Joneidi Jafari, H. (2016). Effect of land use changes on some soil physical and chemical properties (case study: Baneh). *Journal of Water and Soil Science 5*(3): 13-27. (In Persian with English abstract)
9. Gogoi, A., Ahirwal, J., & KumarSahoo, U. (2022). Evaluation of ecosystem carbon storage in major forest types of Eastern Himalaya: Implications for carbon sink management. *Journal of Environmental Management* 302 (PtA): 113972. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113972.
10. Golmohammadi, H., Ramezanpour, H., & Rezapour, S. (2016). Study on some soil properties as affected by different slope position and aspect in mountainous Landform with different parent materials in Masouleh. *Water and Soil Science 26*(2): 54-66. (In Persian with English abstract)
11. Hajizaki, H. (2009). *The effect of Pollarding on soil physico-chemical properties in the northern Zagross forest*. MSc Thesis. University of Kurdistan, Sanandaj, Iran, 72p. (In Persian with English abstract)
12. Haiyan, C., Xingjia, X., Jian, Y., Adams, J.M., Kaoping, Z., Yuntao, L., & Yu, S. (2016). Effects of slope aspects on soil bacterial and arbuscular fungal communities in a boreal forest in China. *Pedosphere 26*(2): 226–234. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60037-6.
13. Heidarian, Sh., & Ghasemi Aghbash, F. (2020). Study of Carbon sequestration in trees and soil in two urban parks of Kohdasht city. *Journal of Environmental Science and Technology 22*(1): 215-225. (In Persian with English abstract). https://civilica.com/doc/1287579.
14. Jafari Haghighi, M. (2003). *Methods of Soil Analysis: Sampling and Important Physical and Chemical Analysis*. NedayeZoha Press, Sari 236p. (In Persian with English abstract)
15. Jafari Sarabi, H., Pilehvar, B., Abrari, K., & Waez-Mousavi, S.M. (2021). Changes in carbon sequestration and some edaphic traits in forest types of central Zagros (Case study: the forests of Lorestan province). *Ecology of Iranian Forests 9*(17): 142-151. (In Persian with English abstract)
16. Jazirehi, M.H., & Ebrahimi Rostaghi, M. (2003). *Silviculture in Zagros*. University of Tehran Press, Tehran 560p (In Persian with English abstract).
17. Juhos, K., Madarasz, B., Kotroczo, Z., Beni, A., Makadi, M., & Feket, I. (2021). Carbon sequestration of forest soils is reflected by changes in physicochemical soil indicators –A comprehensive discussion of a long-term experiment on a detritus manipulation. *Geoderma* 385: 114918. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114918.
18. Mahmood, H., Saha, Ch., Paul, N., Deb, Sh., Abdullah, R., Islam Tanvir, S.S., Bashar, A., Roy, S., Rabby, F., Ahmed, Sh.N., & Ali, H. (2021). The soil quality of the world largest refugee campsites located in the Hill forest of Bangladesh and the way forward to improve the soil quality. *Environmental Challenges* 3: 100048. https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100048.
19. Malaga, N., Hergoualc'h, K., Kapp, G & Martius, C. (2021). Variation in vegetation and ecosystem carbon stock due to the conversion of disturbed forest to oil palm plantation in Peruvian Amazonia. *Ecosystems 24*(2): 351-369. https://doi.org/10.1007/s10021-020-00521-8.
20. Maren, I.E., Karki, S., Prajapati, C., Yadav, R.K., & Shrestha, B.B. (2015). Facing north or south: Does slope aspect impact forest stand characteristics and soil properties in a semiarid trans-Himalayan valley?. *Journal of Arid Environments* 121: 112-123. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.06.004.
21. Marvie Mohadjer, M.R. 2005. *Silviculture.* Professor of Silviculture University of Tehran, University of Tehran Press 410p. (In Persian with English abstract)
22. Mazouji, M., Mohammadi Samani, K., & Hosseini, V. (2020). The variation in density and biomass of earthworms with physical and chemical properties of soil after forest land-use change. *Iranian Journal of Forest 12*(2): 203-218. (In Persian with English abstract)
23. Mohmmadi Samani, K., Pordel, N., Hosseini, V., & Shakeri, Z. (2020). Effect of land-use changes on chemical and physical properties of soil in western Iran (Zagros oak forests). *Journal of Forestry Research* 31: 637-647. https://doi.org/10.1007/s11676-018-0799-y
24. Mohammadi Samani, K., Hoseini, V., & Rostami, H. (2022). Physical and chemical properties of soil in sacred groves and surrounding oak woodlands in Baneh County. *Forest and Wood Products 74*(4): 383-394. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jfwp.2021.317825.1154.
25. Moradi, H., Mirnia, S.Kh., & Lahourpour, Sh. (2008). Effect of grazing intensities on the soil physical properties and vegetation cover of Charandoo summer rangelands in Kurdistan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research 32*(3): 369-378. (In Persian with English abstract).

26.Plieninger, T., Quintas-Soriano, C., Torralba, M., Mohammadi Samani, K., & Shakeri, Z., (2020). Social dynamics of values, taboos and perceived threats around sacred groves in Kurdistan, Iran. *People and Nature* 1237-1250. https://doi.org/10.1002/pan3.10158.
27.Poorhashemi, M. (2004). *Study on natural regeneration of oak species in Marivan forests*. A thesis submitted for Ph.D in forestry. Faculty of natural resources, University of Tehra press.
28.Prietzel, J., Zimmermann, L., Schubert, A., & Christophel, D. (2016). Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience* 9: 543-548. https://doi:10.1038/ngeo2732.
29.Rahimi, J., Mohammadi Samani, K., Shabanian, N., & Rahmani, M.Sh. (2020). Investigating some chemical soil properties in the Pollarded and less-disturbed forest stands in the northern Zagros (Case study: Baneh forest, Kurdistan). *Journal of Environmental Science and Technology (JEST) 22*(3): 55-68. (In Persian with English abstract). https://doi:10.22034/JEST.2018.24965.3400.
30.Rajan, K., Natarajan, A., Sankarauarayanan, K., & Badrinath, M.S. (2010). Soil organic carbon the most reliable indicator for monitoring land degradation by Soil erosion. *Current Science* 99: 6-25.
31.Rosseti, I., Bagella, S., Cappai, M.C., Lai, R., Roggero, P.P., Martins dasilva, P., Sousa, J.P., Querner, P., & Seddaiu, G. (2015). Isolated cork oak trees affect soil properties and biodiversity in a Mediterranean wooded grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 202: 203-216. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.008.
32.Rostamizad, P., Hosseini, V., & Mohammadi Samani, K. (2020). Effects of Persian turpentine tree litter and slope aspect on soil chemical properties in a Zagros forest, Iran. *Journal of Forestry Research 31*(3): 1583-1588. http://dx.doi.org/10.1007/s11676-019-00950-9.
33.Sadeghi, S., Mohammadi-Samani, K., Hosseini, V & Shakeri, Z. (2019). *Effect of aspect on some soil chemical properties in the forest (Case study: Baneh, Armardeh forest)*. The 4 National Conference on Energy, Environmental, Agriculture, and Sustainable Architecture. 562-571. (In Persian with English abstract)
34.Sadeghi, S., Mohammadi Samani, K., Hosseini, V., & Shakeri, Z. (2019). Effect of grazing intensity and type of livestock on physical and chemical properties of forest soil (Case study: Armardeh Forest, Baneh, Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research 27*(3): 349-363. (In Persian with English abstract). http://dx.doi.org/10.22092/ijfpr.2019.127735.1860.
35.Salehi, A., Mohammadi, A., & Safari, A. (2011). Investigation and comparison of physical and chemical soil properties and quantitative characteristics of trees in less-damaged and damaged area of Zagros forests (Case study: Poldokhtar, Lorestan province). *Iranian Journal of Forest 3*(1): 81-89.
36.Sanchez-Maranon, M., Soriano, M., Delgado, G., & Delgado, R. (2002). Soil Quality in Mediterranean Mountain Environment. *Soil Science Society of America Journal* 66: 948-958. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9480.
37.Shakeri, Z., MarviMohajer, M.R., Etemad, V., & Namiranian, M. (2008). Qualitative investigation of Gall Oak (*Quercus infectoriaOliv.*) acorns in untouched and pruned forest stands of Baneh (Kurdistan Province, N-W Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research 16*(1): 99-111. (In Persian with English abstract)
38.Subedi, B.P., Pandey, S., Pandey, A., Rana, E.B., Bhattarai, S., Charmakar, S., & Tamrakar, R. (2011). *Guideline for Measuring Carbon Stocks in Communitymanaged Forests*. Asia Network for Sustainable Agriculture Bio-resources, Kathmandu, Nepal.
39.Toivio, J., Helmisaari, H.S., Palviainen, M., Lindeman, H., Ala-Ilomaki, J., Siren, M., & Uusitalo, J. (2017). Impacts of timber forwarding on physical properties of forest soils in southern Finland. *Forest Ecology and Management* 405: 22-30. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.09.022.
40.Wang, S., Fan, J., & Liu, S. (2017). Comprehensive analysis of difference in carbon stock estimation in the grasslands of China. *Acta AgrestiaSinica* 25: 905-913. https://doi.org/10.3390/su12093682.
41.Zhang, Q., Shao, M., Jia, X., & Wei, X. (2019). Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests. *Geoderma* 338: 170-177. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.051.
42.Zobeiri, M. (2008). *Forest Biometry*. University of Tehran Press 407p.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 593-610

Comparison of Soil Biological Activity in Forest with Coniferous and Broadleaf Trees in Biston Region of Kermanshah

S. Mehrnoosh[1], A. Beheshti Ale Agha[2*], F. Rakhsh[3], M. Pourreza[4], A.A. Safari Sinegani[5]

Received: 11-08-2022
Revised: 19-10-2022
Accepted: 20-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Mehrnoosh, S., Beheshti Ale Agha, A., Rakhsh, F., Pourreza, M., & Safari Sinegani, A.A. (2022). Comparison of Soil Biological Activity in Forest with Coniferous and Broadleaf Trees in Biston Region of Kermanshah. *Journal of Water and Soil 36*(5): 593-610. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.78164.1189

Introduction

The maintenance of planted forests in arid and semi-arid lands is important. Soil formation in forest ecosystems is different with different tree species. Tree species have a direct and indirect effect on soil organisms. Forest ecosystems change their species composition and abundance of microorganisms, and consequently their biogeochemical cycles. The accumulation of vegetation biomass and the improvement of soil fertility can play a significant role in soil restoration.

Materials and Methods

In order to investigate the biological characteristics of the soil from 5 treatments, including agricultural (dry farming and relatively poor lands that are usually cultivated barley and wheat and have low productivity), pasture (pastures with minimal vegetation and high slopes that are affected by overgrazing have been changed to barren lands), forest with Acacia type (under and outside the crown), forest with the *Cupressus arizonica* type (under and outside the crown) and forest with the *Pinus brutia* type (under and outside the crown) randomly. Sampling was done in 3 repetitions from the 0 to 5 cm layer. The statistical sampling design of this research was completely random, in which, according to the type of afforested species, two types of coniferous forest stands (including *Cupressus arizonica* and *Pinus brutia*) and one broadleaf stand (Acacia species) were selected. Also, the area under the crown trees and outside the crown trees was also investigated. Soil samples were sampled with sterile equipment and crushed through a 4-mm sieve. Fresh and moist soil was kept at 4 °C temperature for soil biological tests. Microbial biomass carbon, soil basal respiration (197 days), substrate-induced respiration, and metabolic quotient were measured. Streptomycin sulfate was used to measure fungal respiration and cycloheximide was used to measure bacterial respiration. The activities of urease, acid, and alkaline phosphatase enzymes were determined. After measuring the biological properties of the soil, the normality of the data was checked by the Anderson–Darling test, and the homogeneity of the variance of the treatments was checked by using Levene's test. Analysis of data variance was done using One-Way ANOVA and average data comparison was done using Duncan's test at 5 and 1% probability levels (SAS 9.4 and SPSS 26).

Results and Discussion

The results of soil biological characteristics analysis showed that the highest values of soil respiration and amount of consumed organic matter, substrate-induced respiration, microbial biomass carbon, enzyme activities, and fungal respiration were measured in conifers. Although the amount of these features was also significant in broadleaf trees, they had significant differences. In this study, the high soil respiration rate in coniferous covers compared to broadleaf can be due to the high organic carbon content of the soil in this cover. According to the results of substrate-induced respiration in different coatings, likely the activity of microorganisms involved in the

1, 2 and 3- Master's Degree in Soil Biology and Biotechnology, Associate Professor and Research Assistant, Department of Soil Science, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)
4- Assistant Professor, Department of Natural Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran
5- Professor, Department of Soil Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

decomposition of organic matter in the studied habitats had a significant difference; Therefore, different coatings can affect the population of soil microorganisms as the main source of decomposition and emission of carbon dioxide by changing the quantity and quality of organic matter and other factors. Also, the highest values of metabolic quotient and bacterial respiration were observed in agricultural and pasture covers. A higher metabolic quotient in these covers indicates a decrease in the efficiency of the use of leaf litter by the soil microbial community. In general, the metabolic quotient in the bacterial community is higher than the fungal community; Therefore, it seems that the predominance of the bacterial population in agricultural and pasture cover has caused this index to increase, although plowing and cultivation, and disturbance of these covers have caused stress to this bacterial community and as a result increased the metabolic quotient deficit in these covers.

Conclusion

The results of this research showed that the type of planted tree species causes significant changes in the biological characteristics of the soil. The current research shows that the forest, whether coniferous or broadleaf, had the highest values of enzyme activities, basal respiration, substrate-induced respiration, microbial biomass carbon, and the lowest values of metabolic quotient compared to agricultural and pasture covers. Afforestation increases biological activity and possibly the number and diversity of microorganisms, and improves soil characteristics in the long term. In agriculture and pasture land, due to the destruction of soil and aggregates by agricultural activities such as plowing or excessive livestock grazing, the amount of organic carbon and the activity of microorganisms decreases, and with the decrease of other soil characteristics, the quality of the soil decreases over time. From this research, it can be concluded that the planting of forest species in the soils of degraded areas in the long term can increase soil organic carbon due to high-quality leaf litter, and as a result, increase permeability and soil moisture. Increasing soil organic carbon increases the activity of microorganisms, and in the long term, it will improve various soil characteristics. Planting forest plants in the natural areas of the country, which were destroyed due to the change of use to agriculture and indiscriminate cultivation and finally abandoned, can improve the characteristics of the soil and, as a result, establish the native vegetation of the region, and increase the permeability of water in the soil, the risk of soil erosion, floods, etc. reduce.

Keywords: Bacterial respiration, Enzyme activity, Fungal respiration, Microbial biomass, Organic matter

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۶۱۰-۵۹۳

مقایسه فعالیت زیستی خاک در جنگل با درختان سوزنی‌برگ و پهن‌برگ در منطقه بیستون کرمانشاه

سحر مهرنوش[۱]- علی بهشتی آل آقا[۲]- فاطمه رخش[۳]- مرتضی پوررضا[۴]- علی اکبر صفری سنجانی[۵]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸

چکیده

نگهداری و حفظ جنگل‌های دست کاشت در سرزمین‌های خشک و نیمه‌خشک وابسته به بررسی ویژگی‌های خاک است، زیرا این جنگل‌ها به‌مرور زمان ویژگی‌های خاک را تغییر داده و مطالعه این تغییرات موجب افزایش آگاهی و حفظ جنگل‌ها می‌شود. پژوهش کنونی با هدف بررسی پیامدهای خوب و بد این توده‌های گیاهی جنگلی بر کیفیت زیستی خاک انجام شد. دو نوع جنگل (سوزنی‌برگ و پهن‌برگ) که بر روی یک چشم‌انداز با درجه و جهت شیب یکسان بود انتخاب شدند. ۵ تیمار (زمین کشاورزی، زمین بکر، گونه اقاقیا، سرو نقره‌ای و درخت کاج) انتخاب شده و در ۳ تکرار از لایه صفر تا ۵ سانتی‌متر در دو بخش سایه‌انداز و دور از سایه‌انداز درخت به گونه تصادفی نمونه‌گیری مرکب از خاک انجام شد. نتایج تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های زیستی خاک نشان داد که بالاترین مقادیر ویژگی‌های تنفس خاک و مقدار ماده آلی مصرف‌شده (۱۲/۸۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، تنفس برانگیخته (۷۵۳/۹۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، کربن زیست‌توده میکروبی (۱/۰۴ میکروگرم کربن بر گرم کربن زیست‌توده میکروبی در روز)، فعالیت‌های آنزیمی و تنفس قارچی در سوزنی‌برگان اندازه‌گیری شد. اگرچه مقدار این ویژگی‌ها در پهن برگان نیز قابل‌توجه بود اما دارای تفاوت معنی‌داری بودند. همچنین بالاترین مقادیر کسر متابولیکی (۱/۰۴ و ۰/۹۹ میکروگرم کربن بر گرم کربن زیست‌توده میکروبی در روز) و تنفس باکتریایی (به ترتیب ۰/۶ و ۰/۷۸ میلی‌گرم دی اکسید کربن بر گرم خاک) در پوشش‌های کشاورزی و چراگاه مشاهده شد. نتایج نشان داد که در منطقه بیستون جنگل‌کاری با گونه‌های پهن‌برگ و به‌خصوص سوزنی‌برگ باعث بهبود کیفیت خاک نسبت به پوشش‌های کشاورزی و چراگاه شده است که می‌تواند وابسته به انباشتگی لاش برگ فراوان و خاستگاه کربن آلی برای ریزجانداران در این پوشش‌ها باشد.

واژه‌های کلیدی: تنفس باکتریایی، تنفس قارچی، زیست‌توده میکروبی، فعالیت آنزیم، ماده آلی

مقدمه

شکل‌گیری خاک در اکوسیستم‌های جنگلی با گونه‌های مختلف درختی متفاوت می‌باشد (Salehi *et al.*, 2012) بنابراین گونه‌های درختی بر روی موجودات زیستی خاک به گونه متفاوتی تأثیر دارد (Binkley, 2010). گونه‌های سوزنی‌برگ خاک پیرامون خود و زیر درخت را اسیدی کرده و مانع از رشد گونه‌های دیگر گیاهان می‌شود. از دیگر اثرات گونه‌های سوزنی‌برگ می‌توان به خاصیت دگرآسیبی کمبود رطوبت مورد نیاز پوشش علفی، کوبیدگی شدید خاک، تراکم زیاد پوشش گیاهی در واحد سطح، نور و حرارت کم و فراوانی لاش برگ و سوزنی‌های ریخته شده در زیر درختان سوزنی‌برگ، اشاره نمود

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک، دانشیار و دستیار پژوهشی گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: beheshtiali97@gmail.com)
۴- استادیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
۵- استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.78164.1189

(Polyak and Sukcharevich, 2019). وجود سطوح جنگلی با گونه‌های گیاهی پهن‌برگ نیز موجب تغییر، افزایش و یا کاهش ویژگی‌های زیستی خاک مانند زیست‌توده میکروبی، تنفس و فعالیت آنزیمی می‌شود (Hölscher *et al.*, 2002).

درختان از طریق تولید اسیدهای آلی در برگ یا دیگر ترشحات می‌توانند بر اسیدیتی یا قابلیت دسترسی کلسیم خاک مؤثر باشند. درختان از طریق تأمین مقادیر مختلفی از مواد آلی با ترکیبات شیمیایی مختلف طی خزان یا ایجاد لاش برگ روی خاک بر آن تأثیر می‌گذارند (Hur *et al.*, 2009; Cai *et al.*, 2017). تجزیه و فساد برگ و شاخه‌های درختان در کف جنگل موجب تغییر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود (Binkley, 2010). تنوع و فراوانی ریزجانداران مختلف خاک، از جمله انواع باکتری‌ها و قارچ‌ها، که منبع بسیاری از آنزیم‌های خاک هستند، تحت تأثیر تجزیه و تخریب لاش برگ درختان قرار می‌گیرد (Deharveng, 2011).

ریزجانداران خاک بخش مهمی از اکوسیستم هستند و نقش حیاتی در تجزیه لاش برگ درخت، معدنی شدن عناصر غذایی و استفاده پایدار از اکوسیستم جنگل ایفا می‌کنند (Yang *et al.*, 2018). متفاوت بودن نوع پوشش اراضی و تفاوت گونه‌های درختی کاشته شده اثر قابل‌توجهی روی کربن زیست‌توده میکربی و نیتروژن خاک دارد (Soleimani *et al.*, 2019). به‌خوبی مشخص‌شده است که همراه با تغییر در شیمی خاک، زیست‌توده میکروبی و ساختار جامعه میکروبی خاک نیز می‌تواند تحت تأثیر نوع گونه درختی قرار گیرد (Iovieno *et al.*, 2010). در بیشتر مطالعات سرعت تنفس کمتر سوزنی‌برگان در مقایسه با پهن‌برگان گزارش‌شده که احتمالاً به دلیل حذف برخی ریزجانداران به‌ویژه قارچ‌های اندومیکوریز در جنگل‌کاری با سوزنی‌برگان و به دنبال آن کاهش تنوع جامعه میکروبی خاک تحت کشت سوزنی‌برگان می‌تواند باشد (Bakhshipour *et al.*, 2013). مطالعات اثبات کرده‌اند که گونه‌های سوزنی‌برگ در مقایسه با پهن‌برگ به دلیل تفاوت در ترکیب مواد آلی ورودی به خاک (لیگنین، سلولز و پلی فنل) و تجزیه کند لاش برگ فعالیت‌های میکروبی کمتری دارند (Kooch and Zoghi, 2012). به‌طورکلی در خاک‌های محتوی رس بیش‌تر و pH قلیایی‌تر (خاک معمول در مناطق با پوشش پهن‌برگ) میزان زی‌توده میکروبی کربن بیشتر است (Jones *et al.*, 2019).

کوچ و پارسا پور (Kooch and Parsapoor, 2016) اثر پوشش‌های جنگلی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ را بر شاخص‌های میکروبی خاک بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که بیش‌ترین مقادیر مشخصه‌های تنفس میکروبی، کربن زیست‌توده میکروبی، نسبت زیست‌توده میکروبی کربن به نیتروژن و ضریب متابولیکی به پوشش جنگلی کاج سیاه اختصاص داشت. درحالی‌که بالاترین نیتروژن زیست‌توده میکروبی خاک در توده جنگلی توسکا ییلاقی مشاهده شد. مقدار آنزیم‌های اوره آز و دهیدروژناز و هم‌چنین میزان زیست‌توده میکروبی، کربن آلی و نیتروژن در توده طبیعی توسکا بیشتر از توده دست کاشت کاج تدا بود. توده توسکای قشلاقی نسبت به کاج تدا شرایط مناسب‌تری را برای تولید مواد آلی، زیست‌توده میکروبی و فعالیت ریزجانداران خاک فراهم می‌آورند (Salehi *et al.*, 2012).

یانگ و همکاران (Yang *et al.*, 2018) در بررسی تأثیر کاشت گونه‌های درختی صنوبر، کاج کره‌ای، کاج اروپایی و کاج مغولی مشاهده کردند که در تمامی گونه‌های درختی کربن آلی خاک، نیتروژن کل و فسفر کل، در مقایسه با جنگل‌زدایی بالاتر بود و در میان گونه‌ها در گونه صنوبر بسیار بالاتر بود. محتوای فنول خاک نیز در مقایسه با جنگل‌زدایی بسیار بالاتر بود. تمامی گونه‌ها به‌جز کاج مغولستان، زیست‌توده میکروبی خاک را در مقیاس‌های مختلف نسبت به زمین‌های رهاشده (جنگل‌زدایی) بهبود دادند. تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که گونه‌های درختی به‌طور قابل‌توجهی روی ترکیب و ساختار جامعه میکروبی خاک تأثیر می‌گذارند.

آگوستو و همکاران (Agusto *et al.*, 2002) تأثیر چندین گونه رایج درختی اروپایی را روی حاصلخیزی خاک مورد بررسی قراردادند. در این پژوهش مشخص گردید سرعت معدنی شدن ماده آلی و نیتریفیکاسیون، بستگی به گونه درختی دارد. گونه سوزنی‌برگ کاج نوئل دارای اثرات منفی روی برخی عناصر غذایی مانند کلسیم و منیزیم بود. این‌گونه باعث افزایش روند اسیدی شدن خاک گردید و نتیجه‌گیری شد چنین گونه‌های درختی نباید در خاک‌های بسیار فقیر از عناصر غذایی به‌خصوص در مناطقی که تحت تأثیر رسوبات اسیدی قرارگرفته‌اند، کاشته شوند. نمونه‌برداری از عمق صفر تا ۵ سانتی‌متری خاک تحت تأثیر گونه‌های سوزنی‌برگ (*Dacrycarpus imbricatus* and *Dacrydium gracilis*) و پهن برگ (*Lithocarpus clementianus*, *Palaquium rioence*, and *Tristaniopsis clementis*) نشان داد که فعالیت فسفاتاز اسیدی و بتا-گلوکوزیداز بین گونه‌های درختی متفاوت بود و فعالیت این آنزیم‌ها در خاک تحت تأثیر گونه‌های سوزنی‌برگ بالاتر بود؛ اما فعالیت فنول اکسیداز بین گونه‌های مختلف درختی از تفاوتی معنادار برخوردار نبود. بیشتر ویژگی‌های خاک در بین گونه‌های درختی تفاوت زیادی نداشتند (Ushio *et al.*, 2010).

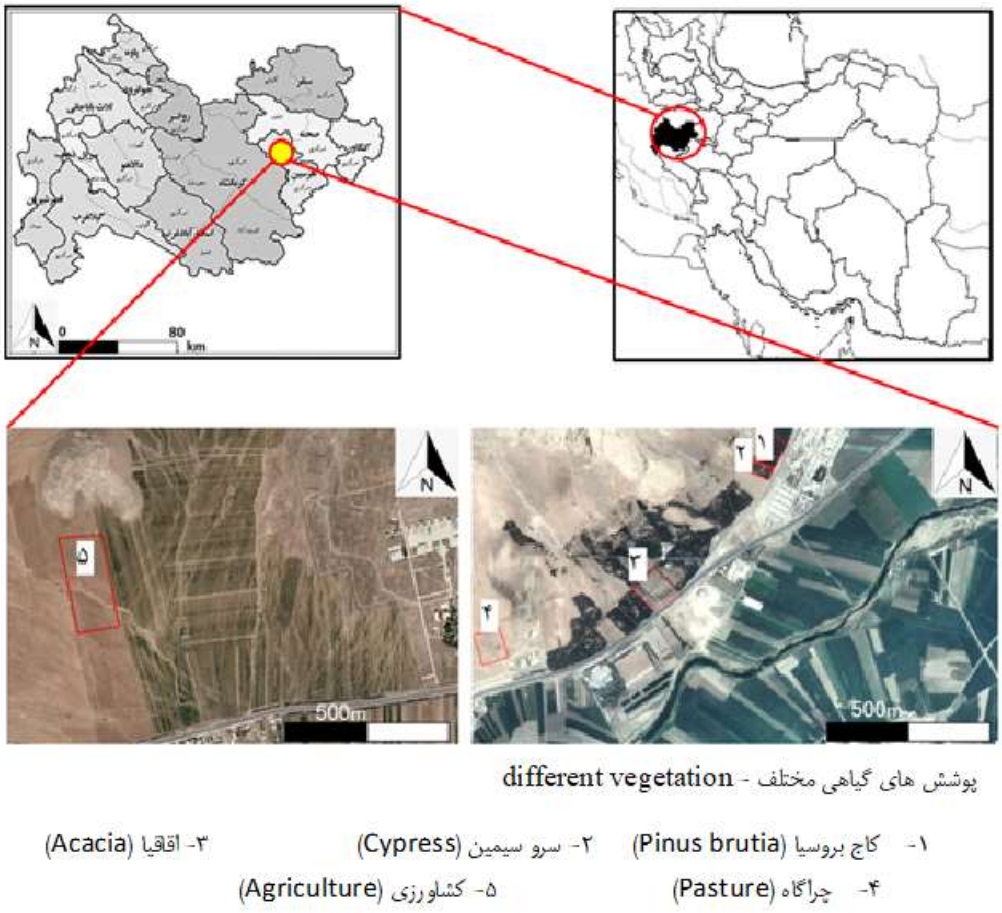
در سال‌های اخیر و با توجه به گزارش‌های اداره حفاظت محیط‌زیست استان کرمانشاه، خاک منطقه جنگل‌کاری شده بیستون کرمانشاه با توده‌های درختان پهن‌برگ و سوزنی‌برگ نظیر بروسیا (*Pinus brutia Ten*) و توده‌های پهن‌برگ مانند اقاقیا (*Robinia*)، زبان‌گنجشک (*Fraxinus excelsior*)، بادام‌کوهی (*Amygdalus scoparia Spach*) و سرو نقره‌ای (*Cupressus arizonica Green*) تحت تأثیر استفاده از گیاهان ناسازگار با اقلیم این منطقه قرارگرفته و توجه به نوع گونه انتخابی برای جنگل‌کاری و مطالعه تأثیر نوع گونه

بر کیفیت خاک موجب پایداری طولانی‌مدت این عرصه‌های جنگل‌کاری می‌شود. پژوهش حاضر به‌منظور بررسی آثار مثبت و منفی این توده‌های گیاهی جنگلی بر کیفیت زیستی خاک انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه، در استان کرمانشاه، در منطقه جنگل‌کاری شده بیستون در غرب ایران واقع می‌باشد (شکل ۱). بر پایه اطلاعات ایستگاه هواشناسی کرمانشاه میانگین بارش منطقه ۴۰۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در سال و متوسط حداکثر دما ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداقل دمای آن ۱۲- تا ۱۳- درجه سانتی‌گراد است. بیشترین میزان بارندگی در فصول پاییز تا بهار انجام‌شده و تابستان خشک در منطقه حاکم می‌باشد. پوشش غالب در این منطقه بلوط، زالزالک، نسترن، یونجه و شنبلیله می‌باشد.

به‌منظور بررسی خصوصیات بیولوژیک خاک از ۵ تیمار شامل کاربری کشاورزی (اراضی دیم و نسبتاً فقیری که معمولاً تحت کشت جو و گندم قرار می‌گیرند و باردهی کمی دارند)، کاربری چراگاه (مراتعی با حداقل پوشش گیاهی و شیب زیاد که در اثر تردد و چرای بیش از ظرفیت دام به سمت اراضی بایر سوق داده شده‌اند)، کاربری جنگل با تیپ اقاقیا (زیر تاج بیرون تاج)، کاربری جنگل با تیپ سرو نقره‌ای (زیر تاج بیرون تاج) و کاربری جنگل با تیپ کاج (زیر تاج بیرون تاج) به‌صورت تصادفی در ۳ تکرار از لایه صفر تا ۵ سانتی‌متری نمونه‌برداری انجام شد (شکل‌های ۲ و ۳). طرح آماری نمونه‌برداری این پژوهش کاملاً تصادفی بود که در آن با توجه به نوع گونه جنگل‌کاری شده دو نوع توده جنگلی سوزنی‌برگ (شامل توده سرو سیمین و کاج بروسیا) و یک توده پهن‌برگ (گونه اقاقیا) انتخاب شد. همچنین در داخل این توده‌ها محدوده زیر تاج درختان و خارج از تاج درختان نیز مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). نمونه‌های خاک با لوازم استریل نمونه‌برداری و از الک ۴ میلی‌متری الک شدند. خاک تازه و دارای رطوبت و در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد برای انجام آزمایش‌های بیولوژیک خاک نگهداری شد.

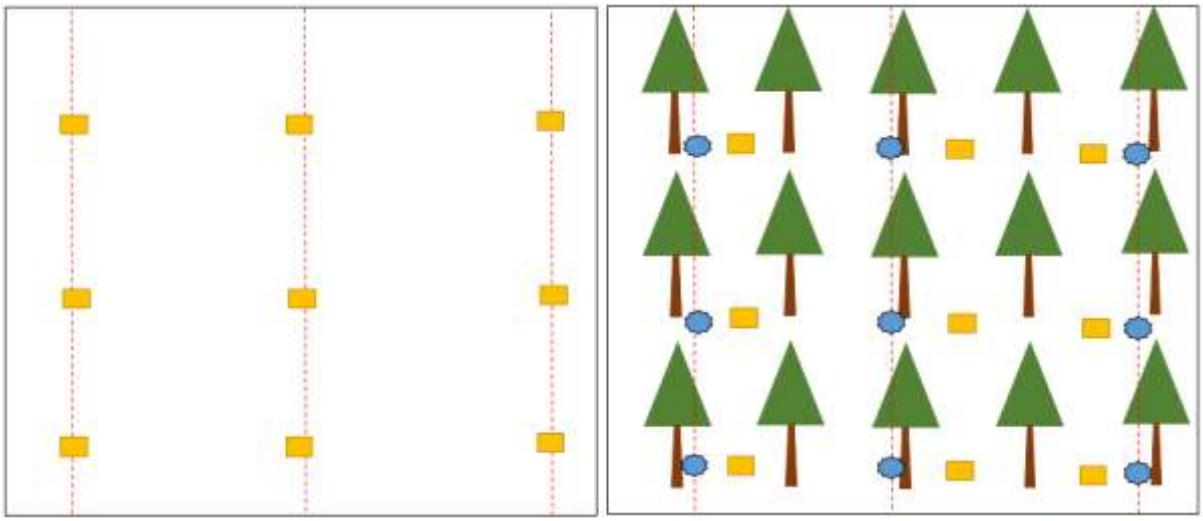


شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در شهرستان بیستون

Figure 1- Location of the studied area in Biston city

شکل ۲- موقعیت مناطق نمونه‌برداری شده

Figure 2- The location of the sampled areas



شکل ۳- الگوی نمونه‌برداری از خاک جنگل (راست) و چراگاه و کشاورزی (چپ)

دایره آبی: نمونه‌های زیر تاج درختان مربع زرد: نمونه‌های خاک بیرون تاج درختان

در هر یک از کاربری‌ها سه ترانسکت در نظر گرفته شد و در امتداد هر ترانسکت تعداد ۱۵ تا ۲۰ نمونه خاک برداشته شده که پس از مخلوط کردن آن‌ها با هم، یک نمونه ترکیبی از خاک به دست آمد. در هر کاربری ۳ نمونه خاک ترکیبی برداشت شد.

Figure 3- Sampling pattern of forest soil (right) and pasture and agriculture (left)

Blue circle: samples under tree crowns. Yellow Square: soil samples outside tree crowns

In each of the land uses, three transects were considered and 15 to 20 soil samples were taken along each transect, and after mixing them together, a composite soil sample was obtained. 3 mixed soil samples were taken for each land use.

کربن زیست‌توده میکروبی، تنفس پایه خاک (۱۹۷ روز)، تنفس برانگیخته و کسر متابولیکی به روش نانی پیری و الف (Nannipieri and Alef, 1995) اندازه‌گیری شدند. درصد کربن آلی به دست آمده در عدد ۱/۷۲ ضرب شده تا ماده آلی معادل در خاک تعیین گردد. برای اندازه‌گیری تنفس قارچی و باکتری ابتدا ۲۵ گرم خاک را وزن کرده آن را بر روی یک فویل پخش کرده سپس برای اندازه‌گیری هرکدام به گونه جدا تنفس قارچی مقدار ۰/۳ گرم پادزیست استرپتو مایسین سولفات و برای اندازه‌گیری تنفس باکتریایی مقدار ۰/۲۵۳ گرم پادزیست سیکلو هگزامید در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل کرده و به خاک اسپری و درون ظرف‌های درب‌دار ریخته شد سپس ۱۲ میلی‌لیتر سود ۰/۵ نرمال را درون ظرف کوچک‌تر ریخته و بر نمونه‌های خاک گذاشته شد و بعد از مدت ۱۶ ساعت با اسید ۰/۵ نرمال به همراه شناساگر فنول فتالئین تیتر شد (Anderson and Domsch, 1985). آنزیم اوره آز به روش کندلر و گربر (Kandeler and Gerber, 1988)، آنزیم فسفاتاز اسیدی و قلیایی به روش طباطبایی و برمنر (Tabatabai and Bremner, 1969) تعیین شدند.

جدول ۱- نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر ویژگی‌های بیولوژیکی خاک

Table 1- The analysis of variance of data on biological properties of soil

Sources of variance منابع تغییرات	df	MBC کربن زیست‌توده میکروبی	OC (used) کربن آلی	SIR تنفس برانگیخته	qCO_2 کسر متابولیکی	AP آنزیم فسفاتاز اسیدی	ALP آنزیم فسفاتاز قلیایی	Urease اوره‌آز	Fungi تنفس قارچی	Bacteria تنفس باکتریایی
نوع پوشش گیاهی Type of vegetation	7	162043**	16.54*	207597**	0.08**	104655**	62274.8**	200.59**	0.06**	0.08**
خطای آزمایشی Error	14	437	10.58	559	0.0005	2831	1531.9	3.80	0.008	0.004

** و * به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.

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

پس از اندازه‌گیری ویژگی‌های بیولوژیک خاک، نرمال بودن داده‌ها توسط آزمون اندرسون- دارلین[1] و همگن بودن واریانس تیمارها با استفاده از آزمون له ون[2] بررسی شد. تجزیه واریانس داده‌ها به کمک آنالیز واریانس یک‌طرفه (One- Way ANOVA) و مقایسه میانگین داده‌ها با کمک آزمون دانکن در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد (SAS 9.4 و SPSS 26) صورت گرفت.

نتایج و بحث

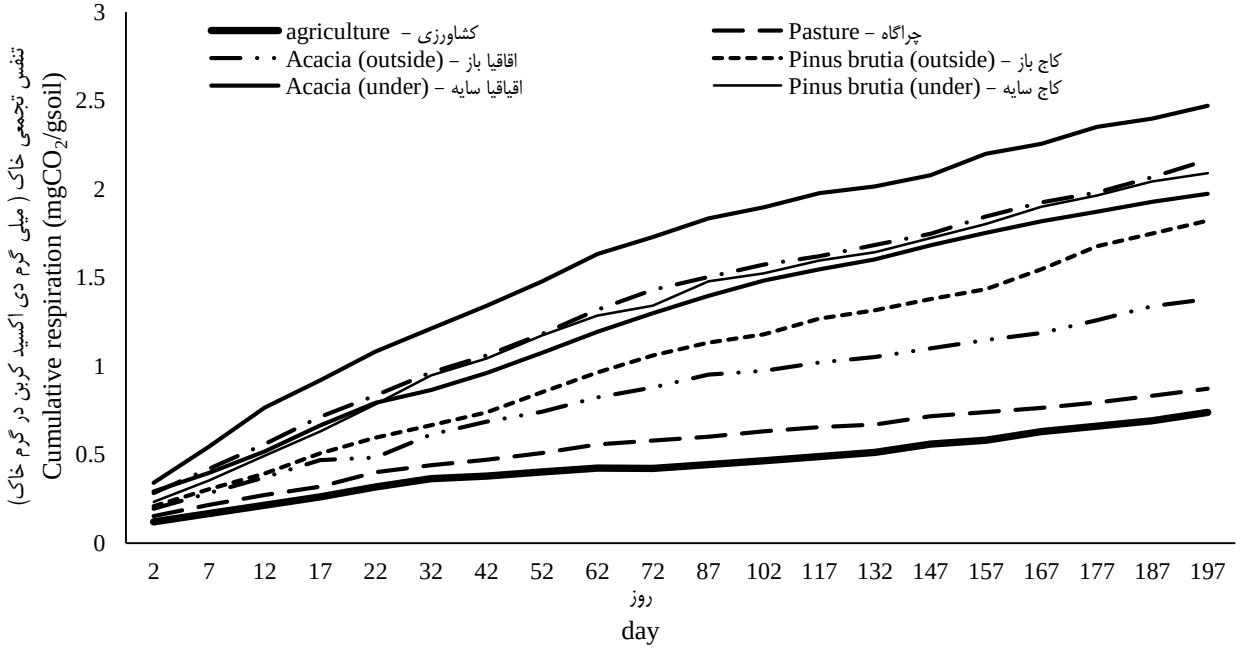
تنفس خاک و مقدار ماده آلی مصرف شده

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر تنفس میکروبی خاک و مقدار ماده آلی مصرف شده به ترتیب در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). تغییرات مقدار تنفس تجمعی در طول دوره آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش سرو در محیط سایه، دارای بالاترین مقدار تنفس تجمعی خاک بود که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنی‌داری برخوردار بود. پس از پوشش سرو، پوشش‌ها از نظر میزان تنفس تجمعی شامل کاج در محیط سایه، سرو در محیط باز، اقاقیا در محیط سایه، کاج در محیط باز و اقاقیا در محیط باز بود. کم‌ترین مقدار تنفس تجمعی نیز در پوشش کشاورزی و پوشش چراگاه مشاهده شد (شکل ۴). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که مقدار ماده آلی مصرف شده در پوشش سرو با مقدار ۱۲/۹ گرم در طی ۱۹۷ روز تنفس پایه، بیشتر از دیگر پوشش‌ها می‌باشد که از نظر آماری دارای تفاوت معنی‌دار می‌باشد؛ اما کم‌ترین مقدار ماده آلی مصرف شده در پوشش کشاورزی با مقدار ۵/۲۴ گرم در طی ۱۹۷ روز تنفس پایه مشاهده شد (شکل ۵).

در این پژوهش بالا بودن تنفس خاک در پوشش‌های سوزنی‌برگ در مقایسه با پهن‌برگ می‌تواند ناشی از بالا بودن کربن آلی خاک در این پوشش باشد (Mallik and Hu, 1997). در پژوهش‌ها گزارش شده است که ماده آلی خاک به‌طور معناداری با تنفس میکروبی خاک مرتبط است و از مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده آن است (Soleimani *et al*., 2019). کوچ و ذوقی (Kooch and Zoghi, 2014) نیز اظهار داشتند که بین تنفس میکروبی و کربن آلی همبستگی مثبت وجود دارد. نتایج حاصل از مقدار کربن آلی مصرف شده نیز بیانگر آن است که بیش‌ترین کربن آلی مصرف شده مرتبط با پوشش سرو است که نشان می‌دهد کربن آلی بیشتری صرف تنفس خاک کرده است. در پژوهش کوچ و پارساپور (Kooch and Parsapoor, 2016) مطابق با نتایج به دست آمده، بیش‌ترین میزان تنفس میکروبی خاک در پوشش‌های جنگلی سوزنی‌برگ (کاج سیاه و زربین) مشاهده شد که گزارش کردند این امر می‌تواند در ارتباط با درصد بالای کربن آلی خاک باشد که در تأیید و هم‌سو با نتایج این پژوهش است. در این پژوهش پس از سوزنی‌برگان، پوشش پهن‌برگ نیز دارای میزان تنفس میکروبی بالا بود. بالاتر بودن سرعت تنفس در گونه‌های پهن‌برگ می‌تواند ناشی از کیفیت بالای لاش برگ و رطوبت بالا در این خاک‌ها باشد (Ayres *et al*., 2009). مطابق با نتایج حاصل از این پژوهش، تحقیقات بخشی پور و همکاران (Bakhshipour *et al*., 2012) نشان داد که در منطقه فیدره لاهیجان، میزان تنفس میکروبی خاک در پوشش سوزنی‌برگ (کاج تدا) بیش‌تر از پوشش پهن‌برگ (صنوبر دلتوئیدس) است؛ اما در تضاد با نتایج حاصل از این پژوهش، قربان زاده و همکاران (Ghorbanzadeh *et al*., 2018) مشاهده نمودند که شاخص‌های میکروبی خاک در جنگل‌کاری‌های سوزنی‌برگ (کاج تدا) و پهن‌برگ (صنوبر) در غرب استان گیلان بالاترین تنفس میکروبی خاک در پوشش پهن‌برگ می‌باشد. از نظر آماری تفاوت معنی‌داری بین کاربری‌های مختلف به‌جز کشاورزی در مصرف ماده آلی وجود ندارد. این امر احتمالاً به دلیل بالا بودن میزان اولیه ماده آلی در کاربری‌های مورد بررسی می‌باشد.

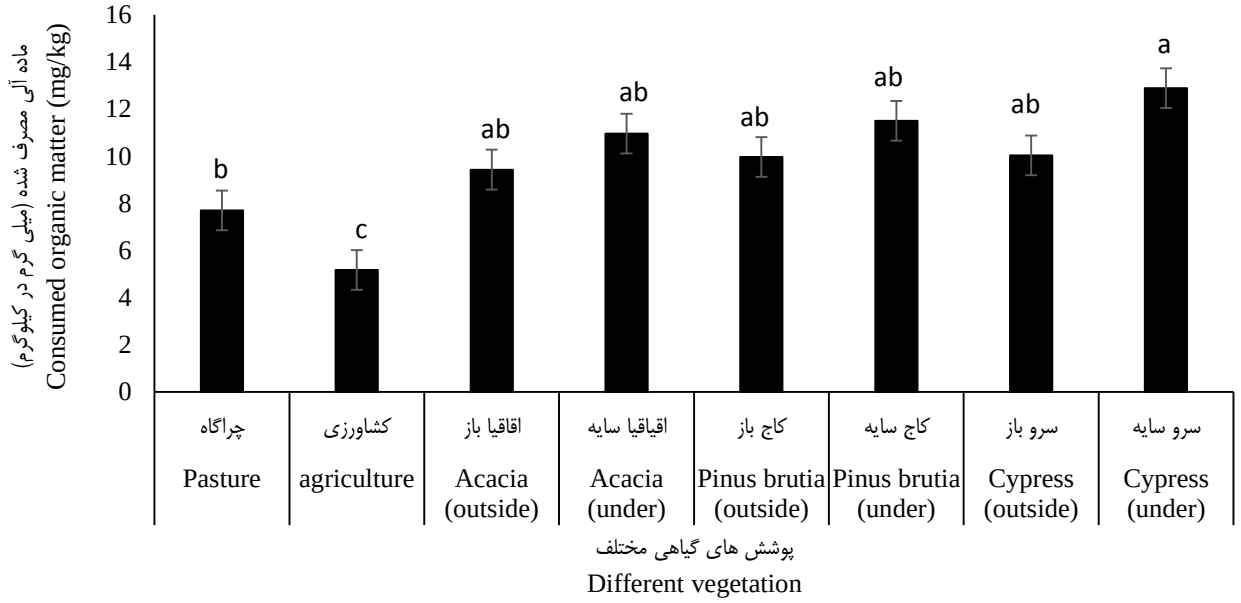
1- Anderson-Darling Test

2- Levene's Test



شکل ۴- مقایسه میانگین محتوای تنفس تجمعی خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

Figure 4- Comparison of the average cumulative soil respiration content in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)



شکل ۵- مقایسه میانگین ماده آلی مصرف شده خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 5- Comparison of the average soil organic matter used in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

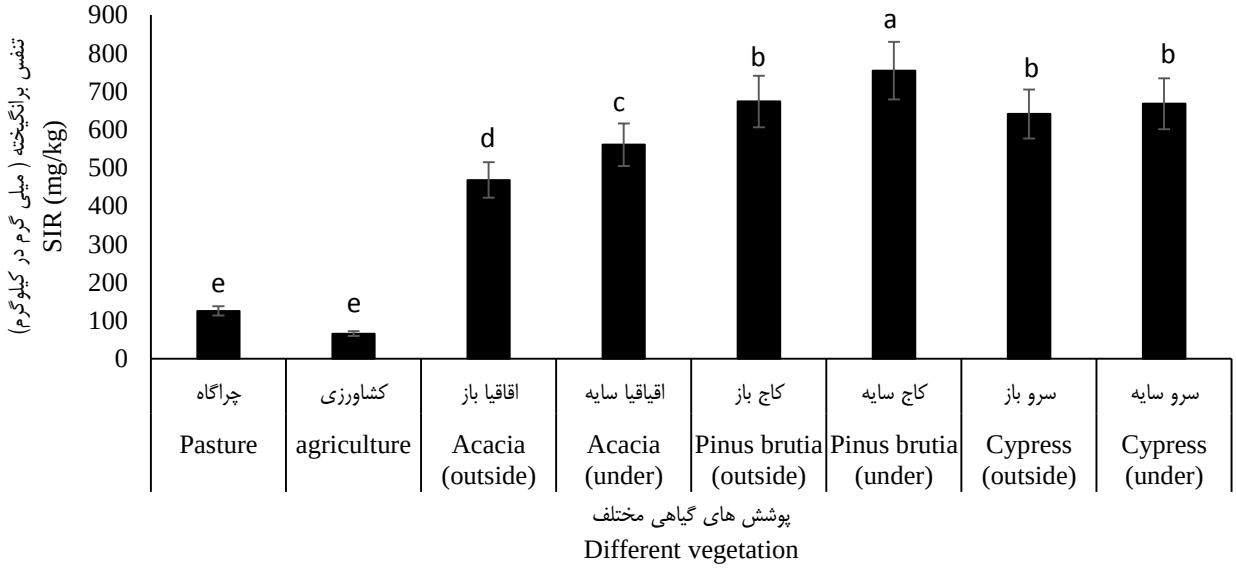
In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

نتایج پژوهش سینگ و همکاران (Singh *et al.*, 2018) نیز بیانگر کاهش تنفس میکروبی خاک در کاربری کشاورزی در مقایسه با پوشش‌های جنگلی، به دلیل کمبود مواد آلی ورودی به خاک است. در پژوهش سلیمانی و همکاران (Soleimani *et al.*, 2019) گزارش کردند که پایین بودن میزان تنفس خاک در اراضی کشاورزی می‌تواند ناشی از کشت و کار، فرسایش خاک، مدیریت نامناسب، شخم و خاک‌ورزی خاک باشد. کیانی و همکاران (Kiani *et al.*, 2004) در بررسی پوشش اراضی بر روی ویژگی‌های خاک استان گلستان دریافتند که تنفس میکروبی خاک در اراضی جنگلی بیشتر از اراضی زراعی است که هم‌سو با یافته‌های این پژوهش است. همچنین خرمعلی و شمسی (Khormali and Shamsi, 2009) نشان دادند که تنفس میکروبی خاک در اراضی بایر به‌طور معنی‌دار پایین‌تر از رویشگاه‌های جنگل‌کاری شده است.

تنفس برانگیخته (SIR)

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر مقدار تنفس برانگیخته خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش کاج با مقدار ۷۵۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای بالاترین مقدار تنفس برانگیخته خاک است که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بود. همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش سرو نیز با مقدار ۶۶۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم و پوشش اقاقیا با مقدار ۵۵۶/۱۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای مقادیر بالایی از تنفس برانگیخته می‌باشند. کمترین مقادیر تنفس برانگیخته نیز در پوشش زمین کشاورزی (۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و چراگاه (۱۲۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (شکل ۶).

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که نوع پوشش در رویشگاه‌های جنگلی و غیر جنگلی اثرات عمده‌ای بر روی ویژگی‌های خاک، به‌ویژه ویژگی‌های میکروبی و بیوشیمیایی دارد. با توجه به نتایج حاصل از تنفس برانگیخته در پوشش‌های مختلف، می‌توان این احتمال را مطرح کرد که فعالیت ریزجانداران دخیل در تجزیه مواد آلی در رویشگاه‌های مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری داشتند؛ بنابراین پوشش‌های مختلف می‌توانند با تغییر در کمیت و کیفیت مواد آلی و سایر عوامل، بر روی جمعیت ریزجانداران خاک به‌عنوان اصلی‌ترین منبع تجزیه و انتشار دی اکسید کربن تأثیرگذار باشند (Kooch and Zoghi, 2014). کمیت و کیفیت لاش برگ از پارامترهای بسیار مؤثر بر میزان فعالیت میکروبی خاک گزارش شده است (Kooch *et al.*, 2012).



شکل ۶- مقایسه میانگین تنفس برانگیخته خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 6- Comparison of the average substrate-induced respiration (SIR) in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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

همچنین ونی و همکاران (Wani *et al.*, 2018) کاهش فعالیت‌های میکروبی خاک در پوشش کشاورزی را به دلیل بالا بودن نسبت کربن به نیتروژن خاک دانسته‌اند. پارامترهای بسیاری می‌توانند بر فعالیت‌های میکروبی خاک اثرگذار باشند، به‌طوری‌که نتایج بسیاری از پژوهش‌ها بیانگر آن است که افزایش رطوبت، سرعت بالای تجزیه، افزایش مقدار نیتروژن خاک و کاهش نسبت کربن به نیتروژن خاک سبب افزایش فعالیت میکروبی (تنفس پایه و برانگیخته) می‌شوند (Neatrour *et al.*, 2005)؛ اما در این پژوهش به نظر می‌رسد علت اصلی پایین بودن تنفس برانگیخته در پوشش کشاورزی و چراگاه در مقایسه با پوشش‌های جنگلی پایین بودن سطح ماده آلی خاک می‌باشد. همچنین در پوشش کشاورزی به دلیل تخریب جامعه میکروبی به‌ویژه از بین رفتن هیف‌های قارچی، برهم خوردن چرخه عناصر غذایی و عدم برگشت لاش برگ و بقایا به خاک جامعه میکروبی بسیار ضعیف شده است که حتی به حضور یک سوبسترای بسیار خوب هم عکس‌العمل مناسبی نشان نمی‌دهد.

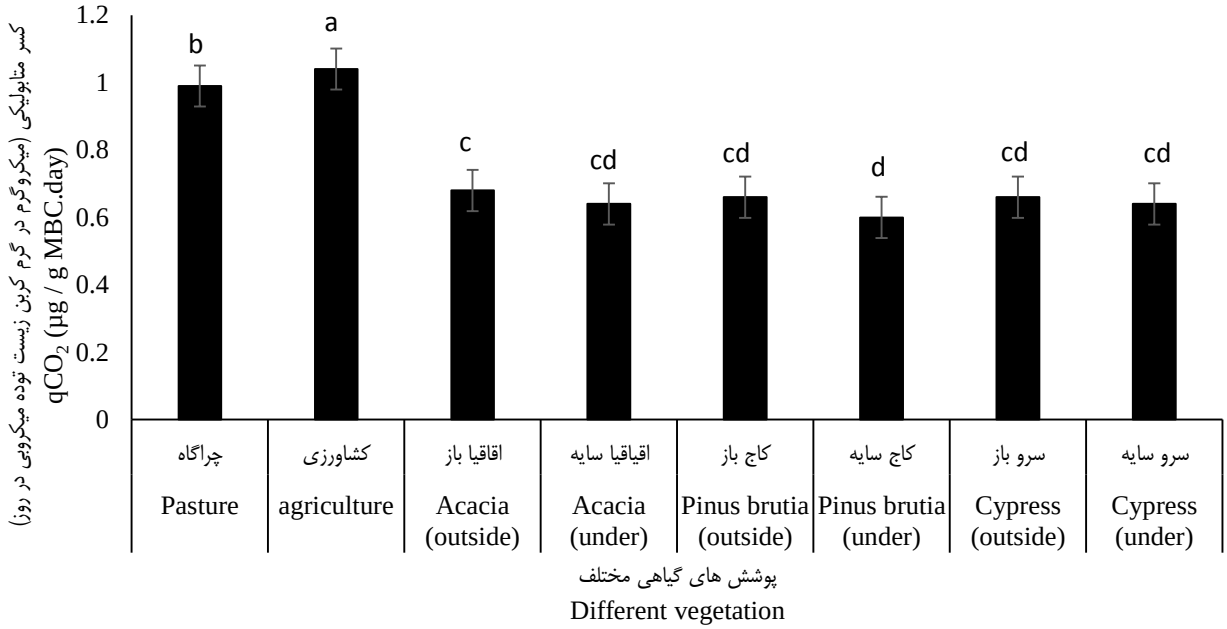
کسر متابولیکی (qCO_2)

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر کسر متابولیکی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش کشاورزی با مقدار (۱/۰۳ واحد) و پوشش چراگاه با مقدار (۰/۹۸ واحد) دارای بالاترین کسر متابولیکی خاک بودند که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بودند. در بین بقیه پوشش‌های مورد بررسی تفاوت معنادار مشاهده نشد. کمترین مقدار کسر متابولیکی خاک نیز در پوشش کاج در محیط سایه با مقدار (۰/۶ واحد) مشاهده شد (شکل ۷). تحت شرایط تنش مانند تخریب جنگل، چرای دام و تغییر کاربری اراضی این ضریب افزایش می‌یابد، زیرا ریزجانداران خاک برای حفظ توده زنده خود به‌صرف انرژی بیشتری نیازمند هستند (Ghorbanzadeh *et al.*, 2018). هرچه عملکرد ریزجانداران با کارایی بیشتری انجام شود، لایه کربن بیشتر با زیست‌توده ترکیب شده و واحد کمتری از کربن زیست‌توده از طریق تنفس هدر می‌رود و در نتیجه کسر متابولیک کاهش می‌یابد (Behera and Sahani, 2003). در این پژوهش پوشش‌های کشاورزی و چراگاه کسر متابولیک بالاتری در مقایسه با پوشش‌های جنگلی داشتند. کسر متابولیکی بالاتر در این پوشش‌ها نشان‌دهنده کاهش کارایی استفاده از لاش برگ توسط جامعه میکروبی خاک است. به‌طورکلی کسر متابولیکی در جامعه باکتریایی بالاتر از جامعه قارچی می‌باشد؛ لذا به نظر می‌رسد در پوشش کشاورزی و چراگاه، غالب بودن جمعیت باکتریایی سبب افزایش این شاخص شده باشد که البته شخم و کشت و کار و آشفتگی این پوشش‌ها سبب وارد شدن تنش به این جامعه باکتریایی و در نتیجه باعث افزایش کسر متابولیکی در این پوشش‌ها شده است. در پژوهشی توسط رسولی‌صدقیانی و همکاران (Rasouli-Sadaghiani *et al.*, 2018) گزارش شد که کسر متابولیکی بین پوشش‌های جنگل، چراگاه و کشاورزی تفاوت معناداری را نشان نداد اما بالاترین مقدار این ضریب در پوشش کشاورزی مشاهده شد که هم‌سو با نتایج این پژوهش می‌باشد. در پژوهشی دیگر مو و همکاران (Mu *et al.*, 2014) گزارش کردند که کسر متابولیکی در سوزنی‌برگان نسبت به پهن‌برگان بالاتر می‌باشد که در تضاد با نتایج این پژوهش می‌باشد.

کربن زیست‌توده میکروبی (MBC)

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر مقدار کربن زیست‌توده میکروبی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش کاج با مقدار ۱۰۳۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای بالاترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی خاک است که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بود. همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش سرو نیز با مقدار ۹۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم دارای مقادیر بالایی از کربن زیست‌توده میکروبی می‌باشد. کم‌ترین مقادیر کربن زیست‌توده میکروبی خاک نیز در پوشش زمین کشاورزی (۴۲۸/۳۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و چراگاه (۴۷۷/۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد (شکل ۸).

بالاتر بودن میزان کربن زیست‌توده میکروبی در سوزنی‌برگان در مقایسه با دیگر پوشش‌ها، می‌تواند ناشی از محتوای کربن آلی بیشتر پوشش‌های سوزنی‌برگ باشد؛ زیرا مقدار این ویژگی در خاک به‌طور مستقیم وابسته به کربن آلی و سرعت ورود کربن به خاک می‌باشد (Zeng *et al.*, 2015). هم‌سو با نتایج این پژوهش، کوچ و پارساپور (Kooch and Parsapoor, 2016) گزارش کردند که بیش‌ترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی به پوشش‌های جنگلی سوزنی‌برگ (کاج سیاه و زربین) اختصاص داشت و کم‌ترین مقدار کربن زیست‌توده میکروبی از بین پوشش‌های پهن‌برگ در پوشش توسکا مشاهده شد. در پژوهش دیگری موافق با نتایج این پژوهش یاداوا (Yadava, 2012) گزارش کرد که کاشت گونه‌های درختی *Acacia catechu* و *Dalbergia sisso* بعد از ۲۶ سال، باعث افزایش معنادار در میزان زیست‌توده میکروبی خاک نسبت به جنگل پهن‌برگ مجاور شده است.

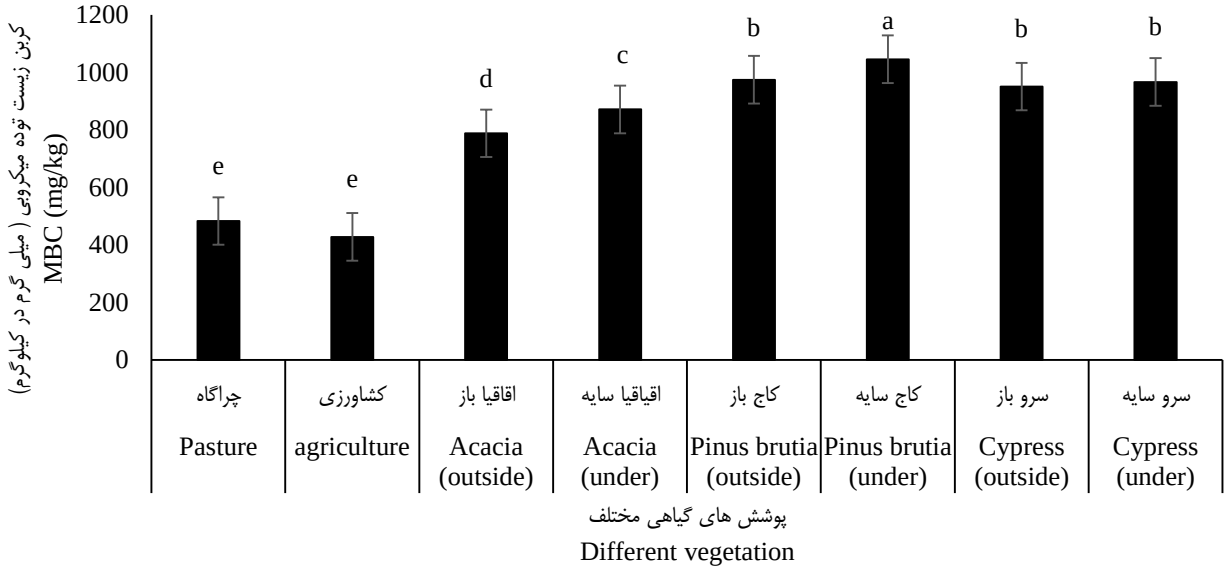


شکل ۷- مقایسه میانگین کسر متابولیکی خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 7- Comparison of the average soil metabolic quotient in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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



شکل ۸- مقایسه میانگین کربن زیست‌توده میکروبی خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 8- Comparison of the average soil microbial biomass carbon in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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

در مقایسه با پوشش‌های جنگلی، پایین بودن کربن زیست‌توده میکروبی خاک در پوشش‌های کشاورزی و چراگاه می‌تواند ناشی از کشت و کار، فرسایش خاک، مدیریت نامناسب، شخم و خاک‌ورزی خاک باشد (Soleimani *et al.*, 2019). به‌طورکلی به دلیل تفاوت در شیوه‌ها و مدیریت کشاورزی و در دسترس بودن منابع و ترکیب گیاهان، کربن زیست‌توده میکروبی معمولاً در مزارع کشاورزی کاهش می‌یابد (Soleimani *et al.*, 2019). هم‌چنین در این پژوهش پایین‌ترین سطح کربن آلی خاک در این پژوهش‌ها مشاهده شد که پایین بودن کربن زیست‌توده میکروبی خاک می‌تواند به این علت باشد. در پژوهشی هم‌سو با نتایج این پژوهش اسلام و ویل (Islam and Weil, 2000) گزارش دادند که در مقایسه با جنگل‌ها، کربن زیست‌توده میکروبی در خاک‌های کشاورزی حدود ۴۰ درصد کمتر است.

آنزیم‌های فسفاتاز (فسفاتاز اسیدی و قلیایی)

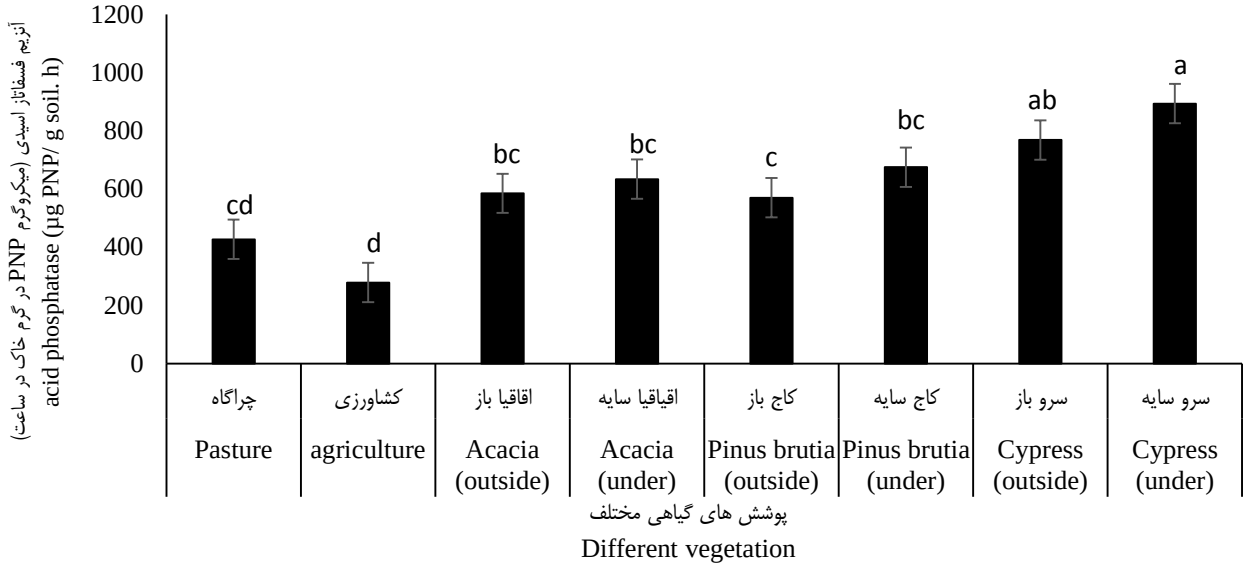
بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر فعالیت آنزیم‌های فسفاتاز اسیدی و فسفاتاز قلیایی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش سرو با مقدار ۸۸۶ واحد فسفاتاز اسیدی و ۶۴۲ واحد فسفاتاز قلیایی دارای بالاترین مقدار از آنزیم‌های گروه فسفاتاز می‌باشد که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بود. هم‌چنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش کاج (به ترتیب با مقادیر ۶۷۳ واحد فسفاتاز اسیدی و ۶۰۳ واحد فسفاتاز قلیایی) و اقاقیا (به‌ترتیب با مقادیر ۶۴۲/۷۹ واحد فسفاتاز اسیدی و ۵۸۹/۲۱ واحد فسفاتاز قلیایی) نیز دارای مقادیر بالایی از آنزیم‌های گروه فسفاتاز می‌باشند. کمترین مقادیر از آنزیم‌های گروه فسفاتاز نیز در پوشش زمین کشاورزی (به‌ترتیب با مقادیر ۲۸۷/۵۷ واحد فسفاتاز اسیدی ۲۱۸ واحد فسفاتاز قلیایی) و چراگاه (به‌ترتیب با مقادیر ۴۳۱ واحد فسفاتاز اسیدی و ۳۴۴ واحد فسفاتاز قلیایی) مشاهده شد (شکل‌های ۹ و ۱۰).

در این پژوهش بالا بودن مقدار فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز در پوشش سوزنی‌برگ در مقایسه با پهن‌برگ (اگرچه میزان فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز در پهن‌برگان نیز بالا می‌باشد) می‌تواند به دلیل زیاد بودن درصد کربن آلی خاک باشد (Sheikhloo and Rasouli Sadaghiani, 2016). افزایش مواد آلی نه تنها از طریق افزایش فعالیت میکروبی، بلکه از طریق پایدارسازی فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز در خاک باعث افزایش فعالیت این آنزیم‌ها می‌شود. نتایج پژوهش‌های و هم آکوستا- مارتینز و همکاران (۲۰۰۳) نیز نشان داد که فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز رابطه مثبت و معنی‌داری با کربن آلی خاک داشت که هم‌سو با نتایج از این پژوهش می‌باشد. پایین بودن مقدار فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز در کاربری کشاورزی و چراگاه در مقایسه با پوشش جنگلی می‌تواند ناشی از فرسایش و خاک‌ورزی بی‌رویه باشد؛ زیرا فرسایش و خاک‌ورزی بی‌رویه که منجر به کاهش تجمع مواد آلی در لایه شخم می‌شود، فعالیت آنزیمی را به‌شدت کاهش می‌دهد (Gianfreda and Bollag, 1996). در همین خصوص، سیلوا و همکاران (Silva *et al.*, 2019) در بررسی فعالیت‌های آنزیمی خاک در پوشش‌های مختلف اراضی بیان نمودند که در مقایسه با پوشش‌های غیر جنگلی، رویشگاه‌های جنگلی به دلیل حاصلخیزی بالاتر خاک دارای فعالیت آنزیمی فسفاتاز بیش‌تری می‌باشند. در پژوهش اوشو (Ushio, 2010) نیز گزارش شد که به دلیل زیست‌توده میکروبی بالاتر در سوزنی‌برگان، فعالیت آنزیم‌های گروه فسفاتاز در مقایسه با پوشش پهن‌برگ بالاتر است.

آنزیم اوره آز

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر مقدار فعالیت آنزیم اوره آز خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش سرو با مقدار ۱۶۵ واحد، پوشش اقاقیا با مقدار ۱۵۰ واحد، پوشش کاج با مقدار ۱۴۷ واحد و پوشش چراگاه با مقدار ۱۵۰ واحد دارای بالاترین مقدار فعالیت آنزیم اوره آز بودند که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بودند. کم‌ترین فعالیت آنزیم اوره آز نیز در پوشش کشاورزی با مقدار ۱۰۹/۳۴ واحد مشاهده شد (شکل ۱۱).

برخلاف فعالیت فسفاتازها این آنزیم تفاوت معناداری را بین پوشش‌های سوزنی‌برگ و پهن‌برگ نشان نداد. بیش‌ترین فعالیت اوره آز در خاک‌های جنگلی (سرو، اقاقیا و کاج) مشاهده شد که بیشترین تجمع ماده آلی خاک را داشتند؛ بنابراین بالا بودن فعالیت این آنزیم در مقایسه با کاربری‌های چراگاه و کشاورزی ناشی از بالا بودن میزان ماده آلی در این پوشش‌ها می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده توسط زنگ و همکاران (Zeng *et al.*, 2009) میزان کربن آلی خاک از عوامل تأثیرگذار بر فعالیت آنزیم اوره آز ذکر شده است. بر اساس پژوهش‌های لیراس و همکاران (Leirós *et al.*, 2000) نیز گزارش شد محتوای کربن آلی خاک معمولاً به‌طور مثبتی با میزان فعالیت آنزیم‌های خاک در ارتباط است. همچنین فعالیت آنزیم اوره آز در خاک چراگاه بالا و حتی با پوشش‌های جنگلی پهن‌برگ و سوزنی‌برگ در محیط باز قابل مقایسه بود.

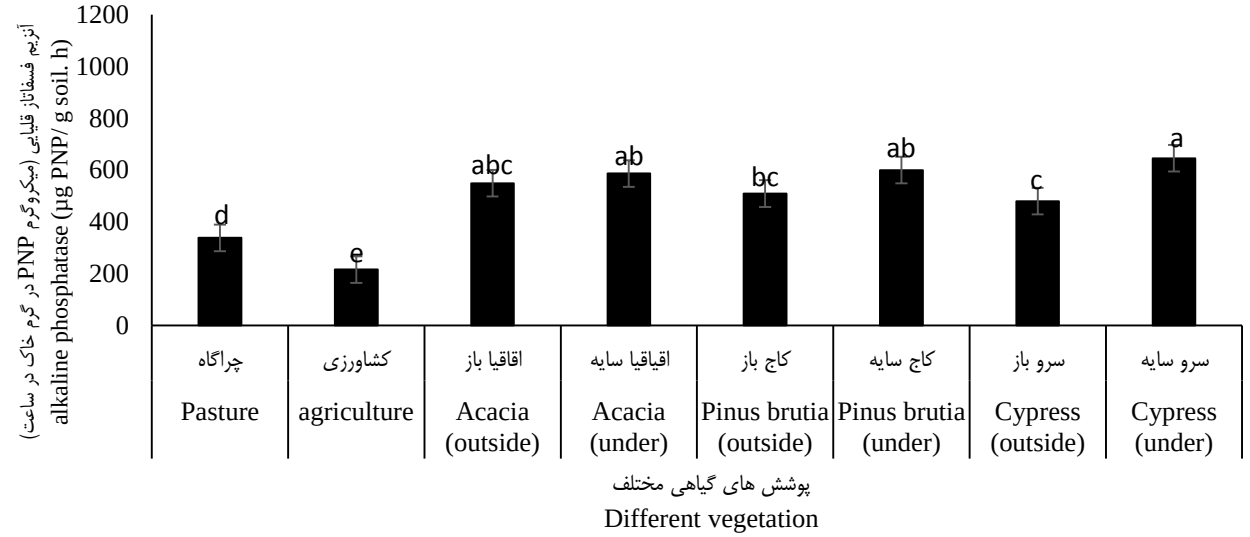


شکل ۹- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز اسیدی در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 9- Comparison of the average activity of acid phosphatase enzyme in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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

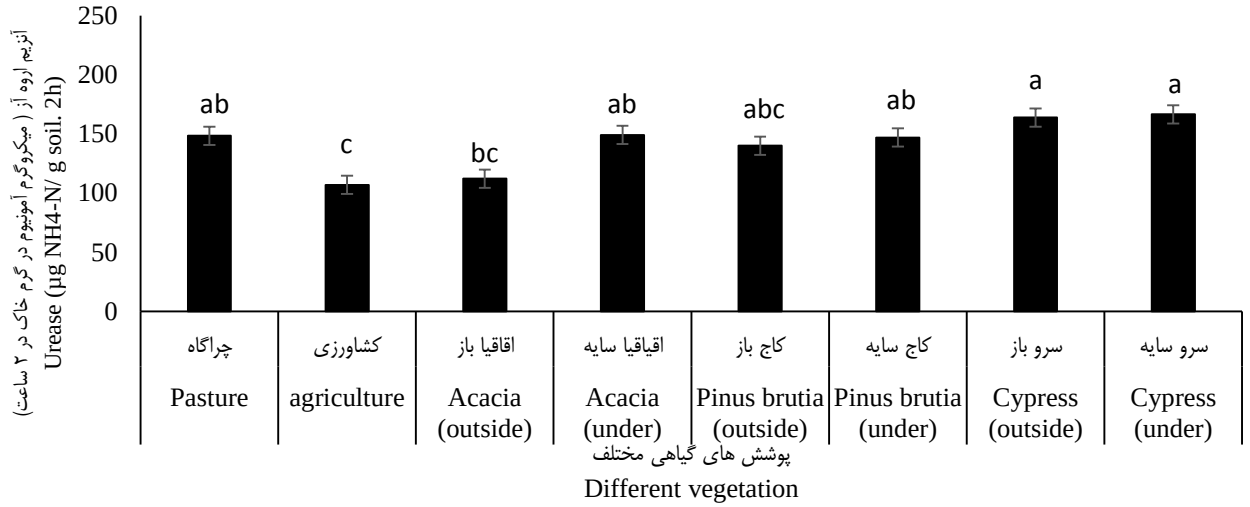


شکل ۱۰- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 10- Comparison of the average activity of alkaline phosphatase enzyme in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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



شکل ۱۱- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم اوره آز در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 11- Comparison of the average activity of urease enzyme in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

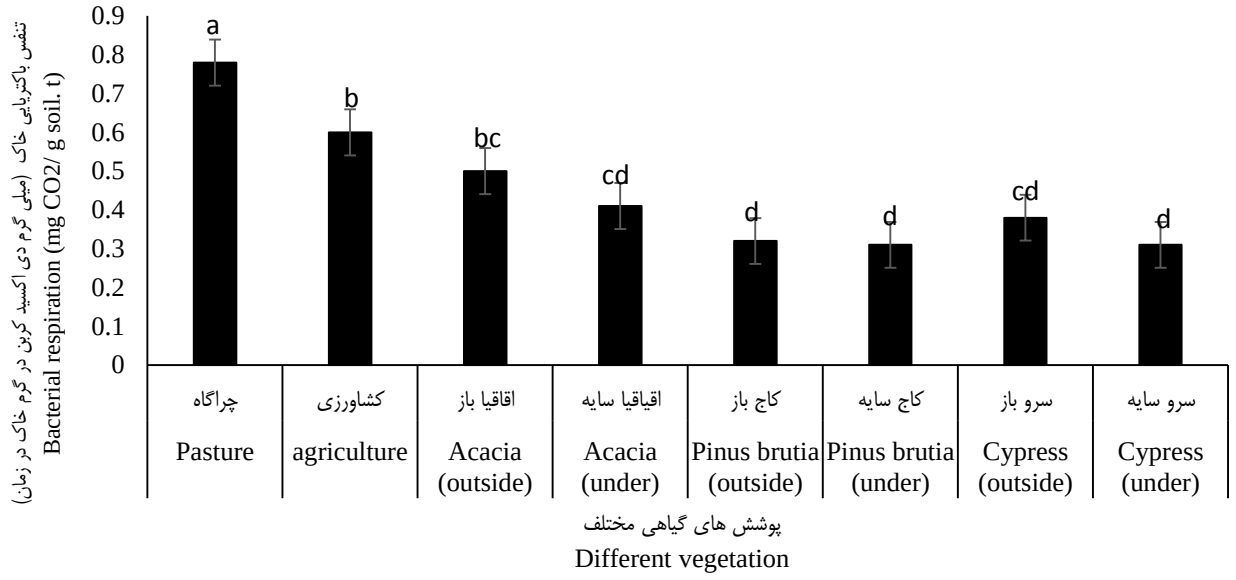
In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the view point of Duncan's multiple range tests

فعالیت بالای آنزیم در خاک چراگاه از اثرات پوشش گیاهی و رهاسازی از خاک‌ورزی، ناشی می‌شود. مشاهدات مشابه توسط آولاندا-تروس و همکاران (Avellaneda-Torres *et al.*, 2013) گزارش شده است. فعالیت آنزیمی بالای خاک چراگاه در مقایسه با پوشش کشاورزی نیز نتیجه ترکیبی از نوع پوشش گیاهی و عدم شخم زدن خاک می‌باشد (Błońska *et al.*, 2017). پایین بودن میزان فعالیت آنزیم اوره آز در اراضی کشاورزی را می‌توان به دلیل پایین بودن سطح کربن آلی خاک مربوط دانست (Kooch and Zoghi, 2014). به‌طورکلی، خاک‌های کشاورزی حاوی ماده آلی کمتری هستند و این منجر به ضعف ساختار خاک و مقادیر کم‌تری از ریزجانداران می‌شود (Błońska *et al.*, 2017). در پژوهش بلونسکا و همکاران (Błońska *et al.*, 2017) مشاهده شد که فعالیت آنزیم اوره آز به‌طور معناداری در پوشش پهن‌برگ بالاتر بود که در تضاد با یافته‌های این پژوهش می‌باشد. صالحی و همکاران (Salehi *et al.*, 2012) نیز در تضاد گزارش کردند آنزیم اوره آز در توده پهن‌برگ (توسکا) بالاتر از پوشش سوزنی‌برگ (کاج تدا) بود. شیخلو و رسولی صدقیانی (Sheikhloo and Rasouli Sadaghiani, 2016) بالاترین فعالیت آنزیم اوره آز را در پوشش کشاورزی در مقایسه با جنگلی مشاهده کردند که به دلیل کاربرد کود اوره در زمین‌های کشاورزی بود؛ زیرا اوره سوبسترای لازم و اصلی برای فعالیت کاتالیزوری این آنزیم به شمار می‌آید.

تنفس قارچی و تنفس باکتریایی

بر اساس نتایج تجزیه واریانس، تأثیر پوشش‌های مختلف بر میزان تنفس قارچی و باکتریایی خاک در سطح احتمال ۱ درصد معنی‌دار شد (جدول ۱). نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که پوشش چراگاه و کشاورزی به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۸ و ۰/۶ واحد دارای بالاترین میزان تنفس باکتریایی خاک بودند که در مقایسه با دیگر پوشش‌ها از تفاوت معنادار برخوردار بودند. کم‌ترین میزان تنفس باکتریایی خاک نیز در پوشش کاج و سرو به‌ترتیب با مقادیر ۰/۳۱ و ۰/۳۱ واحد مشاهده شد (شکل ۱۲)؛ اما تنفس قارچی از روندی معکوس برخوردار بود؛ به‌طوری‌که بالاترین میزان تنفس قارچی در پوشش سرو با مقدار ۰/۷۱ واحد و پایین‌ترین میزان تنفس قارچی در پوشش چراگاه با مقدار ۰/۲۸ واحد اندازه‌گیری شد (شکل ۱۳).

در این پژوهش، پوشش چراگاه و زمین کشاورزی در مقایسه با دیگر پوشش‌ها، تنفس باکتریایی بالاتری را نشان دادند؛ اما ازنظر تنفس قارچی پوشش سرو و کاج دارای تنفس قارچی بالاتری در مقایسه با دیگر پوشش‌ها بودند. این تفاوت‌ها ممکن است ناشی از تفاوت در محتوای کربن آلی خاک باشد (Chen *et al.*, 2016). تغییرات و تفاوت در کمیت و کیفیت بستر و لاش برگ به‌طور مستقیم و یا به‌طور غیرمستقیم می‌تواند بر فعالیت جامعه میکروبی، فراوانی و ترکیب آن تأثیر بگذارد (Zavaleta and Hulvey, 2007). تغییرات در میزان و محتوای چرخه کربن به‌طور بالقوه تنفس خاک را تغییر می‌دهد (Chen *et al.*, 2016).

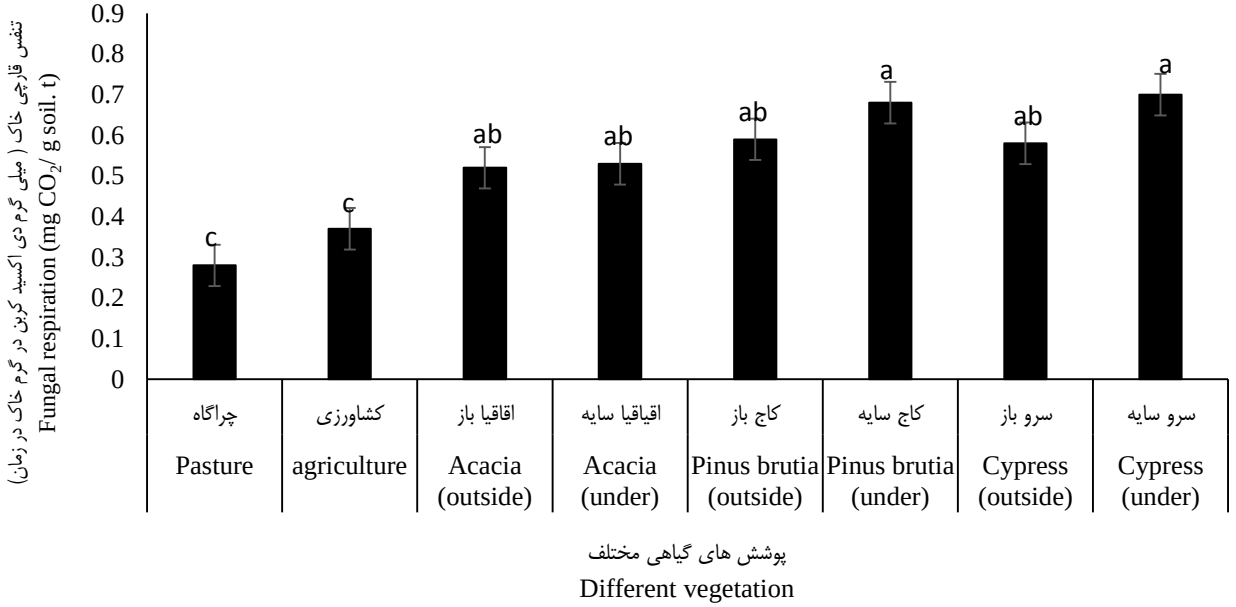


شکل ۱۲- مقایسه میانگین تنفس باکتریایی خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 12- Comparison of average soil bacterial respiration in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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



شکل ۱۳- مقایسه میانگین تنفس قارچی خاک در پوشش‌های گیاهی مختلف

در هر ستون میانگین‌های دارای حروف مشابه از نظر آزمون چند دامنه‌ای دانکن اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 13- Comparison of average soil fungal respiration in different vegetation (Outside: outside tree crowns, under: under tree crowns)

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

به‌طورکلی تنفس باکتریایی بالاتر در لاشبرگ‌های با سرعت تجزیه بالاتر و تنفس قارچی بالاتر در لاش‌برگ‌های با سرعت تجزیه پایین‌تر و سخت تجزیه گزارش‌شده است (Wardle *et al.*, 2002) که مطابق با نتایج حاصل از این پژوهش می‌باشد. کیفیت لاش برگ یکی از پارامترهای بسیار کارآمد بر کار آیی ریزجانداران خاک می‌باشد و با افزایش نسبت کربن به نیتروژن لاش برگ از فراوانی و کارایی باکتری‌ها در خاک کاسته می‌شود (Kooch, 2012). همسو با نتایج این پژوهش بایلی و همکاران (Bailey *et al.*, 2002) ارتباط معناداری بین فعالیت‌های قارچی و محتوای کربن آلی خاک گزارش کردند. آن‌ها گزارش کردند که بالاترین میزان تنفس قارچی در خاک‌هایی مشاهده شد که دارای بالاترین محتوای کربن آلی خاک بودند. در پژوهش دیگری سوسیان و همکاران (Susyan *et al.*, 2005) گزارش کردند که پایین‌ترین تنفس قارچی و بالاترین تنفس باکتریایی در پوشش زمین کشاورزی مشاهده شد. آن‌ها همچنین گزارش کردند که بالاترین تنفس قارچی و پایین‌ترین تنفس باکتریایی نیز در پوشش جنگلی وجود دارد. همچنین در این پژوهش مشخص شد که تنفس قارچی نسبت به تنفس باکتریایی درصد بیشتری از تنفس خاک را شامل می‌شود که مطابق با یافته‌های اندرسون و دامش (Anderson and Domsch, 1975) می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که نوع گونه‌های درختی کاشته شده باعث ایجاد تغییرات قابل‌توجهی در ویژگی‌های زیستی خاک می‌شود. پژوهش حاضر بیانگر آن است که رویشگاه جنگلی چه سوزنی‌برگ چه پهن‌برگ دارای بالاترین مقادیر مشخصه‌های فعالیت‌های آنزیمی، تنفس پایه، تنفس برانگیخته، کربن زیست‌توده میکروبی و پایین‌ترین مقادیر کسر متابولیکی در مقایسه با پوشش‌های کشاورزی و چراگاه بودند. جنگل‌کاری موجب افزایش فعالیت زیستی و احتمالاً تعداد و تنوع ریزجانداران شده و در طولانی‌مدت موجب بهبود ویژگی‌های خاک می‌گردد. در کاربری کشاورزی و چراگاه به دلیل تخریب خاک و خاکدانه به‌وسیله فعالیت‌های کشاورزی مانند شخم و یا چرای بی‌رویه دام‌ها، میزان کربن آلی و فعالیت ریزجانداران کاهش یافته و با کاهش سایر ویژگی‌های خاک، کیفیت خاک به‌مرور کاهش می‌یابد. از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که کاشت گونه‌های جنگلی در خاک‌های مناطق تخریب شده در طولانی‌مدت می‌تواند باعث افزایش کربن آلی خاک به دلیل لاش برگ با کیفیت و در نتیجه افزایش نفوذپذیری و رطوبت خاک شود. افزایش کربن آلی خاک موجب افزایش فعالیت ریزجاندارن شده و در طولانی‌مدت سبب بهبود ویژگی‌های مختلف خاک خواهد شد. کاشت گیاهان جنگلی در عرصه‌های طبیعی کشور که به دلیل تغییر کاربری به کشاورزی و کشت بی‌رویه تخریب شده و درنهایت رها شده‌اند می‌تواند موجب بهبود ویژگی‌های خاک و در نتیجه استقرار پوشش گیاهی بومی منطقه شود و باعث افزایش نفوذپذیری آب در خاک و کاهش خطر فرسایش خاک، سیل و... گردد.

منابع

1. Agusto, L., Jacqu, R., Binkely, D., & Rothe, A. (2002). Impact of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science* 59: 233-253. https://doi.org/10.1051/forest:2002020.
2. Anderson, J.P.E., & Domsch, K.H. (1975). Measurement of bacterial and fungal contribution to the respiration of selected agricultural soils. *Canadian Journal of Microbiology* 21: 314–322.
3. Anderson, T.H., & Domsch, K.H. (1985). Maintenance carbon requirements of actively-metabolizing microbial populations under in situ conditions. *Soil Biology and Biochemistry 17*(2): 197-203. https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90115-4.
4. Avellaneda-Torres, L.M., Melgarejo, L.M., Narváez-Cuenca, C.E., & Sánchez, J. (2013). Enzymatic activities of potato crop soils subjected to conventional management and grassland soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition 13*(2): 301-312. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162013005000025.
5. Ayres, E., Steltzer, H., Berg, S., Wallenstein, M.D., Simmons, B.L., & Wall, D.H. (2009). Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests. *PLOS One 4*(6): e5964. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005964.
6. Bailey, V.L., Smith, J.L., & Bolton Jr, H. (2002). Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry 34*(7): 997-1007. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00033-0.
7. Bakhshipour, R., Ramezanpour, H., & Lashkarboluki, E. (2012). Studying the effect of Pinus taeda and *Populus* sp. plantation on some forest soils properties (Case study: Fidareh of Lahidjan). *Iranian Journal of Forest 4*(4): 321-332. (In Persian with English abstract)
8. Behera, N., & Sahani, U. (2003). Soil microbial biomass and activity in response to Eucalyptus plantation and natural regeneration on tropical soil. *Forest Ecology and Management 174*(1-3): 1-11. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00057-9.

9. Binkley, D. (2010). The influence of tree species on forest soils, processes and patterns. In: Proceedings of the trees and soil workshop. Mead, D.J., & Cornforth, I.S. (eds.). Agronomy Society of New Zealand Special Publication. Lincoln University Press, Canterbury.
10. Błońska, E., Lasota, J., & Zwydak, M. (2017). The relationship between soil properties, enzyme activity and land use. *Forest Research Papers 78*(1): 39-44. https://depot.ceon.pl/handle/123456789/15059.
11. Cai, D., Yang, X., Wang, S., Chao, Y., Morel, J.L., & Qiu, R. (2017). Effects of dissolved organic matter derived from forest leaf litter on biodegradation of phenanthrene in aqueous phase. *Journal of Hazardous Materials* 324: 516-525. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.020.
12. Chen, J., Wang, Q., Li, M., Liu, F., & Li, W. (2016). Does the different photosynthetic pathway of plants affect soil respiration in a subtropical wetland. *Ecology and Evolution 6*(22): 8010-8017. https://doi.org/10.1002/ece3.2523.
13. Deharveng, L. (2011). Soil collembola diversity, endemism and reforestation: A case study in the Pyrenees (France). *Conservation Biology* 10: 74-84. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10010074.x.
14. Ghorbanzadeh, N., Pourbabaei, H., Salehi, A., Soltani Tolarood, A.A., & Alavi, S.J. (2018). Investigation of the microbial and soil invertebrates biodiversity indices of hard wood and soft wood plantations in west of Guilan province. *Applied Soil Research 6*(3): 1-12. (In Persian with English abstract)
15. Gianfreda, L., & Bollag, M.J. (1996). Influence of Natural and Anthropogenic Factors on Enzyme Activity in Soil. *Soil Biochemistry* 9: 123-193.
16. Hölscher, D., Hertel, D., Leuschner, C., & Hottkowitz, M. (2002). Tree species diversity and soil patchiness in a temperate broad-leaved forest with limited rooting space. Flora-Morphology. *Distribution, Functional Ecology of Plants 197*(2): 118-125. https://doi.org/10.1078/0367-2530-00021.
17. Hur, J., Park, M.H., & Schlautman, M.A. (2009). Microbial transformation of dissolved leaf litter organic matter and its effects on selected organic matter operational descriptors. *Environmental Science and Technology 43*(7): 2315-2321. https://doi.org/10.1021/es802773b.
18. Iovieno, P., Alfani, A., & Bååth, E. (2010). Soil microbial community structure and biomass as affected by Pinus pinea plantation in two Mediterranean areas. *Applied Soil Ecology 45*(1): 56-63. 10.1016/j.apsoil.2010.02.001.
19. Islam, K.R., & Weil, R.R. (2000). Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 79: 9–16. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0.
20. Jones, D.L., Cooledge, E.C., Hoyle, F.C., Griffiths, R.I., & Murphy, D.V. (2019). PH and exchangeable aluminum are major regulators of microbial energy flow and carbon use efficiency in soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 138: 107584. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107584.
21. Kandeler, E., & Gerber, H. (1988). Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. *Biology and Fertility of Soils 6*(1): 68-72. https://doi.org/10.1007/BF00257924.
22. Khormali, F., & Shamsi, S. (2009). Micromorphology and quality attributes of the loess derived soils affected by land use change: a case study in Ghapan watershed, northern Iran. *Journal of Mountain Science* 6: 197-204. https://doi.org/10.1007/s11629-009-1037-z.
23. Kiani, F., Jalalian, A., Pashaee, A., & Khademi, H. (2004). Effect of deforestation on selected soil quality attributes in loess-derived land forms of Golestan Province, northern Iran. Proceedings of the Fourth International Iran and Russia Conference: 546-550.
24. Kooch, Y. (2012). Soil variability related to pit and mound, canopy cover and individual trees in a Hyrcanian Oriental Beech stand. Ph.D. Thesis, Tarbiat Modares University, 203p. (In Persian with English abstract)
25. Kooch, Y., & Parsapoor, M.K. (2016). The effects of broad and needle-leaved forest covers on soil microbial indices. *Journal of Water and Soil Conservation 23*(2): 195-210. https://doi.org/10.22069/jwfst.2016.3063.
26. Kooch, Y., & Zoghi, Z. (2014). Comparison of soil fertility of Acer insigne, *Quercus castaneifolia* and *Pinus brutia* stands in the Hyrcanian forests of Iran. Chine. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences* 20: 899-905. https://doi.org/10.3724/SP.J.1145.2014.02011.
27. Leirós, M.C., Trasar-Cepeda, C., Seoane, S., & Gil-Sotres, F. (2000). Biochemical properties of acid soils under climax vegetation (Atlantic Oakwood) in an area of the European temperate–humid zone (Galicia, NW Spain): general parameters. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 733-745. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00195-9.
28. Mallik, A.U., & Hu, D. (1997). Soil respiration following site preparation treatments in boreal mixedwood forest. *Forest Ecology and Management* 97: 265–275. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00067-4.
29. Mu, Z., Huang, A., Ni, J., & Xie, D. (2014). Linking annual N_2O emission in organic soils to mineral nitrogen input as estimated by heterotrophic respiration and soil C/N ratio. *PlOs One 9*(5): e96572. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096572.
30. Nannipieri, P., & Alef, K. (1995). Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. Netherlands: Elsevier Science.
31. Neatrour, M.A., Jones, R.H., & Golladay, S.W. (2005). Correlations between soil nutrients availability and fine- root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *Canadian Journal of Forest Research 35*(12): 2934-2941. https://doi.org/10.1139/x05-217.
32. Polyak, Y.M., & Sukcharevich, V.I. (2019). Allelopathic interactions between plants and microorganisms in soil

ecosystems. *Biology Bulletin Reviews 9*(6): 562-574. https://doi.org/10.1134/S2079086419060033.
33. Rasouli-Sadaghiani, M.H., Barin, M., Siavash Moghaddam, S., Damalas, C.A., & Ghodrat, K. (2018). Soil quality of an Iranian forest ecosystem after conversion to various types of land use. *Environmental Monitoring and Assessment* 190.8: 447. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6815-z.
34. Salehi, A., Matinizadeh, M., & Tamjidi, J. (2012). Investigation on effect of forest plantation of *Alnus ghutinosa* L. (Gaertn.) and *Pinus taeda* L. on soil microbial activity and biomass (case study: Geisom site, west of Guilan province, Iran). *Iranian Journal of Forest and Poplar Research 20*(2): 345-334. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijfpr.2012.107304.
35. Sheikhloo, F., & Rasouli Sadaghiani, M. (2016). Effects of different agronomic and forest land uses on soil enzyme activity. *Iranian Journal of Soil and Water Research 47*(1): 205-216. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.57992.
36. Silva, E.D., de Medeiros, E.V., Duda, G.P., Lira, M.A., de Oliveira, J.B., dos Santos, U.J., & Hammecker, C. (2019). Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region. *Catena* 172: 397-407. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.007.
37. Singh, R., Bhardwaj, D.R., Pala, N.A., Kaushal, R., & Rajput, B.S. (2018). Soil microbial characteristics in sub-tropical agro-ecosystems of North Western Himalaya. *Current Science* 115: 1956-1959. https://www.jstor.org/stable/26978529.
38. Soleimani, A., Hosseini, S.M., Bavani, A.R.M., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2019). Influence of land use and land cover change on soil organic carbon and microbial activity in the forests of northern Iran. *Catena* 177: 227-237. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.018.
39. Susyan, E.A., Ananyeva, N.D., & Blagodatskaya, E.V. (2005). The antibiotic-aided distinguishing of fungal and bacterial substrate-induced respiration in various soil ecosystems. *Microbiology 74*(3): 336-342. https://doi.org/10.1007/s11021-005-0072-1.
40. Tabatabai, M.A., & Bremner, J.M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry 1*(4): 301-307. https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1.
41. Ushio, M., Kitayama, K., & Balser, T.C. (2010). Tree species effects on soil enzyme activities through effects on soil physicochemical and microbial properties in a tropical montane forest on Mt. Kinabalu, Borneo. *Pedobiologia* 53: 227-233. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2009.12.003.
42. Wani, F.S., Akhter, F., Mir, S., Baba, Z.A., Maqbool, S., Zargar, M.Y., & Nabi, S.U. (2018). Assessment of soil microbial status under different land use systems in North Western Zone of Kashmir. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* 7: 266-279. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.708.032.
43. Wardle, D., Bonner, K., & Barker, G. (2002). Linkages between plant litter decomposition, litter quality, and vegetation responses to herbivores. *Functional Ecology* 16: 585–595. https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00659.x.
44. Yadava, R. (2012). Soil organic carbon and soil microbial biomass as affected by restoration measures after 26 years of restoration in mined areas of Doon Valley. *International Journal of Environmental Sciences* 2: 1380-1385.
45. Yang, N., Ji, L., Yang, Y., & Yang, L. (2018). The influence of tree species on soil properties and microbial communities following afforestation of abandoned land in northeast China. E*uropean Journal of Soil Biology* 85: 73-78. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2018.01.003.
46. Yao, H., He, Z.L., Wilson, M., & Campbell, C.D. (2000). Microbial biomass and community structure in a sequence of soils with increasing fertility and changing land use. *Microbial Ecology 40*(3): 223-237. https://doi.org/10.1007/s002480000053.
47. Zavaleta, E., & Hulvey, K. (2007). Realistic variation in species composition affects grassland production, resource use and invasion resistance. *Plant Ecology* 188: 39–51. https://doi.org/10.1007/s11258-006-9146-z.
48. Zeng, D.H., Hu, Y.L., Chang, S.X., & Fan, Z.P. (2009). Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Kerning, northeastern China. *Plant and Soil* 317: 121-133. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9793-z.
49. Zeng, Z., Wang, S., Zhang, C., Tang, H., Li, X., Wu, Z., & Luo, J. (2015). Soil microbial activity and nutrients of evergreen broad-leaf forests in mid-subtropical region of China. *Journal of Forestry Research 26*(3): 673-678. https://doi.org/10.1007/s11676-015-0060-x.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 611-628

Application of the RothC Model in Simulating Effect of Climate Change on CO_2 Emissions and Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Climate of Khorasan-e-Razavi

S. Bagherifam[1], M.A. Delavar[2*], P. Keshavarz[3], P. Karami[4]

Received: 11-09-2022
Revised: 26-10-2022
Accepted: 29-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Bagherifam, S., Delavar, M.A., Keshavarz, P., & Karami, P. (2022). Application of the RothC Model in Simulating Effect of Climate Change on CO_2 Emissions and Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Climate of Khorasan-e-Razavi. *Journal of Water and Soil 36*(5): 611-628. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.78752.1202

Introduction

Soil is one of the main drivers of global warming through losing carbon in the form of CO_2. On the other hand, its ability to sequester carbon is a suitable option for reducing CO_2 emissions. Therefore, even few changes in carbon sequestration or decomposition of soil organic carbon affect the global atmospheric CO_2 content. Although the soils of arid and semi-arid regions have low organic carbon content, they can sequester substantial amounts of carbon due to the large area of these regions. So, the Rothamsted carbon model was used to predict the impact of future climate changes on the amount of CO_2 emissions and low soil organic carbon stocks in the semi-arid arable lands of Razavi Khorasan province. This model is one of the most widely used models for the study of soil organic carbon turnover and has been evaluated in a variety of ecosystems including grasslands, forests and croplands and in various climate regions. The RothC model is consists of five conceptual soil carbon pools, four active fractions and a small amount of inert organic matter (IOM) that is resistant to decay. The active pools splits into: Decomposable Plant Material (DPM), Resistant Plant Material (RPM), Microbial Biomass (BIO) and Humified Organic Matter (HUM). This model is able to reveal the effect of soil texture, temperature, rainfall, evaporation, vegetation and crop management on the soil organic carbon turnover process.

Materials and Methods

The Rothamsted carbon model was calibrated and validated using data measured in 2020 and available data from the long-term field experiments in the semi-arid agricultural lands of Jolge Rokh. Then, by analyzing the climate change of the study area, the impact of climate change until the end of the current century on the amount of CO_2 cumulative emissions, total organic carbon (TOC) and active carbon pools model were modeled and compared in the current climate and also climate change conditions.

Results and Discussion

The comparison between the measured and simulated soil organic carbon values by the model shows the potential of the model to provide predictions with acceptable accuracy. The outcome of comparisons revealed that R^2, Root Mean Square Error (RMSE), Mean Difference (MD), Mean Absolute Error (MAE) and Model efficiency were 0.97, 2.78, 2.11, 2.33 and 0.70 respectively. Assessment of climate changes in the region (during 1981-2020)

1 and 2- Ph.D. Student and Associate Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: amir-delavar@znu.ac.ir)
3- Associate Professor, Department of Soil and Water Research, Khorasan Razavi Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Mashhad, Iran
4- Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

showed a decrease in precipitation and a significant increase in temperature over the past 40 years. Climate change simulation was carried out by temperature increasing and decreasing the precipitation until the end of the current century, indicated the decrease of all active carbon pools. It was found that DPM, RPM, BIO, HUM and TOC decreased respectively to 2.41, 2.72, 2.51, 1.04 and 1.32% compared to the current climatic conditions, while the cumulative CO_2 emission increased by 1.26%. Temperature rising leads to increase the rate modifying factor (*a*) by 2.20%, which enhances microbial respiration and decomposition rate of organic carbon and CO_2 emissions (carbon output). However, it also increases the ecosystem's net primary productivity (carbon input). Decreases in rainfall and increase in potential evapotranspiration cause a reduction of the rate modifying factor (*b*) to 0.23%, which on one side reduces the activity of microorganisms and carbon biodegradation; but on the other side, it decreases the vegetation cover and following that reduces CO_2 trapping during the photosynthesis process and transfers it to the soil. It seems that in arid and semi-arid climates where the lack of moisture is the most important limiting factor of the plants growth; the role of precipitation in carbon decomposition and sequestration is greater than temperature.

Conclusion

The Rothamsted carbon model is suitable for regional simulations because it requires only easily obtainable inputs. Therefore RothC is an appropriate tool for estimating long-term effects of climate change and agricultural management (such as application of manures, returning plant residues to the soil, crop rotations, conservation tillage etc.). The RothC model validation in the cold semi-arid agricultural lands of the region, shows the ability of model to properly simulate the pattern of organic carbon changes. Also, simulation of soil organic carbon changes under the climate changes conditions indicates an increase in cumulative CO_2 emissions and decrease in soil organic carbon pools of the study area. The methodology can be applied to other regional estimations, provided that the relevant data are available. The predictions allowed to identify the land management potential to carbon sequestration. Such information demonstrate a beneficial tool for evaluation of past land management effects on soil organic carbon trends and also estimation of future climate change effects on soil organic carbon stocks and CO_2 emissions.

Keywords: Global warming, Carbon sequestration, Decomposition of soil organic matter, Model efficiency, Rothamsted carbon model

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۶۲۸-۶۱۱

کاربرد مدل RothC در شبیه‌سازی اثر تغییرات اقلیمی بر انتشار کربن دی‌اکسید و ذخایر کربن آلی خاک اقلیم نیمه‌خشک خراسان رضوی

صبا باقریفام[۱]- محمد امیر دلاور[۲*]- پیمان کشاورز[۳]- پرویز کرمی[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۷

چکیده

خاک با از دست دادن کربن به شکل کربن دی‌اکسید، پتانسیل زیادی برای تشدید گرمایش زیست‌کره دارد. از سوی دیگر امکان ترسیب کربن در خاک، راهکار مناسبی جهت کاهش انتشار کربن دی‌اکسید شناخته می‌شود. خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان اگرچه حاوی مقادیر کمی کربن آلی هستند؛ اما به‌واسطه وسعت زیاد، امکان ترسیب مقادیر قابل‌توجهی کربن آلی را دارند. از این‌رو جهت بررسی تغییرات ذخایر کربن آلی خاک اراضی زراعی اقلیم نیمه‌خشک جلگه‌رخ واقع در استان خراسان رضوی، مدل رتامستد با استفاده از داده‌های مطالعات پیشین و مقادیر اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۲۰ اعتبارسنجی شد. مقایسه بین مقادیر کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، نشانگر قابلیت مدل در ارائه پیش‌بینی‌هایی با دقت مناسب بود. به‌طوری‌که مقادیر ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا، تفاوت میانگین و شاخص کارایی مدل به ترتیب معادل ۰/۹۷، ۲/۷۸، ۲/۱۱، ۲/۳۳ و ۰/۷۰ به‌دست آمدند. سپس تأثیر تغییرات اقلیمی بر انتشار کربن دی‌اکسید و ذخایر کربن آلی خاک منطقه مدل‌سازی شد. بررسی تغییرات اقلیمی منطقه در (دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) نشانگر کاهش بارندگی و افزایش معنی‌دار دما طی ۴۰ سال گذشته بوده است. مدل‌سازی تغییرات اقلیمی تا پایان قرن جاری با اعمال افزایش دما و کاهش بارندگی انجام شد که نتایج بیانگر کاهش همه ذخایر کربن فعال مدل بود، چنان‌که مخازن مواد گیاهی تجزیه‌پذیر، مواد گیاهی مقاوم، زیست‌توده میکروبی، مواد آلی هوموسی‌شده و کل کربن آلی خاک به‌ترتیب معادل ۲/۴۱، ۲/۷۲، ۲/۵۱، ۱/۰۴ و ۱/۳۲ درصد نسبت به شرایط عدم وقوع تغییرات اقلیمی کاهش و میزان انتشار تجمعی کربن دی‌اکسید از خاک، ۱/۲۶ درصد افزایش نشان داد. افزایش دما باعث افزایش ضریب تصحیح دما (a) به میزان ۲/۲۰ درصد شد که منجر به افزایش سرعت تجزیه کربن آلی و تلفات کربن به شکل کربن دی‌اکسید شده است؛ اگرچه باعث افزایش تولید خالص اولیه بوم‌نظام نیز گردید. کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل نیز باعث کاهش ضریب تصحیح رطوبت (b) به میزان ۰/۲۳ درصد شد؛ این فرایند از یک سو با کاهش فعالیت ریزجانداران موجب کاهش تجزیه زیستی کربن و انتشار کربن دی‌اکسید از خاک شده است؛ اما از سوی دیگر موجب کاهش درصد پوشش گیاهی و پیرو آن به دام انداختن کربن دی‌اکسید طی فرایند فتوسنتز و انتقال آن به خاک می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه ماده آلی خاک، ترسیب کربن، شاخص کارایی، گرمایش جهانی، مدل رتامستد

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی دکتری و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: amir-delavar@znu.ac.ir)
۳- دانشیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مشهد، ایران
۴- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.78752.1202

مقدمه

کربن موجود در ماده آلی خاک که بیش از ۵۰ درصد آن را تشکیل می‌دهد؛ کربن آلی خاک نامیده می‌شود. خاک‌ها علاوه بر کربن آلی، حاوی کربن معدنی نیز می‌باشند؛ که به‌طور معمول به‌صورت کانی‌های کلسیت، دولومیت و کلسیت منیزیم‌دار در خاک یافت می‌شوند (Doner and Lynn, 1989). مقدار ذخایر کربن آلی خاک تا عمق یک متری بین ۱۲۲۰ تا ۱۵۷۶ پتاگرم[1] و مقدار ذخایر کربن معدنی در حدود ۷۰۰ تا ۱۷۰۰ پتاگرم تخمین زده می‌شود (Batjes, 1996; Eswaran, 2000)؛ که این مقادیر، بیش از مجموع میزان کربن موجود در گیاهان (۶۵۰ پتاگرم) و هواکره (۷۵۰ پتاگرم) است (Stockmann *et al.*, 2013). خاک بزرگ‌ترین مخزن کربن خشکی‌های جهان به‌شمار می‌آید (Guo *et al.*, 2016)؛ بنابراین، حتی تغییرات کوچک در مقادیر تجزیه و یا ترسیب کربن آلی خاک، به‌طور مستقیم بر محتوی کربن دی‌اکسید اتمسفری (CO_2) تأثیر می‌گذارد (Weihermüller *et al.*, 2013).

در نتیجه افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی جنگلی و مرتعی، غلظت کربن دی‌اکسید در اتمسفر از ۲۵۰ قسمت در میلیون (ppm) در سال ۱۸۵۰ به ۴۲۰ ppm در سال ۲۰۲۱ افزایش داشته است؛ که طبق برآوردها منجر به افزایش میانگین دمای کره زمین بین ۱/۵ تا ۲ درجه سلسیوس تا ۲۰ سال آینده خواهد شد (IPCC, 2021). مدل‌سازی آینده اقلیمی ایران در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۹ نیز افزایش حداقل ۱/۱ و حداکثر ۲/۷۵ درجه سلسیوس دما در سراسر ایران را نشان می‌دهد (Vaghefi *et al.*, 2019). در پژوهش‌های متعددی گزارش شده است که در پی افزایش دما، سرعت تجزیه و هدرروی کربن آلی خاک افزایش می‌یابد؛ که خود موجب افزایش سرعت انتشار کربن دی‌اکسید و تشدید گرمایش زیست‌کره می‌گردد (Barančíková *et al.*, 2010; Francaviglia *et al.*, 2013; Muñoz-Rojas *et al.*, 2017).

در سال‌های اخیر علاقه علمی زیادی به تخمین بازخورد بالقوه ذخایر کربن آلی خاک نسبت به تغییرات آب و هوایی به‌وجود آمده است (Davidson and Janssens, 2006). برای درک بهتر نقش کربن آلی خاک در چرخه کربن جهان، شناخت توزیع بخش‌های مختلف آن بسیار با اهمیت است (Schimel *et al.*, 2001). بخش‌های مختلف کربن آلی از نظر نرخ گردش کربن، پایداری بیولوژیکی و ترکیب بیوشیمیایی با یکدیگر متفاوت هستند (Paustian *et al.*, 1992). علاوه بر مشکلات اندازه‌گیری ترکیبات کربن آلی، سرعت تغییر و تبدیل اغلب این ذخایر نیز بسیار کند و تدریجی است؛ بنابراین، به‌منظور پیش‌بینی تغییرات کربن آلی خاک در پاسخ به تغییرات آب و هوایی، کاربری اراضی و نحوه مدیریت زمین، مدل‌های مختلف گردش کربن خاک توسعه یافتند (Kaczynski *et al.*, 2017). مدل‌ها با امکان شبیه‌سازی وضعیت آینده اراضی با شرایط اقلیمی فعلی و فرضی، قابلیت ارائه پیش‌بینی‌های مبتنی بر واقعیت، سال‌ها قبل از وقوع آن را دارند. مدل RothC (Coleman and Jenkinson, 1996) که بر اساس نتایج پایش بلندمدت اراضی یکی از قدیمی‌ترین ایستگاه‌های تحقیقات کشاورزی جهان در رتامستد[2] انگلستان طراحی شده است؛ از معتبرترین و پرکاربردترین مدل‌های بررسی پویایی کربن آلی خاک است. این مدل در بیش از ۸۰ کشور دنیا مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است (Francaviglia *et al.*, 2012). مدل رتامستد قادر است تأثیر بافت خاک، دما، رطوبت، پوشش گیاهی و استفاده از کودها را بر تغییر و تبدیل ذخایر کربن آلی خاک، نشان دهد (Kaczynski *et al.*, 2017). این مدل از پنج مخزن مفهومی کربن تشکیل شده است (Jordon and Smith, 2022). چهار مخزن فعال و یک مخزن غیرفعال (ماده آلی پایدار) که چهار بخش فعال عبارت هستند از: مواد گیاهی مقاوم[3] (RPM)، مواد گیاهی تجزیه‌پذیر[4] (DPM)، زیست‌توده میکروبی[5] (BIO) و مواد آلی هوموسی‌شده[6] (HUM). جزء غیرفعال نیز به‌عنوان ماده آلی بی‌اثر[7] (IOM) شناخته می‌شود (Barančíková *et al.*, 2010; Diele *et al.*, 2021). هریک از ذخایر فعال کربن مدل رتامستد بر مبنای سینتیک واکنش مرتبه اول و با سرعت تجزیه مخصوص به خود در طی زمان تجزیه‌شده و تولید کربن دی‌اکسید می‌نمایند که به هواکره باز می‌گردد؛ این سرعت تجزیه برای هر خاک، بر اساس رطوبت خاک، دما و پوشش گیاهی اصلاح می‌گردد (Kaonga and Coleman, 2008).

مطالعات معدودی به مقایسه بین ذخایر مفهومی مدل رتامستد با بخش‌های متناظر ماده آلی خاک که از فرایندهای جدایه‌پذیری[8]

1- Petagram = 1 Gigatonne
2- Rothamsted
3- Resistant Plant Material
4- Decomposable Plant Material
5- Microbial Biomass
6- Humified Organic Matter
7- Inert Organic Matter
8- Fractionation procedure

فیزیکی و شیمیایی به‌دست آمدند؛ پرداخته‌اند (Skjemstad *et al.*, 2004; Zimmermann *et al.*, 2007; Dondini *et al.*, 2009; Leifeld *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2011)؛ اما در اکثر پژوهش‌های انجام‌گرفته، همبستگی خوبی بین این مقادیر گزارش شده است. از جمله مطالعات انجام‌شده در اراضی زراعی مناطق مختلفی از اروپا که در آن ضریب همبستگی برای بخش‌های مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم بین ۰/۷۶ تا ۰/۸۲ و برای بخش‌های مواد آلی هوموسی‌شده و زیست‌توده میکروبی بیش از ۰/۹۰ به دست آمد (Zimmermann *et al.*, 2007).

اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک جهان کربن آلی کمی دارند؛ ازاین‌رو کمتر به مدل‌سازی پویایی کربن آلی خاک این مناطق پرداخته شده است (Farina *et al.*, 2017). در ایران نیز مطالعات اندکی در این خصوص انجام شده است که در این بین مطالعات انجام گرفته با استفاده از مدل رتامستد، در بوم‌نظام‌های مرتعی و جنگلی ایران که دارای پوشش دائم گیاهی و به‌طورمعمول حاوی مقادیر بیشتری کربن آلی خاک هستند؛ انجام شده است (Fallahi *et al.*, 2013; Soleimani *et al.*, 2017; Azad and Afzali, 2019)؛ اما مستنداتی در زمینه به‌کارگیری مدل رتامستد در بررسی ذخایر کم کربن آلی بوم‌نظام‌های زراعی ایران که به لحاظ تأمین امنیت غذایی کشور، حائز اهمیت ویژه‌ای هستند؛ مشاهده نشد. کربن آلی خاک این مناطق علاوه بر تأثیرپذیری از شرایط اقلیمی، متأثر از نحوه مدیریت زراعی نیز می‌باشد. از این‌رو در پژوهش حاضر ضمن ارزیابی قابلیت مدل RothC در شبیه‌سازی تغییرات ذخایر کربن آلی خاک اراضی کشاورزی جلگه‌رخ استان خراسان رضوی، تأثیر تغییرات اقلیمی تا پایان قرن حاضر بر میزان انتشار تجمعی کربن دی‌اکسید، کل کربن آلی خاک و هریک از ذخایر پنج‌گانه کربن آلی مدل تحت مدیریت کنونی این اراضی، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه موردمطالعه

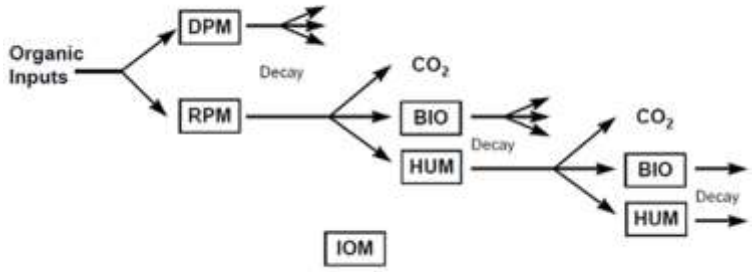
کل مساحت اراضی کشاورزی بخش جلگه‌رخ شهرستان تربت‌حیدریه، ۳۸۴۳۸ هکتار است؛ که منطقه موردمطالعه اراضی کشاورزی به مرکزیت مختصات ″۴۶ ′۱۰ °۵۹ طول شرقی و ″۱۹ ′۳۶ °۳۵ عرض شمالی می‌باشند. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا حدود ۱۷۲۰ متر است. اقلیم منطقه با وجود تابستان‌های معتدل، زمستان‌های سرد و بهارهای خنک با میانگین ۹۷ روز یخبندان در سال، بر پایه طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر، سرد و نیمه‌خشک (BSk) است. محدوده مطالعاتی در واحد فیزیوگرافی دشت‌های آبرفتی دامنه‌ای قرار می‌گیرد و خاک‌های غالب منطقه مطابق سیستم رده‌بندی جامع آمریکایی (۲۰۱۴) تا سطح تحت گروه Xeric Torriorthents است (Mansouri, 2000). رژیم رطوبتی اریدیک هم‌مرز با زریک و رژیم حرارتی خاک‌ها مزیک می‌باشد و بر روی کنگلومرا و مارن‌های گچ‌دار دوره ائوسن تشکیل شده است (Mansouri, 2000).

تجزیه هر یک از اجزاء فعال کربن مدل RothC

کربن ورودی از بقایای گیاهی بسته به کیفیت بقایا به دو بخش مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم تقسیم می‌شوند؛ که طبق مطالعات انجام‌شده در اراضی زراعی، این تقسیم به نسبت ۵۹ درصد مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و ۴۱ درصد مواد گیاهی مقاوم انجام می‌گیرد (Coleman and Jenkinson, 2014 Shirato and Yokozawa, 2006). سپس هریک از این دو بخش به‌نوبه خود تجزیه‌شده و تولید زیست‌توده میکروبی به‌علاوه مواد آلی هوموسی‌شده (BIO+HUM) و کربن دی‌اکسید می‌کنند. مقدار رس خاک با تأثیر بر سرعت تجزیه و قدرت نگهداری آب در خاک، تعیین‌کننده نسبت بین کربن دی‌اکسید و BIO+HUM می‌باشد که از معادله (۱) محاسبه می‌شود. سپس BIO+HUM تولیدی به ۴۶ درصد زیست‌توده میکروبی و ۵۴ درصد مواد آلی هوموسی‌شده تقسیم می‌شوند و هرکدام از این اجزا همچنان تجزیه‌شده و تولید کربن دی‌اکسید، زیست‌توده میکروبی و مواد آلی هوموسی‌شده می‌کنند (شکل ۱).

$$x = 1.67(1.85 + 1.60\exp(-0.0786\%\,clay)) \quad (۱)$$

در این معادله x نسبت کربن دی‌اکسید به BIO+HUM است، بنابراین x/(x+1) کربن دی‌اکسید آزادشده و 1/(x+1) مقدار BIO+HUM تشکیل شده است (Barančíková *et al.*, 2010; Coleman and Jenkinson, 2014).



شکل ۱- ساختار مدل کربن رتامستد (Coleman and Jenkinson, 2014)

Figure 1- Structure of the Rothamsted Carbon Model

ضرایب تصحیح سرعت تجزیه در مدل

چنانچه یک جزء فعال مدل، دارای Y تن کربن در هکتار باشد، مقدار آن در پایان ماه به $Y\ e^{-abckt}$ کاهش می‌یابد. در این معادله a ضریب تصحیح دما، b ضریب تصحیح رطوبت، c ضریب تصحیح پوشش خاک و k ثابت سرعت تجزیه سالانه است (جدول ۱)؛ بنابراین t معادل زمان یک ماه بوده و $Y(1-e^{-abckt})$ مقداری از یک جزء فعال است که طی یک ماه مشخص تجزیه می‌شود (Coleman *et al.*, 1997; Coleman and Jenkinson, 2014).

جدول ۱- ثابت سرعت تجزیه (k) سالانه برای اجزای فعال

Table 1- Decomposition rate constants (k), in years^{-1}, for active compartments

DPM	RPM	BIO	HUM
10.0	0.3	0.66	0.02

ضریب تصحیح دما (a) از معادله (۲) محاسبه می‌شود که در آن T میانگین دمای ماهانه بر حسب سلسیوس است.

$$a = \frac{47.91}{1+e^{\left(\frac{106.06}{T+18.27}\right)}} \qquad (۲)$$

جهت محاسبه ضریب تصحیح رطوبت (b)، ابتدا حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک[1] از معادله (۳) محاسبه می‌شود (Farina *et al.*, 2013).

$$\text{Max TSMD} = -(20.0 + 1.3(\%\text{clay}) - 0.01(\%\text{clay})^2) \qquad (۳)$$

این معادله بر اساس عمق نمونه‌برداری در کرت‌های آزمایشی رتامستد (۲۳ سانتی‌متر) تنظیم شده است؛ که برای منطقه مطالعاتی بر اساس عمق نمونه‌برداری تصحیح گردید. پس‌ازآن، مقدار تجمعی کمبود رطوبت لایه سطحی خاک[2] برای عمق نمونه‌برداری از اولین ماهی که تبخیر و تعرق پتانسیل از بارندگی پیشی می‌گیرد تا زمانی که به حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک می‌رسد محاسبه می‌شود. سپس ضریب تصحیح رطوبت (b) برای هر ماه به‌این‌ترتیب تعیین می‌گردد:

اگر acc.TSMD<0.444 max. TSMD باشد، b برابر یک است و در غیر این صورت از معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$b = 0.2 + (1.0 - 0.2) \times \frac{(\text{max TSMD} - \text{acc.TSMD})}{(\text{max.TSMD} - 0.444\ \text{max.TSMD})} \qquad (۴)$$

مقدار تجزیه در خاک‌های فاقد پوشش گیاهی، از خاک‌هایی که سطح آن با پوشش گیاهی پوشیده شده است؛ بیشتر است؛ بنابراین ضریب تصحیح پوشش خاک (c) در ماه‌هایی که خاک دارای پوشش گیاهی است ۰/۶ و در مواقعی که خاک بدون پوشش باشد یک است (Coleman and Jenkinson, 2014). در اراضی موردمطالعه بسته به زمان کاشت و برداشت محصولات و دوره‌های آیش بودن اراضی، مقدار این ضریب تعیین شد.

ورودی‌های مدل RothC

ورودی‌های مدل در سه بخش اطلاعات خاک، اطلاعات کاربری و مدیریت اراضی و داده‌های اقلیمی طبقه‌بندی می‌شوند که اطلاعات موردنیاز خاکی و مدیریتی با همکاری بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خراسان رضوی با استفاده از طرح‌های انجام‌شده در اراضی موردمطالعه شامل: طرح محوری گندم (۱۹۹۲)، توصیه کودی (۱۹۹۵)، مطالعات حاصلخیزی تربت‌حیدریه (۲۰۰۹)، مرحله اول پایش اراضی کشاورزی (۲۰۱۰) و مرحله دوم پایش اراضی کشاورزی (۲۰۲۰) که هم‌راستا با این مطالعه و جهت اعتبارسنجی مدل RothC انجام پذیرفته است؛ تکمیل شد. به‌این‌ترتیب با استفاده از اطلاعات موجود و اندازه‌گیری شده در سال ۲۰۲۰، اعتبارسنجی مدل RothC در شرایط اقلیمی و مدیریتی اراضی زراعی جلگه‌رخ، با استفاده از اطلاعات مجموع میانگین ۶۸ نمونه از مناطق موردمطالعه، انجام پذیرفت. توزیع اندازه

1- Topsoil moisture deficit (TSMD)

2- Accumulated TSMD (acc. TSMD)

ذرات خاک با روش هیدرومتر، کربن آلی خاک به‌روش اکسیداسیون‌تر، نیتروژن کل با روش کجلدال، فسفر قابل‌جذب به روش اولسن، پتاسیم تبادلی با دستگاه فلیم‌فتومتر، جرم مخصوص ظاهری خاک در نمونه‌های دست‌نخورده به روش سیلندر (Soil Survey Manual, 2014) اندازه‌گیری شدند. توصیف آماری نمونه‌های خاک در جدول (۲) نشان داده شده است. توزیع داده‌ها در تمام گروه‌ها نرمال بود.

برای محاسبه ورودی‌های مدل در بخش اطلاعات اقلیمی، از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک تربت‌حیدریه استفاده شد. برای این منظور آمار بلندمدت (۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰) این ایستگاه از طریق سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. میانگین دمای سالانه تربت‌حیدریه ۱۴/۸ درجه سلسیوس محاسبه شد. تیر ماه با میانگین ۲۷/۶ و دی ماه با ۱ درجه سلسیوس به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه‌های سال هستند. میانگین بارندگی سالانه ۲۵۸/۸ میلی‌متر است؛ که بیشترین مقدار بارش در اسفند ماه با میانگین ۵۱/۲ میلی‌متر ثبت شده است. میانگین پتانسیل تبخیر سالانه ۱۴۶۵ میلی‌متر است که بیشترین میانگین پتانسیل تبخیر، در تیر ماه با میانگین ۲۸۵ میلی‌متر است.

جدول ۲- توصیف آماری ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک منطقه موردمطالعه در سال ۲۰۲۰ (عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر)

Table 2- Summary statistics of soil physicochemical properties in 2020 (at 0-30 cm depth)

	واکنش خاک pH	جرم مخصوص ظاهری BD (g cm^{-3})	قابلیت هدایت الکتریکی EC (dSm^{-1})	پتاسیم K (mg kg^{-1})	فسفر P (mg kg^{-1})	نیتروژن N (%)	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	کربن آلی OC (%)
Mean میانگین	7.8	1.38	5.85	458	10.8	0.048	38	45	17	0.64
Maximum بیشینه	8.2	1.9	8.90	591	19.7	0.078	52	57	25	1.2
Minimum کمینه	7.1	1.08	3.74	228	3.5	0.022	25	31.6	9.8	0.21
SD انحراف معیار	0.32	0.23	0.887	95.08	4.2	0.015	6.2	5.6	4.5	0.26

جدول ۳- اطلاعات مدیریت اراضی مدل RothC برای وضعیت تعادل و سال پایانی

Table 3- RothC model land management files for equilibrium mode and final year

اطلاعات موردنیاز Data requirements	مقدار/سال Year/Value 1992	2020
عمق نمونه‌برداری Depth of soil layer sampled (cm)	30	30
درصد رس Clay content (%)	31	38
کل کربن آلی خاک TOC (t C ha^{-1})	28.63	25.29
ماده آلی پایدار IOM (t C ha^{-1})	2.23	1.94
کربن ورودی از بقایای گیاهی Input of plant residues (t C ha^{-1})	1.10	0.67
کربن ورودی از کودهای حیوانی Input of farmyard manures (t C ha^{-1})	0.93	2.4
نسبت مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به مواد گیاهی مقاوم DPM/RPM ratio	1.44	

برای محاسبه مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت‌وایت (Thornthwaite, 1948) استفاده شد و به کمک این اطلاعات، مقادیر حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک و مقدار تجمعی کمبود رطوبت لایه سطحی خاک به‌دست آمد (Coleman and Jenkinson, 2014). ازآنجاکه اندازه‌گیری تجربی ماهانه حداکثر کمبود رطوبت لایه سطحی خاک در عمق مورد بررسی خاک، مشکل است؛ برای محاسبه این شاخص از اطلاعات هواشناسی استفاده می‌شود. همچنین، به‌جای دمای خاک از دمای هوا که اندازه‌گیری آن

بسیار پرکاربردتر، آسان‌تر و در دسترس‌تر است؛ استفاده می‌شود. نتایج بررسی‌ها نشان داد که دمای ماهانه هوا به‌خوبی مبین دمای ماهانه خاک سطحی است و در نهایت تفاوتی در حد یک درجه سلسیوس بیشتر از حداقل سالانه و یک درجه سلسیوس کمتر از حداکثر سالانه دمای هوا دارد (Coleman and Jenkinson, 2014).

ورودی‌های کاربری بر اساس اطلاعات کشت منطقه تکمیل شد. کشت غالب اراضی موردمطالعه، غلات زمستانه آبی در تناوب با پنبه و صیفی‌جات به همراه آیش دوره‌ای است. به‌طور متوسط مقداری کربن در هر ماه از طریق بقایای گیاهی و همچنین طی رشد گیاه از ریشه‌ها به خاک اضافه می‌گردد (Skjemstad *et al.*, 2004). مقدار ورودی کربن از این طریق به‌ندرت مشخص می‌گردد، لذا بخشی در مدل طراحی شده است که می‌توان از طریق آن مدل را به‌صورت معکوس اجرا نمود و میزان کربن ورودی از طریق بقایا را محاسبه کرد. فاکتور کیفیت بقایا نیز که بیانگر نسبت مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به مواد گیاهی مقاوم است؛ بر اساس مطالعات انجام‌شده در اراضی زراعی معادل ۱/۴۴ تعیین گردید (Shirato and Yokozawa, 2006; Barančíková *et al.*, 2010; Coleman and Jenkinson, 2014).

واسنجی و اجرای مدل

جهت به‌کارگیری مدل RothC در هر منطقه جغرافیایی، ابتدا می‌بایست بر اساس اطلاعات منطقه مورد آزمایش، مدل واسنجی گردد (Smith *et al.*, 2008). سرعت تجزیه در هر منطقه بر اساس نوع خاک، مقدار رطوبت خاک، دما و نیز وضعیت پوشش گیاهی، با تغییر مقادیر ضرایب تجزیه (*a*، *b* و *c*) ضمن حفظ ساختار درونی مدل و قواعد حاکم بر گردش کربن، اصلاح می‌گردد (Kaonga and Coleman, 2008; Francaviglia *et al.*, 2017). داده‌های مخازن کربن به‌طور مستقیم وارد مدل نمی‌شوند و از شبیه‌سازی دوره تعادل چندین هزار ساله تحت شرایط منطقه مورد بررسی به‌دست می‌آیند. دوره تعادل یک خط مبنا برای بررسی اثر شرایط اقلیمی کنونی و اقدامات مدیریتی انجام‌شده بر خاک، ایجاد می‌کند؛ بنابراین برای واسنجی مدل، وجود حداقل یک اندازه‌گیری تاریخی ذخیره کربن آلی خاک در منطقه مورد بررسی لازم است (Coleman and Jenkinson, 1996). در این فرایند، پس از ورود اطلاعات بلندمدت اقلیمی و داده‌های خاکی و مدیریتی، مدل ذخایر کربن خاک را از ۱۰ هزار سال قبل طوری رشد می‌دهد که به میزان ذخیره کربن در سال پایانی تعریف‌شده (در اینجا سال ۱۹۹۲) برساند و خط مبنا دوره تعادل ایجاد گردد. برای این امر میزان کل کربن آلی در سال ۱۹۹۲، با استفاده از معادله (۵) و ماده آلی پایدار اولیه خاک از معادله (۶) محاسبه شد (Falloon *et al.*, 1998). در این معادله SOC درصد کربن آلی خاک، BD جرم مخصوص ظاهری، D عمق نمونه‌برداری و G درصد حجمی سنگریزه بزرگ‌تر از دو میلی‌متر است.

$$TOC\ (t\ ha^{-1})=SOC(\%)\times BD\ (g\ cm^{-3})\times D(cm)\times(1-G) \quad (۵)$$

$$IOM= 0.049\ TOC^{1.139} \quad (۶)$$

پس از اجرای مدل در حالت تعادل و با نقطه پایانی سال ۱۹۹۲ (جدول ۳)؛ خروجی‌های مدل مورد بازبینی قرار گرفت و مقدار کربن ورودی از طریق بقایای گیاهی به‌طور مکرر تصحیح و نتایج مدل در هر بار اجرا بررسی شد تا مقدار ذخیره کربن آلی خاک شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل با مقدار ذخیره کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده در این سال برابر گردد (Farina *et al.*, 2017; Francaviglia *et al.*, 2017). سپس با ساخت سناریوهای متوالی بر پایه اطلاعات خاک، مدیریت اراضی و اطلاعات اقلیمی، مدل اجرا و خروجی‌های آن ثبت شد تا مدل اعتبارسنجی گردد.

اعتبارسنجی مدل

جهت اعتبارسنجی مدل، مقادیر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده، با مقادیر جفتی شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل از شاخص‌های آماری ضریب تبیین[1]، ریشه میانگین مربعات خطا[2]، میانگین مطلق خطا[3]، تفاوت میانگین[4] و شاخص کارایی[5] مدل استفاده شد (Smith and Smith, 2007). ضریب تبیین (ضریب تعیین) نسبتی از واریانس کل داده‌های مشاهده شده است که به‌وسیله مقادیر شبیه‌سازی‌شده بیان می‌شود و از معادله (۷) به‌دست می‌آید. ریشه میانگین مربعات خطا از معادله (۸) و مقدار میانگین مطلق خطا از معادله (۹) محاسبه می‌شود. تفاوت میانگین و شاخص کارایی مدل به ترتیب از معادله‌های (۱۰) و (۱۱) به دست می‌آیند؛ که هرچه شاخص کارایی مدل به یک نزدیک‌تر باشد، مدل عملکرد بهتری داشته است (Paul *et al.*, 2003).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(Si-\bar{O})(Oi-\bar{O})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Si-S)^2 \quad \sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2} \quad (۷)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \quad \sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad (۸)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|Oi-Si|}{n} \quad (۹)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-Si)}{n} \quad (۱۰)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n}(Si-Oi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Oi-\bar{O})^2} \quad (۱۱)$$

در این روابط Si بیانگر مقادیر شبیه‌سازی‌شده، Oi مقادیر مشاهده‌شده، $\bar{O}$ میانگین مقادیر مشاهده‌شده، $\bar{S}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و n تعداد مشاهده‌ها است.

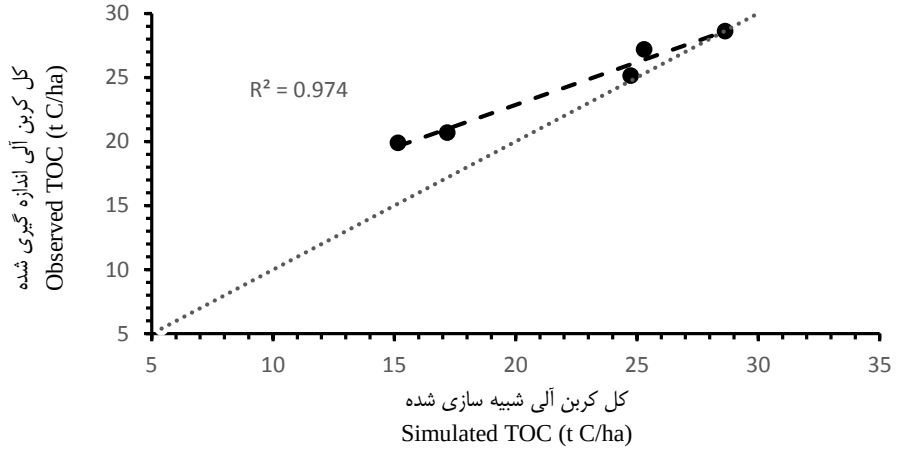
1- Coefficient of determination, R2
2- Root Mean Square Error, RMSE
3- Mean Absolute Error, MAE
4- Mean Difference, MD
5- Model Efficiency, EF

نتایج و بحث

محاسبه درصد تغییرات کربن آلی بوم نظام زراعی موردمطالعه از معادله (۱۲) بیانگر کاهش ۱۱ درصدی ذخیره کربن آلی خاک منطقه در مدت مورد بررسی است.

$$\text{درصد تغییرات ذخیره کربن آلی} = 100 \times \frac{(\text{ذخیره کربن آلی } 2020 - \text{ذخیره کربن آلی } 1992)}{\text{ذخیره کربن آلی } 1992} \quad (۱۲)$$

عوامل کاهنده کربن آلی خاک در دو دسته عوامل افزایش‌دهنده سرعت تجزیه کربن آلی خاک و عوامل کاهش‌دهنده ورود مواد آلی به خاک، طبقه‌بندی می‌شوند (Navarro-Pedreño *et al.*, 2021). در بوم‌نظام‌های زراعی عملیات خاک‌ورزی با شکافتن خاک و تسریع ورود اکسیژن به خاک، موجب افزایش سرعت تجزیه کربن آلی و تنفس هتروتروفیک خاک می‌گردد؛ همچنین برداشت محصول و خروج بقایای گیاهی از سطح خاک، کاهش کربن ورودی به بوم‌نظام را در پی دارد.



شکل ۲- همبستگی بین میانگین ذخایر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل RothC

Figure 2- Correlation between mean total organic carbon stocks observed and simulated by RothC

نتایج اعتبارسنجی مدل که با مقایسه بین مقادیر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده و مقادیر جفتی شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله مدل، انجام شد؛ نشانگر قابلیت به‌کارگیری مدل رتامستد در برآورد وضعیت تجزیه و ترسیب کربن آلی خاک اقلیم سرد و نیمه‌خشک اراضی زراعی استان خراسان رضوی است. معادله رگرسیون خطی بین مقادیر کل کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. ضریب تبیین که معیار سنجش میزان برازش مدل است؛ برابر ۰/۹۷ محاسبه شد. به‌طورمعمول ضریب تبیین بالاتر از ۶۰ درصد، بیانگر کارآمدی مدل در تخمین تغییرات متغیر وابسته نسبت به متغیر مستقل است و نسبت به سایر شاخص‌های آماری، معیار استانداردتری برای ارزیابی اعتبار مدل‌ها در هر حوزه علمی است (Chicco *et al.*, 2021). ریشه میانگین مربعات خطا نیز برابر ۲/۷۸ محاسبه شد. کمترین مقدار ممکن برای این شاخص صفر است؛ که بیانگر عدم وجود تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده می‌باشد و بسته به حدود اعداد، چنانچه کمتر از ۱۰ باشد مدل کارایی قابل قبولی داشته است (Smith *et al.*, 1996). میانگین مطلق خطا که بیانگر تفاوت بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده است؛ معادل ۲/۳۳ به دست آمد. تفاوت میانگین نیز معادل ۲/۱۱ محاسبه شد که هرچه این شاخص به صفر نزدیک‌تر باشد؛ بیانگر خطای پایین‌تری بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده است (Smith and Smith, 2007). در نهایت شاخص کارایی برابر ۰/۷۰ به‌دست آمد که بیانگر برازش مناسب مدل است.

اعتبارسنجی مدل RothC در برخی بوم‌نظام‌های زراعی اقلیم‌های نیمه‌خشک جهان نیز انجام شده است؛ از جمله در فوجا[1] ایتالیا با میانگین کربن آلی خاک ۱/۵ درصد، میانگین سالانه دما ۱۵/۸ درجه سلسیوس و میانگین بارندگی و تبخیر سالانه به ترتیب ۵۲۶ و ۱۱۱۹ میلی‌متر (Borrelli et al, 2011)؛ ساراگوسا[2] اسپانیا با کربن آلی ۱/۱ درصد، دما ۱۵ درجه سلسیوس و بارندگی و تبخیر به ترتیب ۳۱۷ و ۷۹۶ میلی‌متر (Alvaro-Fuentes *et al.*, 2009)؛ کوردوبا[3] اسپانیا با کربن آلی ۰/۶ درصد، دما ۱۷/۷ درجه سلسیوس و بارندگی و تبخیر به ترتیب ۵۳۵ و ۱۰۵۳ میلی‌متر (Lopez-Bellido *et al.*, 2010) و تل‌هادیا[4] سوریه با ۰/۸ درصد کربن آلی، دما ۱۷/۵ درجه سلسیوس و بارندگی و تبخیر به ترتیب ۳۲۸ و ۱۲۹۹ میلی‌متر (Jenkinson *et al.*, 1999)؛ که نتایج اعتبارسنجی مدل رتامستد در این مناطق حاکی از قابلیت نسبی به‌کارگیری مدل در این شرایط اقلیمی و منطقه‌ای

1- Foggia
2- Zaragoza
3- Cordoba
4- Tel Hadya

بوده است. چنان‌که مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در این مناطق بین ۲/۳ تا ۶/۵، مقدار تفاوت میانگین بین ۱/۵۷ تا ۴/۱۷ و شاخص کارایی مدل بین ۰/۴۵ تا ۰/۹۵ گزارش شد (Farina *et al*., 2013). مطالعات انجام‌شده در بوم‌نظام‌های مرتعی اقلیم نیمه‌خشک ایران نیز بیانگر اعتبار مدل RothC در این نواحی است؛ در اراضی مرتعی سربیشه خراسان جنوبی با میانگین کربن آلی ۰/۲ درصد، دما حدود ۱۶/۳ درجه سلسیوس، بارندگی کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر و تبخیر حدود ۲۶۰۰ میلی‌متر (اطلاعات اقلیمی برآورد شده است)؛ مقدار ضریب تبیین معادل ۰/۹۸ و شاخص کارایی مدل نیز معادل ۰/۹۸ به‌دست آمد (Fallahi *et al*., 2013). همچنین در اراضی مرتعی باجگاه استان فارس با کربن آلی حدود ۱/۴ درصد، میانگین دما ۱۳/۴ درجه سلسیوس و بارندگی و تبخیر به ترتیب ۳۸۸ و ۶۴۳ میلی‌متر، مقدار ضریب تبیین برابر ۰/۹۹، ریشه میانگین مربعات خطا معادل ۴/۲۹، میانگین مطلق خطا برابر ۰/۹۹ و تفاوت میانگین معادل ۰/۹۲ محاسبه شد (Azad and Afzali, 2019).

تغییرات اقلیمی منطقه

برای تحلیل تغییرات اقلیمی منطقه طی چهار دهه گذشته، میانگین دما و بارندگی تربت‌حیدریه در دهه‌های ۶۰ شمسی (دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۱۹۹۰) و ۹۰ شمسی (۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰) مقایسه شدند. فرض نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنف بررسی شد و از آزمون تی مستقل برای مقایسه بین گروهی استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین دمای تربت‌حیدریه از ۱۴ درجه سلسیوس در دهه ۶۰ شمسی به ۱۴/۷ درجه سلسیوس در دهه ۹۰ افزایش معنی‌داری داشته است. میانگین بارندگی نیز طی همین بازه زمانی از ۲۴۵ میلی‌متر به ۲۳۵ میلی‌متر کاهش غیر معنی‌داری داشته است (جدول ۴). اگرچه وقوع دوره‌های ترسالی و خشک‌سالی باعث می‌شود مقایسه میانگین دهه‌ها گویای میزان تغییرات نباشد؛ اما به‌طورکلی روند دمای تربت‌حیدریه طی چهار دهه گذشته افزایشی و روند بارش کاهشی بوده است.

مطالعه اثر تغییرات اقلیمی بر متغیرهای بارش، دما و تبخیر و تعرق در دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۹۹ میلادی با استفاده از برونداد ریزگردانی شده دو مدل گردش عمومی NCAR-PCM و GFDL-CM نشان داده است که تربت‌حیدریه تا پایان قرن جاری، ۳/۶+ درجه سلسیوس افزایش دما، ۰/۵- میلی‌متر کاهش بارندگی و به میزان ۹/۳+ درصد افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل، نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰) را تجربه خواهد کرد (Babaeian and Kouhi, 2012). ازاین‌رو ضمن لحاظ کردن تغییرات اقلیمی در محاسبه ضرایب تصحیح *a* و *b*، میزان انتشار تجمعی کربن دی‌اکسید و مقدار ذخایر کربن آلی خاک منطقه در شرایط اقلیمی فعلی و در شرایط وقوع تغییرات اقلیم تا سال ۲۰۹۹، مدل‌سازی و مقایسه شدند.

نتایج نشان داد که افزایش مقدار دما منجر به افزایش ضریب *a* به میزان ۲/۲۰ درصد، نسبت به شرایط عدم‌تغییر اقلیم خواهد شد (جدول ۵). ضریب تصحیح دما با افزایش یا کاهش میانگین سالانه دما منطقه به‌ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد (Farina *et al*., 2013). افزایش ضریب تصحیح *a* بیانگر افزایش سرعت تجزیه مواد آلی خاک است (Barančíková *et al*., 2010) بنابراین منجر به کاهش محتوی کربن آلی خاک می‌شود که شدت این کاهش در مناطق مرطوب بیشتر از نواحی خشک است (Lal, 2013). در نواحی خشک به‌واسطه فراهم نبودن شرایط برای زیست‌توده خاک، سرعت تجزیه ترکیبات کربن‌دار کاهش می‌یابد.

با اعمال میزان کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در نتیجه تغییرات اقلیمی آینده تربت‌حیدریه، مقدار عددی ضریب تصحیح *b* نیز ۰/۲۳ درصد نسبت به شرایط اقلیمی کنونی، کاهش نشان داد. این شاخص بیانگر وضعیت رطوبت خاک است؛ که مقدار آن بین حداقل ۰/۲ و حداکثر ۱ متغیر می‌باشد. ضریب تصحیح *b* برابر با ۱، یعنی هیچ محدودیتی از نظر رطوبت برای تجزیه وجود ندارد و معادل نقطه ظرفیت زراعی است. ظرفیت زراعی مقدار آبی است که پس از خروج آب ثقلی در خاک نگهداری می‌شود و بیانگر حد بالای آب قابل‌استفاده است (Klute, 1986). با خروج آب ثقلی و شروع خشک شدن خاک، مقدار ضریب *b* به‌صورت خطی تا ۰/۲ (b_{min}) و رسیدن به حد پایین آب قابل‌استفاده کاهش می‌یابد.

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های دما و بارندگی سالانه تربت‌حیدریه در دهه‌های ۶۰ و ۹۰ شمسی

Table 4- Comparisons of annual average temperature and precipitation at Torbat-E Heydariyeh in 60s and 90s (p-value=0.05)

	آماره t t	درجه آزادی df	سطح معنی‌داری Sig.	اختلاف میانگین Mean Difference	فاصله اطمینان ۹۵ درصد 95% Confidence Interval of the Difference	
					کران پایین Lower	کران بالا Upper
دما Temperature	-2.632	18	0.017	0.725	-1.303	-0.146
بارندگی Precipitation	0.273	18	0.788	9.565	-64.157	83.28707

جدول ۵- ضرایب تصحیح دما و رطوبت مدل در شرایط اقلیمی کنونی و وقوع تغییرات اقلیمی

Table 5- The rate modifying factors for temperature and moisture under current climate and climate change

	ضریب تصحیح دما Rate modifying factor for temperature (*a*)		ضریب تصحیح رطوبت Rate modifying factor for moisture (*b*)	
	اقلیم کنونی Current climate	تغییرات اقلیمی Climate change	اقلیم کنونی Current climate	تغییرات اقلیمی Climate change
ژانویه Jan	0.198	0.215	1	1
فوریه Feb	0.350	0.375	1	1
مارچ Mar	0.907	0.947	1	1
آپریل Apr	1.921	1.973	0.2	0.2
می May	3.004	3.062	0.2	0.2
ژوئن Jun	3.996	4.056	0.2	0.2
جولای Jul	4.324	4.383	0.2	0.2
آگوست Aug	3.984	4.044	0.2	0.2
سپتامبر Sep	3.151	3.210	0.2	0.2
اکتبر Oct	1.975	2.028	0.2	0.2
نوامبر Nov	0.901	0.941	0.2	0.2
دسامبر Dec	0.351	0.375	0.645	0.629
متوسط Average	2.088	2.134	0.437	0.436

مدل‌سازی پویایی ذخایر کربن آلی خاک تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی

سرعت تجزیه در مدل رتامستد بر اساس ضرایب تجزیه *a* و *b* و *c* مدل، برای هر شرایط اقلیمی تغییر می‌کند (Kaonga and Coleman, 2008; Francaviglia *et al*., 2017). نتایج حاصل از شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی نشان داد که در بین چهار مخزن فعال کربن آلی خاک، مواد گیاهی مقاوم با ۲/۷۲ درصد تغییر در سناریو وقوع تغییرات اقلیمی، بیشترین تغییر مقدار را نشان می‌دهد (جدول ۶). چنان‌که مقدار آن از ۷/۰۸۲ تن بر هکتار در شرایط اقلیمی کنونی، به ۶/۸۹ تن بر هکتار در وضعیت تغییرات اقلیمی کاهش یافت. به‌طورکلی مواد گیاهی مقاوم سهم بیشتری از ذخایر کل کربن آلی خاک را نسبت به مواد گیاهی تجزیه‌پذیر دارند و در مناطقی که مقدار کمی بقایای گیاهی تازه به خاک افزوده می‌شود، سهم مواد گیاهی مقاوم بیشتر می‌شود (Anderson, 2003). در بوم‌نظام نیمه‌خشک مناطق مطالعاتی، از یک‌سو دمای زیاد موجب افزایش سرعت تجزیه و از سوی دیگر کاهش نزولات موجب کاهش ورودی کربن به خاک می‌گردد. اگرچه کاهش سرعت تجزیه ریزجانداران خاکزی را نیز در پی دارد.

مدل‌سازی اثر تغییرات اقلیمی در اراضی زراعی ایتالیا هم کاهش ذخایر کربن آلی را نشان داد (Mondini *et al*., 2012; Francaviglia *et al*., 2013). تحقیقات انجام‌شده در شرایط آزمایشگاهی، بر ثابت‌های سرعت تجزیه مخازن کربن آلی مدل در خاک‌های کوددهی شده، نشان داد که استفاده از ثابت سرعت تجزیه ۰/۴ در سال، برای مخزن مواد گیاهی مقاوم نسبت به ثابت تعریف‌شده در مدل رتامستد (۰/۳ در سال) منجر به همبستگی قوی‌تری (R^2=۰/۹۹۵) بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده می‌شود (Mondini *et al*., 2017). اگرچه مقایسه مقادیر ذخایر کربن آلی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده مدل در اراضی کشاورزی دو منطقه با اقلیم متفاوت استرالیا (کوئینزلند در شمال شرقی و تارلی در جنوب استرالیا) نشان داد که چنانچه ضریب ثابت سرعت تجزیه مواد گیاهی مقاوم از ۰/۳ به ۰/۱۵ در سال کاهش یابد، نتایج همخوان‌تر خواهند شد (Skjemstad *et al*., 2004).

جدول ۶- تغییرات ذخایر کربن آلی خاک در شرایط تغییر اقلیم و عدم وقوع تغییر اقلیم

Table 6- Changes in soil organic carbon stocks under current climate condition and climate change

تغییرات اقلیمی Climate change				اقلیم کنونی Current climate			
HUM	BIO	RPM	DPM	HUM	BIO	RPM	DPM
29.0721	0.9878	6.8894	0.3152	29.3762	1.0132	7.0819	0.3230

یکی دیگر از مخازن کربن آلی خاک مدل، مواد گیاهی تجزیه‌پذیر است. بخشی از مواد گیاهی که به آسانی تجزیه‌شده، به تغییرات محیطی حساس بوده و به‌عنوان منابع سهل‌الوصول و قابل‌دسترس ریزجانداران خاکزی، نرخ گردش نسبتاً سریعی در خاک دارند (Schmidt *et al.*, 2011). به‌طوری‌که این ترکیبات ناپایدار کربن آلی برای ۰/۱۷ سال در خاک باقی می‌مانند (González-Molina *et al.*, 2011). نتایج نشان داد که افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل و کاهش بارندگی در اثر تغییرات اقلیمی، موجب کاهش موجودی بخش مواد گیاهی تجزیه‌پذیر به میزان ۲/۴۱ درصد در مقایسه با مقدار آن در شرایط اقلیمی کنونی می‌گردد (جدول ۶). به‌طورکلی این مواد سهم کمی از میزان کل کربن فعال خاک را دارند و در طی سال‌های موردمطالعه نیز تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای نداشتند. بااین‌وجود مواد گیاهی تجزیه‌پذیر در تغذیه ریزجانداران خاکزی، آزادسازی عناصر غذایی و کمک در پویایی چرخه کربن، اهمیت انکارناپذیری دارند (Lal, 2004).

زیست‌توده میکروبی نیز از دیگر ذخایر فعال کربن در مدل رتامستد است که سرعت بازگشت آن ۱/۶۹ سال ارزیابی شده است (González-Molina *et al.*, 2011). زیست‌توده میکروبی واسطه تجزیه مواد آلی خاک هستند و مقدار کربنی که در طی تنفس میکروبی تجزیه می‌شود به شکل کربن دی‌اکسید از خاک منتشر می‌شود. در مقیاس جهانی سالانه ۶۸ تا ۹۸ پتاگرم کربن از خاک به اتمسفر ساطع می‌شود که این دومین جریان بزرگ کربن بین بوم‌نظام‌ها و هواکره است (Bond-Lamberty and Thomson, 2010). زیست‌توده خاک به‌عنوان شاخصی از پویایی مواد آلی خاک شناخته می‌شوند و به جهت تأثیرپذیری زیادی که از محیط پیرامون خود دارند در برخی موارد، قبل از بروز تغییرات قابل‌تشخیص در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، تغییر در جمعیت میکروبی خاک و یا فعالیت آن‌ها می‌تواند به‌عنوان نشانه‌های اولیه بهبود وضعیت خاک و یا علائم هشداردهنده تخریب زودهنگام خاک باشد (Inubushi *et al.*, 2011). مطالعه اثر افزایش دما بر زیست‌توده میکروبی خاک در جنگل‌های اتریش نشان داد که افزایش دما تا چهار درجه سلسیوس بر ترکیب جامعه میکروبی تأثیری نداشت اما فعالیت متابولیک میکروبی و تجزیه کربن آلی به ازای هر مقدار از زیست‌توده میکروبی، به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد (Schindlbacher *et al.*, 2011). مدل‌سازی تغییرات اقلیمی منطقه موردمطالعه نشان داد که افزایش دما و کاهش بارندگی، موجب کاهش زیست‌توده میکروبی به میزان ۲/۵۱ درصد در مقایسه با مقدار آن در صورت ادامه شرایط اقلیمی کنونی می‌گردد. مطالعات انجام‌شده در بوته‌زارهای اروپا نیز حاکی از آن است که خشکی ایجادشده در شرایط تغییر اقلیم، موجب کاهش جریان کربن از ریشه به سمت خاک، کاهش فراهمی مواد مغذی در فضای ریزوسفری و در نتیجه کاهش زیست‌توده میکروبی خاک می‌گردد (Gorissen *et al.*, 2004).

بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌شده مدل، تأثیر تغییرات اقلیمی بر میزان مواد آلی هوموسی‌شده که یکی دیگر از ذخایر کربن مدل می‌باشد نیز منفی بوده است. به‌طوری‌که مقدار آن در پی اعمال سناریوهای تغییر اقلیم، ۱/۰۴ درصد نسبت به شرایط عدم‌تغییر اقلیم، کاهش یافت. هوموس حاصل آخرین مراحل تجزیه ماده آلی خاک است؛ بنابراین در برابر تجزیه به نسبت مقاوم است (Lefèvre *et al.*, 2017). سرعت بازگشت این مخزن ۴۹/۵ سال است (González-Molina *et al.*, 2011). ازاین‌رو با داشتن کندترین سرعت بازگشت، در شبیه‌سازی کاهش بارندگی و افزایش دما، کمترین درصد کاهش را نسبت به سایر ذخایر فعال کربن آلی مدل نشان داد؛ اما ازآنجاکه هوموس بیشترین سهم را از ذخیره کل کربن آلی خاک دارد (بیش از ۷۰ درصد)، حتی تغییرات کوچک این بخش هم بر محتوی کربن خاک تأثیرگذار است. افزایش ۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس دما به مدت ۱۴ هفته در شرایط آزمایشگاهی، نشانگر افزایش سرعت تنفس هوموس در شرایط افزایش دما بوده است (Niklińska *et al.*, 1999). اگرچه این مقوله بستگی به شرایط اقلیمی منطقه نیز دارد؛ مطالعات انجام‌شده بر روی تأثیر تغییرات اقلیمی بر خاک مناطق وسیعی از سیبری روسیه نشان داد که افزایش دما طی سال‌های ۱۹۱۹ تا ۲۰۱۸ منجر به افزایش ذخیره هوموس خاک اقلیم بسیار سرد این منطقه شده است (Shpedt *et al.*, 2019). بررسی اثر تغییرات اقلیمی آینده (۲۰۲۱ تا ۲۰۶۰) بر ذخایر کربن آلی خاک اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی‌شده به‌وسیله مدل رتامستد در علفزارهای ایرلند نشان داد که با سناریوی افزایش دما و کاهش بارندگی، میزان کل ذخایر کربن آلی کاهش می‌یابد. در این مطالعه همچنین، بین ذخایر اندازه‌گیری شده کربن آلی و مقادیر برآورد شده به‌وسیله مدل در بخش‌های زیست‌توده میکروبی

و مواد آلی هوموسی‌شده همبستگی قوی مشاهده شد؛ اما در بخش‌های مواد گیاهی تجزیه‌پذیر و مواد گیاهی مقاوم همبستگی ضعیف‌تری گزارش شد (Xu *et al.*, 2011).

مخزن ماده آلی پایدار، بخش کوچکی از کل کربن آلی خاک را تشکیل می‌دهد که برای زیست‌توده خاک غیرقابل‌دسترس است؛ ازاین‌رو در مقیاس‌های زمانی معمول مطالعاتی، تجزیه‌ناپذیر به‌شمار می‌آید (Kolosz *et al.*, 2019). متوسط دوره رکود این مخزن ۵۰۰۰۰ سال تعیین شده است؛ بنابراین مقدار آن در بازه زمانی کوتاه تغییری نمی‌کند (González-Molina *et al.*, 2011; Sakurai *et al.*, 2012). این ذخیره کربنی مدل دربرگیرنده بخشی کوچک، پایدار و از نظر زیستی راکد کربن خاک بوده که معادل کربن سیاه مشتق از تجزیه حرارتی هیدروکربن‌ها و زغال چوب در نظر گرفته می‌شود و به میزان بسیار ناچیزی از تغییرات محیطی تأثیر می‌پذیرد (Kolosz *et al.*, 2019). مطالعه اثر تغییرات دما در جنوب شرقی امریکا بر میزان ذخایر کربن نیز نشان داد که بخش غیرفعال کربن آلی در طی شبیه‌سازی تغییری نکرده است و سهم آن در تغییرات ذخیره کل کربن آلی خاک قابل‌چشم‌پوشی است (Luxmoore *et al.*, 2008).

میزان کل کربن آلی خاک در اجرای مدل تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۹۹ میلادی، نسبت به سناریوهای شرایط اقلیمی فعلی، ۱/۳۲ درصد کاهش نشان داد. در طول دو دهه گذشته پژوهشگران متعددی با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر خاک، کاهش کربن آلی خاک نسبت به سطوح تاریخی خود در ۵۰ یا ۶۰ سال قبل را گزارش کرده‌اند (Baveye *et al.*, 2020). دراین‌بین مطالعات انجام‌شده با استفاده از مدل رتامستد نیز افزایش دمای محیط در شرایط تغییر اقلیم را باعث افزایش سرعت تجزیه مواد آلی در محیط خاک و در نتیجه افزایش تلفات کربن آلی از خاک و کاهش میزان ترسیب کربن و افزایش انتشار کربن دی‌اکسید عنوان کرده‌اند (Barančíková *et al.*, 2010; Mondini *et al.*, 2012; Francaviglia *et al.*, 2013; Muñoz-Rojas *et al.*, 2017). البته افزایش دما باعث افزایش تولید خالص اولیه[1] (NPP) بوم‌نظام که نشان‌دهنده میزان کربن تثبیت‌شده طی فرآیند فتوسنتز در اندام‌های هوایی و زیرزمینی گیاه است؛ نیز می‌گردد (Bolinder *et al.*, 2007). به‌طورکلی، با افزایش دما، سرعت تجزیه کربن آلی خاک افزایش می‌یابد؛ که این سرعت در دماهای پایین بیشتر بوده و با بالا رفتن دما، نرخ سرعت تجزیه کاهش می‌یابد. به این دلیل که در دماهای پایین حساسیت دمایی ترکیبات آلی به‌مراتب بیشتر از حساسیت دمایی تولید خالص اولیه است؛ درحالی‌که در دماهای بالا حساسیت دمایی این دو تقریباً مشابه یکدیگر می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که در اقلیم‌هایی با میانگین دمای سالانه پنج درجه سلسیوس، افزایش تنها یک درجه سلسیوس دما، منجر به از دست دادن بیش از ۱۰ درصد از ذخیره کربن آلی خاک منطقه می‌گردد؛ درحالی‌که همین مقدار افزایش دما در اقلیمی با میانگین دمای ۳۰ درجه، نهایتاً منجر به از دست رفتن سه درصد کربن آلی خاک می‌گردد (Kirschbaum, 1995). محدوده تغییرات کربن آلی در شرایطی که فقط دما تغییر یابد، به‌مراتب کمتر از شرایطی است که هر سه مؤلفه دما، بارندگی و تبخیر دچار تغییر شوند (Wan *et al.*, 2011). مدل‌سازی تغییرات اقلیمی اروپا تا سال ۲۰۸۰ نشان داد که میانگین ذخیره کل کربن آلی مراتع نسبت به سال ۱۹۹۰، به میزان شش درصد کاهش می‌یابد؛ اگرچه افزایش تولید خالص اولیه در نتیجه افزایش دما تا حدودی می‌تواند این کاهش کربن را جبران کند (Smith *et al.*, 2005).

به‌طورکلی با گذشت زمان به‌دلیل تجزیه بخش‌های فعال و سریع تجزیه ماده آلی همچون قندهای ساده و اسیدهای آمینه و کاهش جمعیت هتروتروف خاکزی در نتیجه کم شدن منابع غذایی، سرعت تجزیه کاهش می‌یابد؛ بنابراین نسبت ترکیبات کمپلکس هوموس که مقاومت بالایی در برابر تجزیه نشان می‌دهند، افزایش می‌یابد؛ درنتیجه ماده آلی خاک به تجزیه مقاوم‌تر می‌شود. بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر ذخایر کربن آلی خاک در هشت علفزار اروپا نیز کاهش ذخایر کربن آلی با گذشت زمان را نشان داد (Xu *et al.*, 2011).

مدل‌سازی انتشار کربن دی‌اکسید تحت سناریوهای تغییرات اقلیمی

افزایش دما با افزایش حساسیت دمایی ذاتی ساختار مولکولی ماده آلی و افزایش تنفس میکروبی موجب افزایش سرعت تجزیه ماده آلی شده که خود منجر به بازخورد مثبت بین تغییر اقلیم و چرخه کربن خواهد شد و با آزادسازی کربن به اتمسفر گرمایش زیست‌کره را تشدید می‌کند (Sakurai *et al.*, 2012). درعین‌حال باعث افزایش تولید خالص اولیه بوم‌نظام شده و میزان کربن آلی برگشتی به خاک از طریق بقایا را افزایش می‌دهد. کاهش بارندگی نیز از سازوکارهای متفاوتی بر این امر اثر می‌گذارد. از یک‌سو با کاهش بارندگی، فعالیت ریزجانداران و تجزیه زیستی کربن کاهش‌یافته، میزان کربن دی‌اکسید خروجی از خاک کم می‌گردد؛ اما از سوی دیگر کاهش بارندگی موجب کاهش درصد پوشش گیاهی و پیرو آن به دام انداختن کربن دی‌اکسید طی فرایند فتوسنتز و انتقال آن به خاک می‌گردد. نتایج نشان داد که در اثر افزایش دما و تبخیر و تعرق و کاهش بارندگی تا پایان قرن جاری، میزان انتشار تجمعی کربن دی‌اکسید از خاک در شرایط وقوع تغییرات اقلیمی، ۱/۲۶ درصد نسبت به شرایط اقلیمی فعلی، افزایش خواهد یافت. اگرچه مقدار انتشار کربن دی‌اکسید، بسته به میزان تغییرات اقلیمی، محتوی اولیه کربن آلی خاک و نحوه مدیریت اراضی

1- Net Primary Production

زراعی اعم از میزان استفاده از کودهای حیوانی، برگشت بقایا و شخم زمین متفاوت خواهد بود. بررسی اثر تغییرات اقلیمی در استرالیا نیز، روند صعودی انتشار کربن دی‌اکسید از خاک را نشان داد (Martins *et al.*, 2016). به‌کارگیری مدل رتامستد در مطالعه اثر تغییرات اقلیمی بر روی ذخایر کربن آلی خاک و انتشار کربن دی‌اکسید در روسیه و اکراین (Smith *et al.*, 2007) علفزارهای ایرلند (Xu *et al.*, 2011) و استان فوجا ایتالیا (Francaviglia *et al.*, 2012; Bleuler *et al.*, 2017; Farina *et al.*, 2017) نشان داد که با افزایش دما، سرعت تجزیه و به دنبال آن میزان معدنی شدن ماده آلی افزایش‌یافته؛ در نتیجه هدرروی کربن به‌صورت انتشار کربن دی‌اکسید از خاک گسترش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

نتایج اعتبارسنجی مدل رتامستد در بوم‌نظام زراعی اقلیم سرد و نیمه‌خشک خراسان رضوی، بیانگر قابلیت این مدل در شبیه‌سازی صحیح الگوی تغییرات ذخایر کم کربن آلی خاک منطقه است؛ بنابراین مدل رتامستد برای پیش‌بینی تغییرات ذخایر کربن آلی خاک بوم‌نظام زراعی موردمطالعه، تحت تأثیر تغییرات مدیریتی و اقلیمی مناسب و قابل‌اعتماد است. این امر در انتخاب روش‌های مدیریتی برتر در اراضی زراعی که تلاش برای دستیابی به بیشترین عملکرد محصول به‌طورمعمول با استفاده فرسایشی از این اراضی همراه است؛ اهمیت بیشتری می‌یابد. نتایج همچنین نشانگر کاهش بارندگی و افزایش معنی‌دار دمای منطقه طی ۴۰ سال گذشته (دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰) است؛ که مدل‌سازی تغییرات اقلیمی آینده نیز مبین ادامه روند کنونی می‌باشد. بررسی تأثیر توأمان افزایش دما و تبخیر و تعرق پتانسیل و کاهش بارندگی بر میزان انتشار کربن دی‌اکسید و تغییرات ذخایر کربن آلی خاک در بوم‌نظام زراعی جلگه‌رخ، نشانگر کاهش ذخایر کربن آلی خاک به میزان ۱/۳۲ درصد و افزایش انتشار تجمعی کربن دی‌اکسید از خاک به میزان ۱/۲۶ درصد، نسبت به شرایط اقلیمی کنونی است؛ اما افزایش یا کاهش کربن آلی در پاسخ به تغییرات اقلیمی کماکان یک سؤال جهانی است. دما و بارندگی هریک به‌نوبه خود اثرات متفاوت و بعضاً متناقضی بر افزایش یا کاهش ذخایر کربن آلی خاک می‌گذارند. همچنین روش‌های مدیریت خاک به‌ویژه در اراضی زراعی، ممکن است اثراتی به‌مراتب چشمگیرتر از تغییرات اقلیمی بر میزان ترسیب یا تجزیه کربن آلی خاک و به‌تبع آن میزان انتشار کربن دی‌اکسید از خاک داشته باشند؛ بنابراین پیشنهاد می‌گردد با اعتبارسنجی مدل رتامستد در بوم‌نظام‌های مختلف کشور و حصول اطمینان از درستی پیش‌بینی‌های ارائه‌شده توسط مدل، تأثیر تغییرات اقلیمی و روش‌های مدیریتی مختلف بر ذخایر کربن آلی خاک مناطق بررسی گردد؛ تا بدین‌وسیله تدابیری برای حفظ و ترسیب ذخایر اندک کربن آلی خاک‌های کشور اتخاذ گردد.

منابع

1. Alvaro-Fuentes, J., Lopez, M.V., Arrue, J.L., Moret, D., & Paustian, K. (2009). Tillage and cropping effects on soil organic carbon in Mediterranean semiarid agroecosystems: testing the Century model. *Agriculture, Ecosystems and Environment 134*(3-4): 211-217. https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.001.
2. Anderson, T.H. (2003). Microbial eco-physiological indicators to asses soil quality. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 98: 285-293. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00088-4.
3. Azad, B., & Afzali, S.F. (2019). Evaluation of two soil carbon models performance using measured data in semi-arid rangelands of Bajgah, Fars province. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50: 819-835. (In Persian with English abstract). 10.22059/ijswr.2018.264873.668001.
4. Babaeian, I., & Kouhi, M. (2012). Agroclimatic indices assessment over some selected weather stations of Khorasan Razavi province under climate change scenarios. *Journal of Water and Soil* 26: 953-967. (In Persian with English abstract).
5. Barančíková, G., Halas, J., Guttekova, M., Makovnikova, J., Novakova, M., Skalský, R., & Tarasovičová, Z. (2010). Application of RothC model to predict soil organic carbon stock on agricultural soils of Slovakia. *Soil and Water Research* 5: 1-9.
6. 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/j.1365-2389.1996.tb01386.x.
7. Baveye, P.C., Schnee, L.S., Boivin, P., Laba, M., & Radulovich, R. (2020). Soil organic matter research and climate change: merely re-storing carbon versus restoring soil functions. *Frontiers in Environmental Science* 8: 579904. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.579904.
8. Bleuler, M., Farina, R., Francaviglia, R., di Bene, C., Napoli, R., & Marchetti, A. (2017). Modelling the impacts of different carbon sources on the soil organic carbon stock and CO_2 emissions in the Foggia province (Southern Italy). *Agricultural Systems* 157: 258-268. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.017.

9. Bolinder, M., Janzen, H., Gregorich, E., Angers, D., & VandenBygaart, A. (2007). An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 29-42. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013.

10. Bond-Lamberty, B., & Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 464: 579-582. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.013.

11. Chicco, D., Warrens, M.J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science* 7: e623. https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623.

12. Borrelli, L., Colecchia,S., Troccoli, A., Caradonna, S., Papini, R., Ventrella, D., Dell Abate, M, T., & Farina, R. (2011). Effectiveness of the GAEC standard of cross compliance crop rotations in maintaining organic matter levels in soil. *Italian Journal of Agronomy* 6: 57-62. https://doi.org/10.4081/IJA.2011.6.S1.E8.

13. Coleman, K., & Jenkinson, D. (1996). RothC-26.3-A Model for the turnover of carbon in soil. In "Evaluation of soil organic matter models", pp. 237-246. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17.

14. Coleman, K., & Jenkinson, D. (2014). *RothC-A Model for the Turnover of Carbon in Soil-Model description and users guide*. Rothamsted Research, Harpenden, UK.

15. Coleman, K., Jenkinson, D., Crocker, G., Grace, P., Klir, J., Körschens, M., Poulton, P., & Richter, D. (1997). Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma* 81: 29-44. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00079-7.

16. Davidson, E.A., & Janssens, I.A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440: 165-173. http://doi.org/10.1038/nature04514.

17. Diele, F., Marangi, C., & Martiradonna, A. (2021). Non-standard discrete RothC Models for doil carbon dynamics. *Axioms* 10: 56. https://doi.org/10.3390/axioms10020056.

18. Dondini, M., Hastings, A., Saiz, G., Jones, M.B., & Smith, P. (2009). The potential of Miscanthus to sequester carbon in soils: comparing field measurements in Carlow, Ireland to model predictions. *Gcb Bioenergy* 1: 413-425. https://doi.org/10.1111/j.1757-1707. 2010.01033.x.

19. Doner, H.E., & Lynn, W.C. (1989). *Carbonate, halide, sulfate and sulfide minerals*. P 279-330. In: Dixon, J. B and Weed, S. B (ed.) Minerals in environments. Second ed. Soil Science Society of Am. Madison, Wis. USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser1.2ed.c6.

20. Eswaran, H. (2000). Global carbon stock. Global climate change and pedogenic carbonates, 15-25.

21. Fallahi, J., Rezvani, M.P., Nassiri, M.M., & Behdani, M. (2013). Validation of RothC model for evaluation of carbon sequestration in a restorated ecosystem under two different climatic scenarios. *Journal of Water and Soil* 3: 656-668. (In Persian with English abstract)

22. Falloon, P., Smith, P., Coleman, K., & Marshall, S. (1998). Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 30: 1207-1211. http://doi.10.1016/S0038-0717(97)00256-3.

23. Farina, R., Coleman, K., & Whitmore, A.P. (2013). Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. *Geoderma* 200: 18-30. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.021.

24. Farina, R., Marchetti, A., Francaviglia, R., Napoli, R., & Di Bene, C. (2017). Modeling regional soil C stocks and CO_2 emissions under Mediterranean cropping systems and soil types. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 238: 128-141. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.015.

25. Francaviglia, R., Baffi, C., Nassisi, A.L., Cassinari, C., & Farina, R. (2013).Use of the RothC model to simulate soil organic dynamic on a silty loam Inceptisol in northern Italy under different fertilization practices. *Environmental Quality* 11: 17-28. https://dx.doi.org/10.6092/issn.2281-4485/4085.

26. Francaviglia, R., Coleman, K., Whitmore, A.P., Doro, L., Urracci, G., Rubino, M., & Ledda, L. (2012). Changes in soil organic carbon and climate change–Application of the RothC model in agro-silvo-pastoral Mediterranean systems. *Agricultural Systems* 112: 48-54. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.07.001.

27. Francaviglia, R., Renzi, G., Ledda, L., & Benedetti, A. (2017). Organic carbon pools and soil biological fertility are affected by land use intensity in Mediterranean ecosystems of Sardinia, Italy. *Science of the Total Environment* 599: 789-796. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.021.

28. González-Molina, L., Etchevers-Barra, J., Paz-Pellat, F., Diaz-Solis, H., Fuentes-Ponce, M., Covaleda-Ocon, S., & Pando-Moreno, M. (2011). Performance of the RothC-26.3 model in short-term experiments in Mexican sites and systems. *Agricultural Science* 149: 415-425. https://doi.org/10.1017/S0021859611000232.
29. Gorissen, A., Tietema, A., Joosten, N.N., Estiarte, M., Penuelas, J., Sowerby, A., Emmett, B.A., & Beier, C. (2004). Climate change affects carbon allocation to the soil in shrublands. *Ecosystems* 7: 650-661. https://doi.org/10.1007/s10021-004-0218-4.
30. Guo, Y., Wang, X., Li, X., Wang, J., Xu, M., & Li, D. (2016). Dynamics of soil organic and inorganic carbon in the cropland of upper Yellow River Delta, China. *Scientific Reports* 6: 1-10. https://doi.org/10.1038/srep36105.
31. Inubushi, K., Cheng, W., Mizuno, T., Lou, Y., Hasegawa, T., Sakai, H., & Kobayashi, K. (2011). Microbial biomass carbon and methane oxidation influenced by rice cultivars and elevated CO_2 in a Japanese paddy soil. *European Journal of Soil Science* 62: 69-73. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01323.x.
32. IPCC. (2021). "Climate Change Impacts, the Physical Science Basis".
33. Jenkinson, D.S., Harris, H.C., Ryan, J., McNeill, A.M., Pilbeam, C.J., & Colman, K. (1999). Organic matter turnover in a calcareous clay soil from Syria under a two-course cereal rotation. *Soil Biology and Biochemistry 31*(5): 687-693. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(98)00157-6.
34. Jordon, M.W., & Smith, P. (2022). Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe. *Soil and Tillage Research* 222: 105428. https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105428.
35. Kaczynski, R., Siebielec, G., Hanegraaf, M.C., & Korevaar, H. (2017). Modelling soil carbon trends for agriculture development scenarios. *Geoderma* 286: 104-115. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.026.
36. Kaonga, M., & Coleman, K. (2008). Modelling soil organic carbon turnover in improved fallows in eastern Zambia using the RothC-26.3 model. *Forest Ecology and Management* 256: 1160-1166. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.017.
37. Kirschbaum, M.U. (1995). The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27: 753-760. https://doi.org/10.1016/0038-0717(94)00242-S.
38. Klute, A. (1986). *Water retention: laboratory methods*. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods 632-662. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c26.
39. Kolosz, B.W., Sohi, S.P., & Manning, D. (2019). CASPER: A modelling framework to link mineral carbonation with the turnover of organic matter in soil. *Computers and Geosciences* 124: 58-72. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.12.012.
40. Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304: 1623-1627. https://doi.org/10.1126/science.1097396.
41. Lal, R. (2013). Soil carbon management and climate change. *Carbon Management* 4: 439-462. https://doi.org/10.4155/cmt.13.31.
42. Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *"Soil organic carbon: the hidden potential,"* Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
43. Leifeld, J., Reiser, R., & Oberholzer, H. (2009). Consequences of conventional versus organic farming on soil carbon: results from a 27 - year field experiment. *Agronomy* 101: 1204-1218. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0002.
44. Lopez-Bellido, R.J., Fontan, J.M., Lopez-Bellido, F.J., & Lopez- Bellido, L. (2010). Carbon sequestration by tillage, rotation and nitrogen fertilization in a Mediterranean Vertisol. *Agronomy 102*(1): 310-318. https://doi.org/10.2134/agronj2009.0165.
45. Luxmoore, R.J., Tharp, M.L., & Post, W.M. (2008). Simulated biomass and soil carbon of loblolly pine and cottonwood plantations across a thermal gradient in southeastern United States. *Forest Ecology and Management* 254: 291-299. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.08.008.
46. Martins, C.S., Macdonald, C.A., Anderson, I.C., & Singh, B.K. (2016). Feedback responses of soil greenhouse gas emissions to climate change are modulated by soil characteristics in dry land ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry* 100: 21-32. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.05.007.
47. Mansouri, M. (2000). *Reconnaissance survey and land classification of Jolge rokh, Torbat-e Heydariyeh*. Technical

report No 1089 (In Persian).

48. Mondini, C., Cayuela, M.L., Sinicco, T., Fornasier, F., Galvez, A., & Sánchez-Monedero, M.A. (2017). Modification of the RothC model to simulate soil C mineralization of exogenous organic matter. *Biogeosciences* 14: 3274-3253. https://doi.org/10.5194/bg-14-3253-2017.
49. Mondini, C., Coleman, K., & Whitmore, A. (2012). Spatially explicit modelling of changes in soil organic C in agricultural soils in Italy, 2001–2100: Potential for compost amendment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 153: 24-32. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.02.020.
50. Muñoz-Rojas, M., Abd-Elmabod, S.K., Zavala, L.M., De la Rosa, D., & Jordán, A. (2017). Climate change impacts on soil organic carbon stocks of Mediterranean agricultural areas: a case study in Northern Egypt. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 238: 142-158. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.09.001.
51. Navarro-Pedreño, J., Almendro-Candel, M.B., & Zorpas, A.A. (2021). The increase of soil organic matter reduces global warming, myth or reality? *Science* 3: 18. https://doi.org/10.3390/sci3010018.
52. Niklińska, M., Maryański, M., & Laskowski, R. (1999). Effect of temperature on humus respiration rate and nitrogen mineralization: Implications for global climate change. *Biogeochemistry* 44: 239-257. https://doi.org/10.1007/BF00996992.
53. Paul, K., Polglase, P., & Richards, G. (2003). Predicted change in soil carbon following afforestation or reforestation, and analysis of controlling factors by linking a C accounting model (CAMFor) to models of forest growth, litter decomposition and soil C turnover (RothC). *Forest Ecology and Management* 177: 485-501. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00454-1.
54. Paustian, K., Parton, W.J., & Persson, J. (1992). Modeling soil organic matter in organic‐amended and nitrogen‐fertilized long‐term plots. *Soil Science Society of America Journal* 56: 476-488. https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600020023x.
55. Sakurai, G., Jomura, M., Yonemura, S., Iizumi, T., Shirato, Y., & Yokozawa, M. (2012). Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field data. *Soil Biology and Biochemistry* 46: 191-199. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.005.
56. Schimel, D.S., House, J.I., Hibbard, K.A., Bousquet, P., Ciais, P., Peylin, P., Braswell, B.H., Apps, M.J., Baker, D., & Bondeau, A. (2001). Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* 414: 169-172. http://doi.org/10.1016/35102500.
57. Schindlbacher, A., Rodler, A., Kuffner, M., Kitzler, B., Sessitsch, A., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2011). Experimental warming effects on the microbial community of a temperate mountain forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 43: 1417-1425. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.03.005.
58. Schmidt, M.W., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., & Manning, D.A. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478: 49-56. https://doi.org/10.1038/nature10386.
59. Shirato, Y., & Yokozawa, M. (2006). Acid hydrolysis to partition plant material into decomposable and resistant fractions for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry* 38: 812-816. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.07.008.
60. Shpedt, A., Ligaeva, N., & Emelyanov, D. (2019). *Transformation of soil and land resources of the Middle Siberia in the conditions of climatic changes*. In "IOP Conference Series: Earth and Environmental Science", Vol. 315, pp. 052051. IOP Publishing. doi:10.1088/1755-1315/315/5/052051.
61. Skjemstad, J., Spouncer, L., Cowie, B., & Swift, R. (2004). Calibration of the Rothamsted organic carbon turnover model (RothC ver. 26.3), using measurable soil organic carbon pools. *Soil Research* 42: 79-88. https://doi.org/10.1071/SR03013.
62. Smith, J., & Smith, P. (2007). "*Environmental modelling: an introduction,"* Oxford University Press.
63. Smith, J., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R.J., Montanarella, L., Rounsevell, M.D., Reginster, I., & Ewert, F. (2005). Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990–2080. *Global Change Biology* 11: 2141-2152. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x.
64. Smith, P., Fang, C., Dawson, J.J., & Moncrieff, J.B. (2008). Impact of global warming on soil organic carbon. *Advances in Agronomy* 97: 1-43. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00001-6.

65. Smith, P., Powlson, D., & Glendining, M. (1996). Establishing a European GCTE soil organic matter network (SOMNET). pp. 81-97. *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_7.

66. Smith, P., Smith, J., Franko, U., Kuka, K., Romanenkov, V., Shevtova, L., Wattenbach, M., Gottschalk, P., Sirotenko, O., & Rukhovich, D. (2007). Changes in mineral soil organic carbon stocks in the croplands of European Russia and the Ukraine, 1990–2070; comparison of three models and implications for climate mitigation. *Regional Environmental Change* 7: 105-119. https://doi.org/10.1007/s10113-007-0028-2.

67. Soil Survey Manual. (2014). *Kellogg soil survey laboratory methods manual.* Soil survey investigations report No 51, version 2 R Burt and soil survay staff (ed), U. S. Department of Agriculture Natural Resources conservation Service.

68. Soleimani, A., Hosseini, S.M., Bavani, A.R.M., Jafari, M., & Francaviglia, R. (2017). Simulating soil organic carbon stock as affected by land cover change and climate change, Hyrcanian forests. *Science of the Total Environment* 599: 1646-1657. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.077.

69. Stockmann, U., Adams, M.A., Crawford, J.W., Field, D.J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., Minasny, B., McBratney, A. B., De Courcelles, V.D.R., & Singh, K. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 80-99. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001.

70. Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-94. https://doi.org/10.2307/210739.

71. Vaghefi, S.A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports* 9: 1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-018-38071-8.

72. Wan, Y., Lin, E., Xiong, W., & Guo, L. (2011). Modeling the impact of climate change on soil organic carbon stock in upland soils in the 21st century in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 141: 23-31. https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.004.

73. Weihermüller, L., Graf, A., & Verecken, H. (2013). Simple pedotransfer functions to initialize reactive carbon pools of the RothC model. *European Journal of Soil Science* 64: 567-575. https://doi.org/10.1111/ejss.12036.

74. Xu, X., Liu, W., & Kiely, G. (2011). Modeling the change in soil organic carbon of grassland in response to climate change: Effects of measured versus modelled carbon pools for initializing the Rothamsted Carbon model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140: 372-381. https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.018.

75. Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M., Smith, P., & Fuhrer, J. (2007). Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science* 58: 658-667. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x.

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 5, Dec.-Jan., 2022, p. 629-644

Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years

S. Dowlatabadi[1], M. Amirabadizadeh[2*], M. Zarei[3]

Received: 04-09-2022
Revised: 22-09-2022
Accepted: 19-10-2022
Available Online: 15-01-2023

How to cite this article:
Dowlatabadi, S., Amirabadizadeh, M., & Zarei, M. (2022). Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years. *Journal of Water and Soil 36*(5): 629-644. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.78598.1199

Introduction

The sustainable availability of water resources and the qualitative and quantitative status of these resources are threatened by many natural and antropogenic factors, among which climate change plays an important role. Climate change can have profound effects on the hydrological cycle through changes in the amount and intensity of precipitation, evapotranspiration, soil moisture, and increasing temperature. On the other hand, the distribution of rainfall in different parts of the world will be uneven. So that some parts of the world may face a significant decrease in the amount and intensity of precipitation, as well as major changes in the timing of wet and dry seasons. Therefore, sufficient knowledge about the effects of climate change on hydrological processes and water resources will be of particular importance. In this research, as the first comprehensive study, the effect of future climate change on the water resources components of Neyshabur-Rookh watershed was investigated by a set of one hydrological model and six General Circulation Models under the RCP4.5 scenario.

Materials and Methods

The Neyshabur-Rookh watershed with an area of 9449 square kilometers is a sub-basin of Kavir-e Markazi-e Iran and a part of the Kalshoor Neyshabur watershed, which is located between of 58 degrees and 13 minutes and 59 degrees and 30 minutes and east longitude and 35 degrees and 40 minutes and 36 degrees and 39 minutes north latitude. The study area with an average altitude of 1549.6 m above sea level and average annual precipitation of 246.83 mm, a mean annual temperature of 13.3 Celsius has an arid to semi-arid climate. For hydrological simulation of the watershed using WetSpass-M model, maps of Digital Elevation Model (DEM), land-use, soil texture, slope, and distribution map of groundwater depth, Leaf Area Index (LAI), and climate data (rainfall, mean temperature, potential evapotranspiration, wind speed and the number of rainy days) per month in 1991-2017 period were used. Then the prepared model was calibrated and validated. The climatic data of six General Circulation Models (GCMs) under the RCP4.5 scenario (Representative Concentration Pathways) were downscaled using the Quantile Mapping Bias-Corrected method. The downscaled GCM models were ranked and weighted in each station according to results of the Leave one out cross validation method and utilized as an ensemble for projecting the near-future climatic conditions of the water resources components of the watershed. By importing the monthly maps of precipitation, average temperature and evapotranspiration in the period of 2026-2052 into the calibrated hydrological model, the hydrological response of watershed to near future climate change was determined and evaluated.

1- Ph.D. Candidate in Water Science and Engineering, Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran & Member of Drought and Climate Change Research Group
(*- Corresponding Author Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)
3- Assistant Professor, Research Center of Geographical Sciences & Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

Results and Discussion

WetSpass-M was calibrated by changing the calibration parameters in five hydrometric stations and the compared measured and simulated streamflow. The values of four evaluation criteria NS, R2, MB, and RMSE indicated the good performance of the model during the calibration and validation process. By predicting climatic parameters in near future and preparing and importing maps of monthly precipitation, mean temperature, and evapotranspiration to WetSpass-M, the hydrologic simulation of the watershed was done in the 2026-2052 period. The results indicated that the mean annual temperature and precipitation would be respectively increased by 4.66% and 1.21°C under RCP4.5 in the near-future period compared to the baseline period. The average temperature will increase in all months so that the most changes will occur in September and the least changes will occur in March. The rainfall of the watershed will increase in March, April, May, October, and December and will decrease in the rest of the months. The highest and lowest rainfall changes will happen in April and August, respectively. The analysis of the components of water resources in the near future shows that annual total runoff, groundwater recharge, and actual evapotranspiration will increase by 5.9%, 14.85%, and 1.42% compared to the base period, and annual direct runoff and interception will decrease by 15.15% and 3.54%, respectively.

Conclusion

Considering the importance and major role of the Neyshabur watershed in the economy of agricultural products of Razavi Khorasan province, the results of this research will be of great help to the managers and policymakers of the country's water resources management in order to make appropriate decisions with the aim of reducing the effects of climate change on the water resources of the Neyshabur-Rookh Basin.

Keywords: Climate change, Neyshabur, Recharge groundwater, Runoff, WetSpass-M model

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۵، آذر-دی ۱۴۰۱، ص. ۶۴۴-۶۲۹

ارزیابی مدل WetSpass-M در برآورد پاسخ هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ به تغییراقلیم سال‌های آتی

سپیده دولت آبادی[۱]- مهدی امیرآبادی زاده[۲*]- مهدی زارعی[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر، آشکار شدن اثرات تغییراقلیم بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب سبب شده مشکلات ناشی از آن به یکی از بحران‌های اساسی مدیریت منابع آب کشور تبدیل شود. بنابراین کسب دانش کافی در خصوص اثرات تغییراقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی ضرورت دارد. این تحقیق، به مطالعه اثرات تغییراقلیم بر مؤلفه‌های منابع آب حوضه نیشابور- رخ می‌پردازد. در این راستا، شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱ با استفاده از مدل WetSpass-M انجام شد. در گام بعد، پارامترهای اقلیمی شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 در دوره پایه توسط روش اصلاح اریبی چارک‌ها ریزمقیاس و با روش اعتبارسنجی متقابل leave one out واسنجی و اعتبارسنجی گردید. با انجام رتبه‌بندی و وزن‌دهی شش مدل اقلیمی انتخاب شده و جهت ارزیابی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه به تغییراقلیم بازه زمانی ۲۰۵۲-۲۰۲۶، خروجی‌های شش مدل گزارش پنجم گردش کلی تحت سناریو انتشار RCP4.5 و ریزمقیاس شده توسط روش اصلاح اریبی چارک‌ها به صورت گروهی به مدل WetSpass-M وارد و پیش‌نگری در آینده نزدیک انجام گرفت. نتایج نشان داد بارش و متوسط دمای سالانه حوضه در آینده نزدیک به ترتیب ۴/۶۶ درصد و ۱/۲۱ درجه سانتیگراد افزایش می‌یابد. تحلیل مؤلفه‌های منابع آب در آینده نزدیک نشان می‌دهد رواناب کل، تغذیه آب زیرزمینی، تبخیرتعرق واقعی سالانه به ترتیب ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصد نسبت به دوره پایه افزایش و رواناب مستقیم و برگاب سالانه به ترتیب ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهند داشت. با توجه به اهمیت و نقش عمده حوضه نیشابور در اقتصاد محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی، نتایج پژوهش حاضر کمک شایان توجهی به مدیران و سیاست‌گذاران مدیریت منابع آب کشور در جهت اتخاذ تصمیمات مناسب با هدف تقلیل اثرات تغییراقلیم بر منابع آب حوضه نیشابور-رخ خواهد نمود.

واژه‌های کلیدی: تغذیه آب زیرزمینی، تغییراقلیم، رواناب، مدل WetSpass-M، نیشابور

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب،گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب و عضو گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)
۳- استادیار مرکز پژوهشی علوم جغرافیایی و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.78598.1199

مقدمه

قرارگیری کشور ایران در محدوده مناطق کم‌آب به معنای واقعی کلمه، گسترش و توسعه روزافزون فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و مصارف شهری با وجود کمبودها و محدودیت‌های کمی و کیفی منابع موجود، فشارهای مضاعفی را بر منابع آب کشور تحمیل نموده است. از طرف دیگر، دسترسی پایدار به منابع آب و وضعیت کیفی و کمی منابع مذکور توسط عوامل طبیعی و انسانی زیادی تهدید می‌شود که در بین فاکتورهای طبیعی، تغییراقلیم نقش مهمی دارد. شواهد علمی نشان می‌دهد که ما در یک دوره تغییراقلیم قرار داریم که موجب افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌شود. ادامه این پدیده ممکن است به طور قابل توجهی ویژگی‌های اقلیمی جهانی و محلی از جمله دما و بارش را تغییر دهد (Kahsay *et al.*, 2018). لذا مشهود است که تغییر آب و هوای زمین بر روی بخش‌های مختلف از جمله منابع آب در همه مناطق جهان تاثیر می‌گذارد. تغییراقلیم از طریق تغییر در مقدار و شدت بارش، تبخیرتعرق، رطوبت خاک و افزایش دما می‌تواند اثرات عمیقی بر چرخه هیدرولوژی داشته باشد. از طرفی توزیع بارندگی در نقاط مختلف جهان بصورت غیریکنواخت خواهد بود. به‌طوری‌که برخی از نقاط جهان ممکن است با کاهش قابل توجهی در میزان و شدت بارش و همچنین تغییرات عمده در زمان‌بندی فصول مرطوب و خشک مواجه شوند. بنابراین دانش کافی در خصوص اثرات تغییراقلیم بر فرآیندهای هیدرولوژیکی و منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود (Kahsay *et al.*, 2018). مطالعات انجام شده قبلی نشان می‌دهد که افزایش دو درجه سانتیگراد در مقدار دما باعث کاهش ۱۲٪-۵ در میزان دبی رودخانه می‌گردد (Zhang *et al.*, 2009). هیئت بین الدول تغییراقلیم[1] اظهار می‌دارد که میزان رواناب در مناطق خشک نسبت به مناطق مرطوب به تغییراقلیم حساس‌تر می‌باشد. زیرا میزان تغییر الگوی بارندگی در این مناطق نسبت به مناطق مرطوب بیشتر خواهد بود. مطالعات بر روی آبخوان‌های مختلف نیز شواهد فراوانی مبنی بر آسیب‌پذیری آب‌های زیرزمینی در برابر تغییراقلیم ارائه داده‌اند که عواقب گسترده اجتماعی و اقتصادی را در پی خواهند داشت (Shrestha *et al.*, 2016). در این راستا، سازگاری با تغییراقلیم ضروری است که این امر نیاز به فهم دقیق پیش‌بینی‌های محلی تغییراقلیم و تاثیرات آن‌ها بر منابع آب دارد (Dakhlaoui *et al.*, 2017). علی‌رغم وجود برخی عدم قطعیت‌ها، مدل‌های گردش کلی[2] تقریب خوبی را از آب و هوای گذشته و حال ارائه می‌دهند که هنوز برای تخمین شرایط آب و هوایی آینده مفید بوده، لذا برای پیش‌بینی و ارزیابی متغیرهای اقلیمی، تغییرپذیری و آسیب‌پذیری آینده، از این مدل‌ها استفاده می‌شود (Shrestha *et al.*, 2016).

با ایجاد مدل هیدرولوژیکی ایران در مدل SWAT و استفاده از مدل CGCM3.1 برای سناریوهای A1B، B1 و A2، تأثیر اقلیم آینده بر منابع آب کشور در بازه‌های زمانی ۲۰۴۰-۲۰۱۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ توسط عباسپور و همکاران (Abbaspour *et al.*, 2009) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که به طور کلی برای سناریوهای آینده، مناطق مرطوب کشور نسبت به مناطق خشک بارش بیشتری را دریافت خواهند کرد. تحلیل شدت‌های بارش روزانه، سیلاب‌های مکرر با شدت بیشتر را در مناطق مرطوب و خشکسالی‌های طولانی‌مدت را در مناطق خشک نشان داد. سناریوهای اقلیمی در سطح زیرحوضه نتایج کاملاً متفاوتی را در مناطق خشک ارائه دادند، اگرچه نتایج در مناطق مرطوب کم‌وبیش مشابه بودند.

هاشمی و همکاران (Hashemi *et al.*, 2015) با بکارگیری روش مدل‌سازی یکپارچه به بررسی اثرات تغییراقلیم بر تغذیه آب زیرزمینی حوضه قره‌بایگان پرداختند. در این راستا داده‌های اقلیمی آینده در بازه‌های زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۰ و ۲۰۵۰-۲۰۳۰ از مدل CGCM3.1 برای سناریوهای A1B، A2 و B1 دریافت و با کاربرد روش فاکتور دلتا برای منطقه ریزمقیاس گردید. مدل مفهومی بارش-رواناب Q-box جهت شبیه‌سازی رواناب سطحی و MODFLOW به منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تعداد سیل‌ها در منطقه، تحت سناریوی B1 اندکی افزایش یافته و تغذیه آب زیرزمینی حال و آینده در همه سناریوها تفاوت معنی‌داری نخواهد داشت. در ادامه، تدوین سناریوهای مدیریتی نشان داد که سناریوهای برداشت تأثیر قابل توجهی بر سطح آب زیرزمینی داشته به طوری که ادامه روند پمپاژ فعلی منجر به ۱۸ متر افت در سطح آب زیرزمینی تا سال ۲۰۵۰ خواهد شد.

در تحقیقی وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015)، الگوی زمانی- مکانی منابع آب بالادست رودخانه یانگ تسه چین را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی (WetSpass) تحت سناریوهای A2 و B2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج افزایش متوسط درجه حرارت را در هر دو سناریو، کاهش بارندگی در کل منطقه، کاهش رواناب در بیشتر رودخانه‌ها مخصوصا در فصل مرطوب را نشان داد. افزایش درجه حرارت و کاهش بارندگی، منجر به افزایش تبخیرتعرق و کاهش آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی خواهد شد و به طور کلی آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی در سناریو A2 نسبت به B2 سریعتر کاهش خواهد یافت. بارندگی، تولید آب سطحی و تغذیه آب زیرزمینی الگوهای زمانی- مکانی یکسانی داشتند.

1- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
2- General Circulation Model (GCM)

با استفاده از شرایط اقلیمی آینده ۵ مدل گردش کلی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و بکارگیری مدل‌های WetSpass و MODFLOW، شرستا و همکاران (Shrestha *et al.*, 2016) اثرات تغییراقلیم بر منابع آب زیرزمینی دلتای مکونگ در جنوب ویتنام را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که متوسط درجه حرارت در انتهای قرن ۲۱ تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۵ و ۴/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. با افزایش بارندگی سالانه، مقادیر تمام مؤلفه‌های بیلان آب به استثنای تغذیه آب زیرزمینی افزایش خواهند یافت. کاهش تغذیه آب زیرزمینی، کاهش سطح آب زیرزمینی و ذخیره را در آینده در پی خواهد داشت.

انصاری و همکاران (Ansari *et al.*, 2016) با هدف بررسی اثرات سناریوهای تغییراقلیم بر آب زیرزمینی سفیددشت از مدل HadCM3 تحت سناریوهای B1 و A2 برای پیش‌نگری بارش و درجه حرارت در دوره آتی استفاده کردند. مدل‌های IHACRES و GMS به ترتیب رواناب سطحی و سطح آب زیرزمینی را در دو حالت ماندگار و غیرماندگار شبیه‌سازی نمودند. نتایج، افزایش ۲۶ و ۳۸ درصدی بارندگی در دوره آتی به ترتیب تحت سناریوهای B1 و A2 را نشان داد. همچنین در انتهای دوره آتی میزان تغذیه تجمعی آب زیرزمینی در سناریو A2 نسبت به B1، ۱۰ متر مکعب بر ثانیه افزایش خواهد یافت.

تاثیر تغییراقلیم بر جریان رودخانه حوضه آبخیز همدان- بهار توسط صفری شاد و همکاران (Safari Shad *et al.*, 2017) مورد مطالعه قرار گرفت. برآورد رواناب به کمک WetSpass و پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی در بازه ۲۰۴۳-۲۰۱۴ با LARS-WG انجام و مدل HadCM3 با بیشترین ضریب وزنی و کمترین خطا بیشترین کارآیی را در پیش‌بینی بارش و دما نشان داد. در دوره آتی میانگین حداقل و حداکثر دما به ترتیب ۱/۲۲ و ۰/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش و بارش ۸ درصد کاهش خواهد یافت. تغییراقلیم سبب خواهد شد حجم رواناب در هر سه زیرحوضه تحت سناریوی A2 کاهش و در سناریوی B1 زیرحوضه ۱ و ۲ کاهش و در زیرحوضه ۳ افزایش خواهد یافت. مجموع رواناب ورودی به دشت تحت سناریوی A2، ۳۶ درصد کاهش و تحت سناریوی B1، ۸ درصد افزایش می‌یابد.

گبرمسکل و کبد (Gebremeskel and Kebede, 2018) به بررسی اثر تغییراقلیم بر منابع آب حوضه وری در اتیوپی با استفاده از مدل اقلیمی (SDSM) و مدل هیدرولوژیکی (WetSpa) پرداختند. نتایج حاصل شده از این مدل‌ها نشان داد که بارش تحت سناریوهای A1B و B1 به ترتیب ۲۴ و ۲۵/۳ درصد، حداکثر درجه حرارت نیز ۰/۰۹ و ۰/۰۷ درجه سانتیگراد و حداقل درجه حرارت ۰/۱۷ و ۰/۱۶ درجه سانتیگراد افزایش خواهند یافت. به طور مشابه، تغییرات جریان پایه تحت سناریوهای A1B و B1 به ترتیب ۱۴ و ۸ درصد، تغییرات تغذیه به ترتیب ۵ و ۲ درصد و تبخیرتعرق ۱۵ و ۱۸ درصد مثبت خواهد بود. اگرچه رواناب سطحی به ترتیب ۱۳ و ۱۴ درصد کاهش خواهد یافت. به طورکلی نتایج حاکی از آن است که تغییرات در کلیه مؤلفه‌های بیلان آب به استثنای رواناب مثبت خواهد بود.

اثر تغییراقلیم بر منابع آب در حوضه بالادست رودخانه نیل آبی با استفاده از مدل‌های اقلیمی RCM، CCLM به کمک مدل هیدرولوژیکی SWAT توسط منگیستو و همکاران (Mengistu et al., 2020) مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج پیش‌نگری‌های تغییراقلیم، افزایش متوسط دمای سالانه، کاهش بارندگی سالانه، افزایش تبخیرتعرق و رواناب سالانه و کاهش جریان پایه را نشان می‌دهد.

اوگاهی و همکاران (Ougahi *et al.*, 2022) مدل SWAT را با بکارگیری پیش‌بینی‌های بارش و دما ریزمقیاس شده پنج مدل گردش کلی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در بازه‌های زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۰ و ۲۱۰۰-۲۰۷۰ در زیرحوضه‌های حوضه ایندس جهت بررسی تاثیر تغییراقلیم بر مؤلفه‌های بیلان آب مورد استفاده قرار دادند. پیش‌نگری‌ها نشان می‌دهد، دما در بازه ۲۱۰۰-۲۰۷۰ نسبت به دوره پایه ۶ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت، بارش تابستانه تحت سناریو RCP8.5، ۳۶/۷ درصد افزایش درحالی که بارش زمستانه تحت این سناریو ۱۶/۹ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به تاثیرگذاری بالای تغییراقلیم بر مؤلفه‌های مختلف منابع آب از یک سو و اهمیت و نقش عمده حوضه نیشابور در اقتصاد محصولات کشاورزی استان خراسان رضوی از سوی دیگر، پژوهش حاضر با هدف کسب دانش مناسب از اثر تغییراقلیم آینده بر مؤلفه‌های منابع آبی حوضه نیشابور، مجموعه‌ای از مدل هیدرولوژیکی[1] WetSpass-M و شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP[2]4.5 را به کار می‌گیرد. نتایج این تحقیق، کمک شایان توجهی به مدیران وتصمیم‌گیران مدیریت منابع آب کشور در جهت اتخاذ تصمیمات مناسب با هدف کاهش اثرات مولفه‌های اقلیمی بر منابع آب حوضه نیشابور-رخ خواهد نمود. لازم به ذکر است تحقیق حاضر اولین پژوهش جامع با هدف بررسی اثرات تغییراقلیم بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز نیشابور با وسعت ۹۴۴۹ کیلومترمربع یکی از حوضه‌های مستعد استان خراسان رضوی در کشاورزی، بخشی از

1- Water and Energy Transfer between Soil, Plants and the Atmosphere under quasi-Steady State-Monthly

2- Representative Concentration Pathways

حوضه آبریز کویر مرکزی ایران و جزئی از حوضه آبریز کالشور نیشابور است که در محدوده ´۱۳ °۵۸ تا ´۳۰ °۵۹ طول شرقی و ´۴۰ °۳۵ تا ´۳۹ °۳۶ عرض شمالی واقع شده است. بررسی منابع آب سطحی، شرایط حوضه و گزارش‌ها نشان می‌دهد که حوضه رخ (واقع شده در جنوب حوضه نیشابور) بر منابع آب سطحی حوضه تاثیرگذار بوده لذا در تحقیق حاضر، محدوده حوضه رخ جزئی از حوضه نیشابور در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱ موقعیت حوضه را در کشور و نسبت به حوضه‌های آبریز استان ارائه می‌نماید. ۴۷ درصد از مساحت حوضه را ارتفاعات و ۵۳ درصد را دشت تشکیل می‌دهد. ارتفاع متوسط محدوده ۱۵۴۹/۶ متر و بلندترین نقطه ارتفاعی ۳۳۰۹ متر در ارتفاعات بینالود و پایین‌ترین نقطه در محل خروجی دشت (حسین آباد جنگل) با ارتفاع ۱۰۵۶ متر می‌باشد. حوضه آبریز نیشابور-رخ به ترتیب با متوسط بارندگی و تبخیر درازمدت سالانه ۲۴۶/۸۳ و ۲۳۵۷/۲۳ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه ۱۳/۳ درجه سانتی‌گراد از اقلیمی نیمه‌خشک تا خشک بهره می‌برد.

مدل WetSpass-M

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی بیلان آب ماهانه (WetSpass-M) استفاده شده است. مدل WetSpass یک مدل بیلان آب توزیعی مکانی شبه پایدار است که اولین بار در سال ۲۰۰۱ توسط باتلن[1] و دی اسمیت[2] در سازمان مهندسی هیدرولوژیک و هیدرولیک دانشگاه بروکسل جهت پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی در گام زمانی فصلی و سالانه ارائه شد. نسخه جدید مدل، با عنوان WetSpass-M توسط کتابخانه برنامه‌نویسی هیدرولیک و هیدرولوژی[3] تحت برنامه پایتون[4] و مستقل از نرم افزار Arc view ارائه و امکان شبیه‌سازی اجزای بیلان آب (برگاب، رواناب سطحی، تبخیرتعرق و تغذیه آب زیرزمینی) در مقیاس ماهانه را فراهم می‌نماید (Abdollahi *et al.*, 2012).

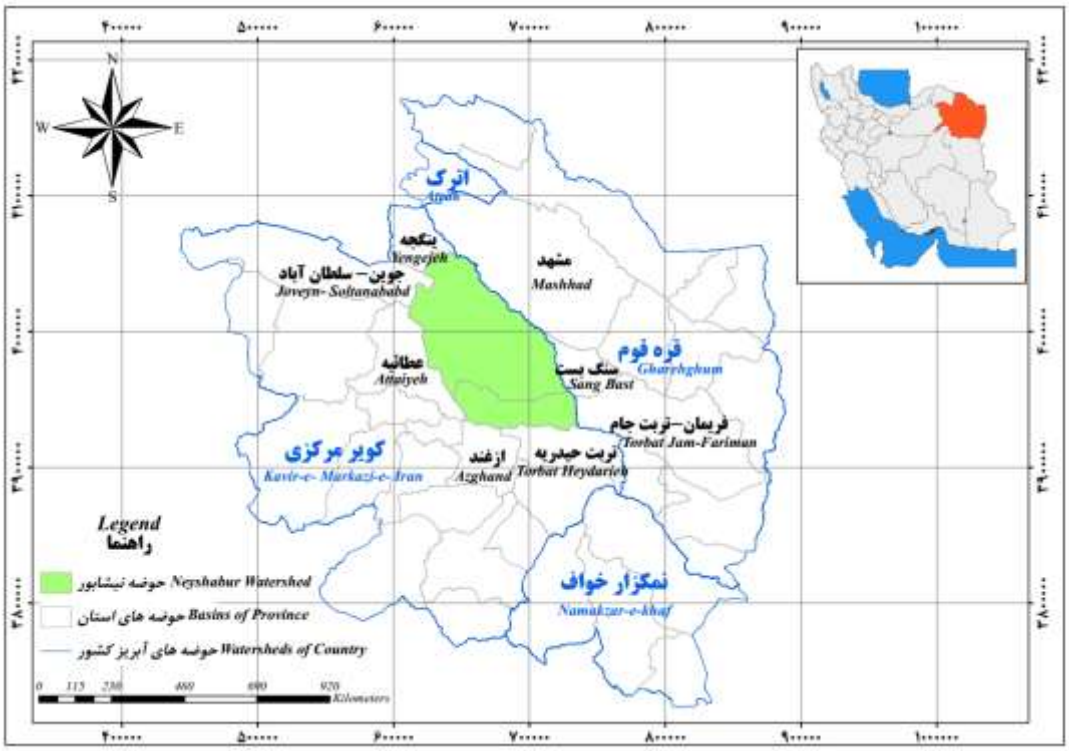
WetSpass-M، یک مدل بیلان آب رستری است که برای هر سلول بارش را به برگاب، رواناب سطحی، تبخیرتعرق و تغذیه آب زیرزمینی تفکیک نموده و با هدف در نظر گرفتن ناهمگنی کاربری اراضی در هر سلول، برای هر کلاس کاربری اراضی تعریف شده در هر سلول چهار زیرسلول بصورت پوشش گیاهی[5]، خاک لخت[6]، آب آزاد[7] و سطح غیرقابل نفوذ[8] تعریف شده است (Abdollahi *et al.*, 2017). بیلان آب یک رستر منحصر به فرد با جمع بستن بیلان‌های آب مستقل بخش‌های پوشش‌گیاهی، خاک لخت، سطوح آب آزاد و سطح غیرقابل نفوذ یک سلول رستری به دست آمده و بیلان آب منطقه مورد مطالعه با جمع بستن بیلان آب محاسبه شده برای هر سلول رستری حاصل خواهد شد (Abdollahi *et al.*, 2012). نقطه شروع محاسبه بیلان آب در یک سلول رستری، بارندگی است و بقیه فرآیندها (برگاب، رواناب، تبخیرتعرق، تغذیه) به صورت منظم دنبال می‌شوند.

تهیه و آماده‌سازی اطلاعات ورودی مدل

جهت شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه، نقشه‌های مدل رقومی ارتفاع[9]، شیب منطقه، کاربری اراضی، بافت خاک حوضه و نقشه‌های توزیعی عمق آب زیرزمینی، شاخص سطح برگ[10]، داده‌های اقلیمی (بارش، تبخیر از سطح تشت، تعداد روزهای بارانی، سرعت باد، دما) در هر ماه از بازه زمانی مورد مطالعه از ورودی‌های اساسی مدل می‌باشند. نقشه مدل رقومی ارتفاع سنجنده SRTM[11] از سایت زمین‌شناسی آمریکا[12] با دقت ۳۰ متر تهیه و نقشه شیب حوضه با استفاده از نقشه مدل رقومی ارتفاع و در نرم افزار ArcGIS تولید شد. براساس نقشه‌های کاربری اراضی و بافت خاک گرفته شده از سازمان آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، منطقه مورد مطالعه دارای ۱۴ کلاس کاربری اراضی بوده و کاربری مراتع کم‌تراکم کاربری غالب منطقه است. خاک حوضه براساس طبقه بندی فائو در ۴۳ کلاس و ۶ کلاس بافت قرار می‌گیرد و بافت لوم بافت خاک غالب محدوده می‌باشد. نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه در شکل ۲ ارائه شده است.

داده‌های روزانه اقلیمی شامل بارش، متوسط، حداکثر و حداقل دما، تبخیر از سطح تشت، سرعت باد ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژی، باران‌سنجی، تبخیرسنجی داخل و خارج از حوضه در بازه زمانی ۲۷ ساله (۲۰۱۷-۱۹۹۱) از سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو دریافت گردید. پس از بررسی داده‌های دریافتی، در نهایت به ترتیب ۴۸، ۱۹، ۱۷ و ۱ ایستگاه جهت تولید نقشه‌های توزیعی ماهانه بارش، متوسط دما، تبخیر و سرعت باد در بازه زمانی مورد مطالعه انتخاب شدند. اطلاعات ماهانه اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در کلیه چاه‌های مشاهداتی حوضه در بازه ۲۷ ساله از آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی دریافت و در نهایت ۲۹ حلقه چاه جهت تولید نقشه‌های توزیعی ماهانه سطح آب زیرزمینی مدنظر قرار گرفتند.

1- Batelaan
2- De-Smedt
3 - Hydrology and Hydraulic Programming Library (H2PL)
4- Python
5- Vegetated Cover
6- Bare Soil
7- Open Water
8- Impervious Surface
9- Digital Elevation Method (DEM)
10- Leaf Area Index (LAI)
11- Shuttle Radar Topography Mission
12- United States Geological Survey (USGS)



شکل ۱- موقعیت حوضه نیشابور-رخ در کشور و نسبت به حوضه های مجاور آن در استان خراسان رضوی

Figure 1- The location of Neyshabur-Rokh watershed in the country and in relation to its neighboring basins in Razavi Khorasan province

لازم به ذکر است نواقص اطلاعات کلیه ایستگاه‌ها و چاه‌های مشاهداتی انتخابی با استفاده از روش‌های آماری روابط رگرسیونی تک متغیره و چندمتغیره، درون‌یابی و نسبت‌ها تکمیل و با روش باکس-پلات از منظر وجود داده پرت مورد آزمون قرار گرفته و اصلاحات لازم انجام شد. نقشه شاخص سطح برگ برای هر ماه از بازه زمانی مورد مطالعه از سنجنده MODIS[1] دریافت گردید. همه ورودی‌های مدل به جز تعداد روزهای بارانی هر ماه به صورت نقشه رستری با فرمت ASCII با اندازه سلول ۳۰۰×۳۰۰ متر و در ۴۲۰ ستون و ۴۴۰ ردیف تهیه و به مدل معرفی شدند. در نهایت با تولید و معرفی تعداد ۱۹۴۸ نقشه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱، مدل جهت شروع شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه در مقیاس ماهانه آماده گردید.

تغییراقلیم و مدل‌های اقلیمی به کار رفته

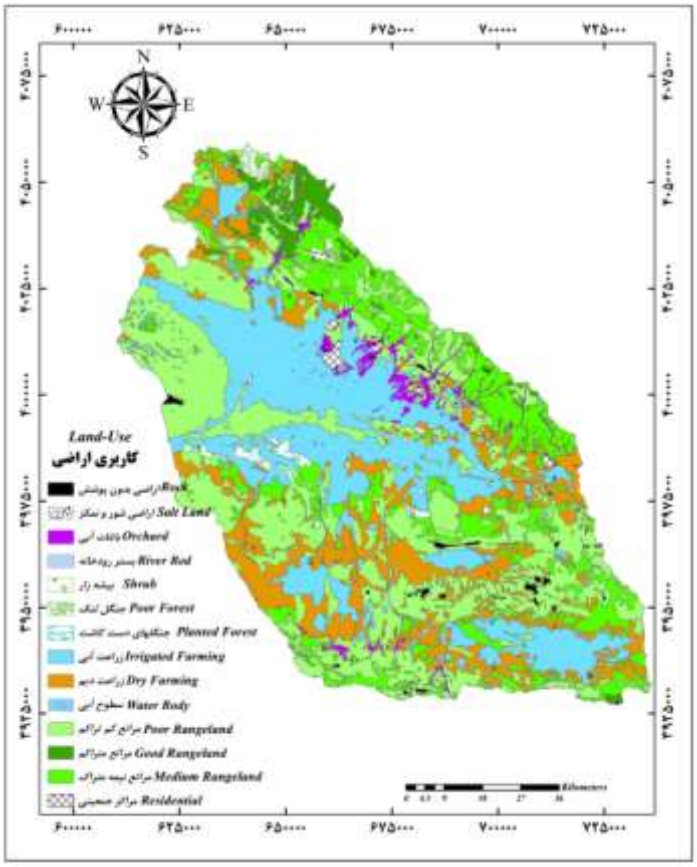
اثرات تغییراقلیم آینده بر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی حوضه، با بکارگیری گروهی[2]شش مدل گردش کلی گزارش پنجم هیئت بین الدول تغییراقلیم تحت سناریو انتشار RCP 4.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. مشخصات مدل‌های گردش کلی به کار رفته در تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است. در این راستا داده‌های بارش و دما شش مدل، در دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۱) و آینده نزدیک (۲۰۵۲-۲۰۲۶) از وب سایت اقلیمی[3] دریافت شد.

گرچه این مدل‌ها منابع معمول برای پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده هستند اما ابعاد سلول‌های محاسباتی مدل‌های GCM خام برای مطالعه محلی و منطقه‌ای مطالعات اقلیمی بسیار بزرگ هستند، بنابراین قبل از استفاده در مطالعات هیدرولوژیکی بایستی ریزمقیاس شوند (Tan *et al.*, 2017). دو روش متمایز ریزمقیاس نمایی خروجی‌های GCM عبارتند از:

1 - Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

2- Ensemble

3 - Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate and Hydrology Projections (DCHP) (https://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/dcpInterface.html)



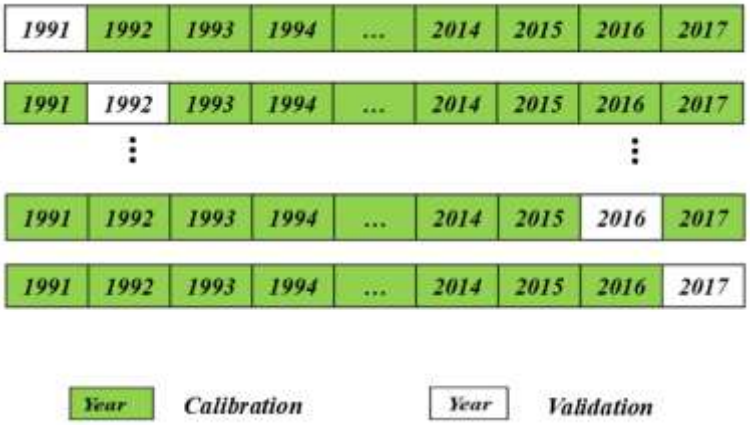
شکل ۲- نقشه کاربری اراضی محدوده مورد مطالعه

Figure 2- Land use map of the studied area

جدول ۱- مشخصات مدل‌های گردش کلی جو CMIP5 به کار رفته در تحقیق (Flato *et al.*, 2013; Chapter 9 of IPCC)

Table 1- Characteristics of CMIP5 atmospheric General Circulation Models used in the research (Flato et al. 2013; Chapter 9 of IPCC)

مدل Model	مؤسسه Institution	کشور Country	دقت مکانی (درجه) Grid resolution (degree)
HadGEM2-ES	UK Met Office Hadley Centre	انگلستان United Kingdom	1.875°×1.25°
CanESM2	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	کانادا Canada	2.8125°×2.7906°
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology	آلمان Germany	1.875°×1.8653°
MIROC-ESM-CHEM	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	ژاپن Japan	2.8125°×2.8125°
BCC-CSM1.1	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	چین China	2.8125°×2.7906°
GISS-E2-R	NASA Goddard Institute for Space Studies USA	آمریکا United States of America	2°×2.5°



شکل ۳- طرح کلی روش اعتبارسنجی متقابل leave one out

Figure 3- The scheme of leave one out cross validation

ریزمقیاس نمایی دینامیکی و روش ریزمقیاس‌نمایی آماری. در مطالعه حاضر، جهت استحصال داده‌های حوضه مورد مطالعه و اصلاح اریبی، روش ریزمقیاس‌نمایی آماری اصلاح اریبی چارک‌ها[1] (Fereidoon and Koch, 2018) در محیط نرم‌افزار R (Gudmundsson *et al*, 2012) استفاده گردید. معمولا ارزیابی روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری توسط روش اعتبارسنجی متقابل[2] انجام می‌گیرد (Hastie *et al.*, 2008; Gudmundsson *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2017). لذا در این پژوهش جهت واسنجی و اعتبارسنجی نتایج روش ریزمقیاس نمایی اصلاح اریبی چارک‌ها، روش اعتبارسنجی متقابل leave one out بکار گرفته شد. طرح کلی روش اعتبارسنجی متقابل leave one out در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج روش leave one out متوسط، حداکثر، حداقل دما و بارش ماهانه در هر ایستگاه با معیارهای میانگین خطای مطلق(MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، درصد خطا (PBIAS) ارزیابی و رتبه‌بندی شش مدل جهت استفاده گروهی، براساس مقادیر سه معیار ارزیابی اشاره شده انجام گرفت. در ادامه روابط ریاضی معیارهای ارزیابی ارائه می‌شود. در این روابط P مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش کلی، O مقادیر اندازه‌گیری متغیر اقلیمی مدنظر در ایستگاه، n تعداد داده‌ها و i ردیف داده‌های مورد استفاده می‌باشد.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_i - O_i|$$

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \times 100$$

لازم به ذکر است که پس از تعیین تغییرات آینده بارش و دما، تبخیرتعرق آینده با استفاده از متوسط، حداکثر و حداقل دمای آینده و روش هارگریوز محاسبه شد (Hargreaves and Samani, 1985).

نتایج و بحث

مدل WetSpass-M با دریافت ورودی‌های تهیه شده در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱ (دوره پایه) و مقیاس ماهانه اجرا گردید. خروجی‌های مدل شامل رواناب مستقیم، تغذیه آب زیرزمینی، تبخیرتعرق و برگاب بوده که مقادیر هر کدام از مؤلفه‌ها در هر ماه از دوره شبیه‌سازی به همراه نقشه‌های توزیعی آن‌ها در هر ماه با فرمت ASCII توسط مدل ارائه می‌گردد.

از آنجایی که واسنجی مدل براساس مقایسه رواناب مستقیم و تغذیه آب زیرزمینی (جریان پایه) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط مدل انجام می‌گیرد لذا نیاز خواهد بود ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه از نظر طول دوره آماری در دسترس، داده گمشده، آزمون داده پرت مورد بررسی قرار گیرند. در نهایت ۵ ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مدل انتخاب و جهت تفکیک جریان پایه از دبی مشاهداتی روش‌های مختلف آنالیز هیدروگراف اعم از حداقل محلی[3]، فیلتر دیجیتال یک پارامتره[4]، فیلتر دیجیتال بازگشتی[5]، شاخص جریان پایه[6] و مدل PART بررسی و مناسب‌ترین روش در هر ایستگاه انتخاب گردید. جدول ۲ مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی به همراه روش مناسب تفکیک جریان پایه در هر ایستگاه را ارائه می‌نماید.

1- Quantile-Mapping (QM) Bias-Corrected
2- Cross-Validation
3- Local minimum
4- One Parameter Filter Digital
5- Recursive Digital Filter
6- Base Flow Index (BFI)

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی به همراه روش مناسب تفکیک جریان پایه در هر ایستگاه

Table 2- Characteristics of selected hydrometric stations along with suitable method for baseflow separation in each station

نام ایستگاه هیدرومتری Name of hydrometric station	عرض جغرافیایی Latitude	طول جغرافیایی Longitude	ارتفاع (متر) Elevation(meters)	روش مناسب تفکیک جریان پایه Suitable method for baseflow separation
اریه چهار باغ Eriyeh Chaharbagh	35°-27´-50"	58°-42´-43"	1563	فیلتر دیجیتال بازگشتی (a=0.975) Recursive Digital Filter
دیزبادعلیا Dizbad Olya	36°-55´-37"	59°-17´-11"	1861	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.95) One Parameter Filter Digital
عیش آباد Eyshabad	36°-19´-23"	58°-51´-28"	1462	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.975) One Parameter Filter Digital
خرو مجموع Kharv Majmo	36°-93´-98"	59°-24´-98"	1452	فیلتر دیجیتال یک پارامتره (a=0.975) One Parameter Filter Digital
زرنده-اندرآب Zarandeh Andarab	36°-28´-42"	58°-29´-46"	1402	فیلتر دیجیتال بازگشتی (a=0.975) Recursive Digital Filter

جدول ۳- دامنه مجاز و مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی مدل WetSpass-M

Table 3- The allowed range and optimal values of calibration parameters of WetSpass-M model

پارامتر Parameter	مقدار بهینه Optimal value	دامنه مجاز Allowed range
A	0.3	0.3-6.5
A	4	0.3-6.5
LP	1.22	0.4-5.5
X	0.635	0-1
B	0.47	0-1

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی رواناب کل ماهانه

Table 4- The values of statistical indicators for evaluating the performance of the model in simulation of monthly total runoff

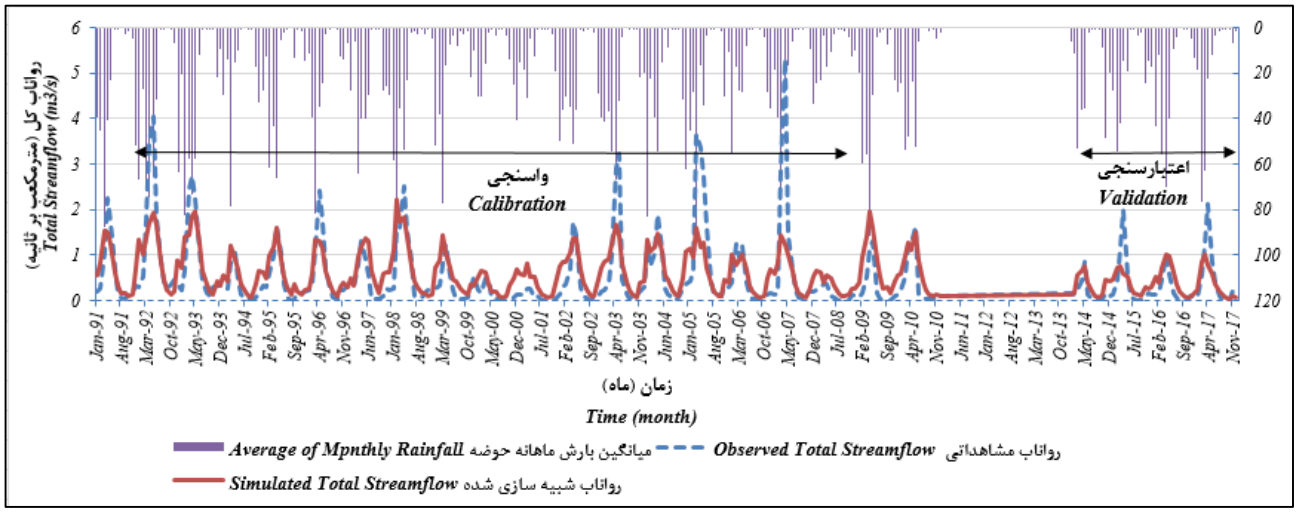
نام ایستگاه هیدرومتری Name of hydrometric station	بازه زمانی Time period	NS	R^2	MB	RMSE
اریه چهار باغ Eriyeh Chaharbagh	1991-2010	0.55	0.59	0.15	0.55
دیزبادعلیا Dizbad Olya	1992-2001	0.50	0.60	0.036	0.14
زرنده-اندرآب Zarandeh Andarab	1991-1996	0.50	0.59	0.5	0.48
عیش آباد Eyshabad	1993-2004	0.54	0.63	-0.09	0.9
خرو مجموع Kharv Majmo	1992-2003	0.51	0.63	0.45	0.50

در ادامه، واسنجی مدل به صورت دستی با استفاده از روش آزمون و خطا با تغییر پارامترهای: برگاب (a)، ضریب تبخیرتعرق (α)، رواناب سطحی (LP)، فاکتور تاخیر در رواناب سطحی (x)، جریان پایه (β) و در نظر گرفتن ضرایب نش- ساتکلیف (NS)، تعیین (R^2)، انحراف مدل در بیلان آب (MB)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) به عنوان توابع هدف و معیارهای ارزیابی عملکرد مدل در ایستگاه‌های هیدرومتری انتخابی انجام شد. مقادیر بهینه پارامترهای واسنجی به همراه دامنه مجاز آن‌ها در جدول ۳ ارائه می‌گردد. از آنجایی که واسنجی و صحت‌سنجی دستی مدل در مقیاس ماهانه و بازه ۲۷ ساله مورد مطالعه توسط رایانه‌های معمولی زمان زیادی را صرف خواهد کرد، لذا جهت تسریع روند کار، سرویس محاسبات سنگین دانشگاه بیرجند به کار گرفته شد. مقادیر معیارهای ارزیابی دقت مدل در شبیه‌سازی رواناب کل ماهانه ایستگاه‌های هیدرومتری انتخاب شده در جدول ۴ نشان داده شده است.

جهت اطمینان به مدل واسنجی شده، لازم است مدل واسنجی شده مورد اعتبارسنجی قرار گیرد. بنابراین از آنجایی که ایستگاه هیدرومتری اریه چهارباغ وسیع‌ترین زیرحوضه منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد لذا به عنوان نماینده‌ای مناسب از حوضه، جهت ارزیابی اعتبارسنجی انتخاب شد. مقادیر شاخص‌های ارزیابی NS، R^2، MB و RMSE در دوره اعتبارسنجی مدل به ترتیب ۰/۶۴، ۰/۵،

۰/۱۷ و ۰/۳۵مترمکعب بر ثانیه به دست آمدند. موریاسی و همکاران (Moriasi *et al.*, 2007) پیشنهاد می‌دهند در مطالعات هیدرولوژیکی و همچنین فرآیندهای انتقال آلاینده‌ها در مقیاس ماهانه، مقادیر نش-ساتکلیف بایستی از ۰/۵ بزرگتر باشد تا بتوان نتایج مدل را قابل قبول قلمداد نمود و معمولا همین معیار برای ضریب تعیین نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. طبق جدول ۴ در کلیه ایستگاه‌ها مقادیر NS و R^2 بالاتر از ۰/۵ بوده که بیانگر عملکرد رضایت‌بخش مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. مقادیر مناسب RMSE و MB، به عنوان معیارهای خطای مدل در شبیه‌سازی در کلیه ایستگاه‌ها، بیانگر کارآیی خوب مدل در شبیه‌سازی، خطای پایین و دقت قابل قبول مدل است. مقادیر مناسب شاخص‌های آماری دوره واسنجی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب و همچنین مقادیر آن‌ها در دوره اعتبارسنجی ایستگاه اریه چهار باغ گویای دقت بالای مدل بهینه شده در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی می‌باشد. شکل ۴ هیدروگراف رواناب کل شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷-۲۰۱۴) را با رواناب کل مشاهداتی در ایستگاه اریه چهارباغ به همراه میانگین بارش کل حوضه مقایسه می‌نماید. بررسی شکل ۴ نشان می‌دهد که مدل در شبیه‌سازی روند تغییرات، مقادیر رواناب کل، زمان وقوع و مقادیر دبی‌های پیک و حداقل که نقشی کلیدی در مدیریت حوضه جهت مقابله با سیلاب‌ها و خشکسالی‌های آتی حوضه دارند، در دوره واسنجی و اعتبارسنجی بسیار موفق عمل نموده و تغییرات آن‌ها از الگوی بارندگی حوضه نیز تبعیت می‌نماید.

جهت پیش‌نگری اقلیم آینده منطقه، ابتدا داده‌های شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 شامل متوسط، حداکثر و حداقل دما و بارش به ترتیب در ۱۱ و ۸ ایستگاه اندازه‌گیری بارش و دما در دوره پایه توسط روش اصلاح اریبی چارک‌ها ریزمقیاس و با روش leave one out ارزیابی شدند. در گام بعدی با هدف در نظر گرفتن گروهی مدل‌ها وزن‌دهی و رتبه‌بندی آن‌ها براساس نتایج روش leave one out انجام شد. برای پیش‌نگری شرایط اقلیمی حوضه در آینده نزدیک، روش اصلاح اریبی چارک‌ها در بازه زمانی ۲۰۵۲-۲۰۲۶ اجرا و وزن‌های تعیین شده برای هر مدل در دوره پایه، در نتایج روش اصلاح اریبی چارک‌ها دوره آینده نزدیک اعمال گردید. جدول ۵، وزن مدل‌های اقلیمی برای متغیرهای بارش و متوسط دما در ایستگاه سینوپتیک نیشابور را ارائه می‌دهد. براساس جدول ۵، برای متغیر بارش مدل HadGEM2-ES و برای متوسط دما مدل‌های HadGEM2-ES و BCC-CSM1.1 بیشترین وزن را در ایستگاه سینوپتیک نیشابور به خود اختصاص داده‌اند. در نهایت با در نظر گرفتن گروهی شش مدل گردش کلی، امکان پیش‌نگری متوسط دما و بارش در آینده نزدیک فراهم شد. نتایج نشان داد که حوضه در آینده نزدیک به ترتیب افزایش ۴/۶۶ درصدی و ۱/۲۱ درجه سانتی‌گراد در بارش و متوسط دمای سالانه را تجربه خواهد نمود. شکل‌های ۵-الف و ۵- ب به ترتیب تغییرات متوسط بارش ماهانه و متوسط ماهانه دمای میانگین حوضه را در دوره پایه و آینده نزدیک ارائه می‌دهند.



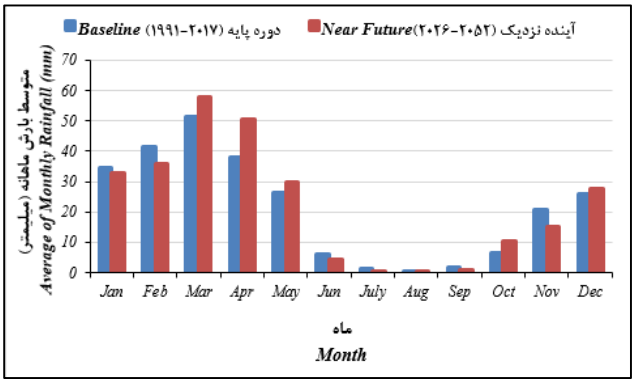
شکل ۴- مقایسه رواناب کل شبیه‌سازی شده مدل و مشاهده شده در ایستگاه اریه چهارباغ در دوره واسنجی (۲۰۱۰-۱۹۹۱) و اعتبارسنجی (۲۰۱۷-۲۰۱۴) به همراه میانگین بارش ماهانه حوضه

Figure 4- Comparison between the observed and simulated total streamflow in Eriyeh Chaharbagh station in the calibration (1991-2010) and validation (2014-2017) periods along with the average of monthly rainfall in the basin

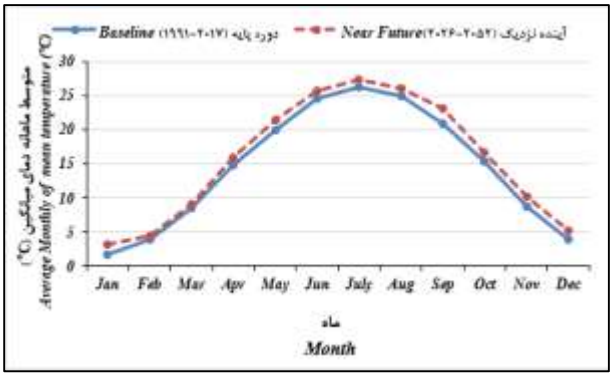
جدول ۵- وزن مدل‌های گردش عمومی برای متغیرهای بارش و متوسط دما در ایستگاه سینوپتیک نیشابور

Table 5- The weight of General Circulation Models for the variables of precipitation and average temperature in Neyshabur synoptic station

مدل Model	وزن مدل برای بارش Weight for Precipitation	وزن مدل برای متوسط دما Weight for Average Temperature
HadGEM2-ES	0.33	0.28
MPI-ESM-LR	0.27	0.12
GISS-E2-R	0.20	0.18
MIROC-ESM-CHEM	0.11	0.06
BCC-CSM1.1	0.07	0.28
CanESM2	0.02	0.08



a (الف)



b (ب)

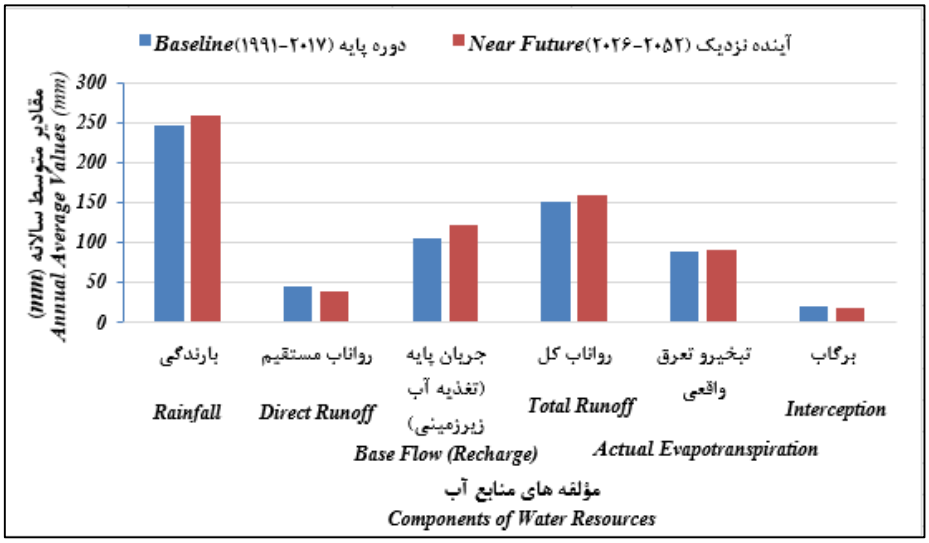
شکل ۵- (الف) مقایسه تغییرات توزیع میانگین بارندگی ماهانه حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک و (ب) مقایسه تغییرات متوسط ماهانه دمای میانگین حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

Figure 5- (a) The Comparison of changes in the average of monthly rainfall distribution of the basin in the baseline and the near future period and (b) The Comparison of average monthly changes in mean temperature of the basin in the baseline and the near future period

براساس این اشکال در آینده نزدیک، متوسط دما در تمامی ماه‌ها افزایش خواهد یافت به طوری که بیشترین تغییرات در ماه سپتامبر و کمترین تغییرات دما در ماه مارس رخ خواهد داد و بارندگی حوضه در ماه‌های مارس، آوریل، می، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌ها کاهش خواهد یافت. بیشترین و کمترین تغییرات بارش به ترتیب در ماه‌های آوریل و آگوست اتفاق خواهد افتاد. تغییرات افزایشی یا کاهشی ماهانه متوسط دما در آینده نزدیک بین ۲/۱۴ تا ۰/۴۳ درجه سانتی‌گراد و بارندگی بین ۱۲/۳۴ تا ۵/۶۵- میلی‌متر خواهد بود.

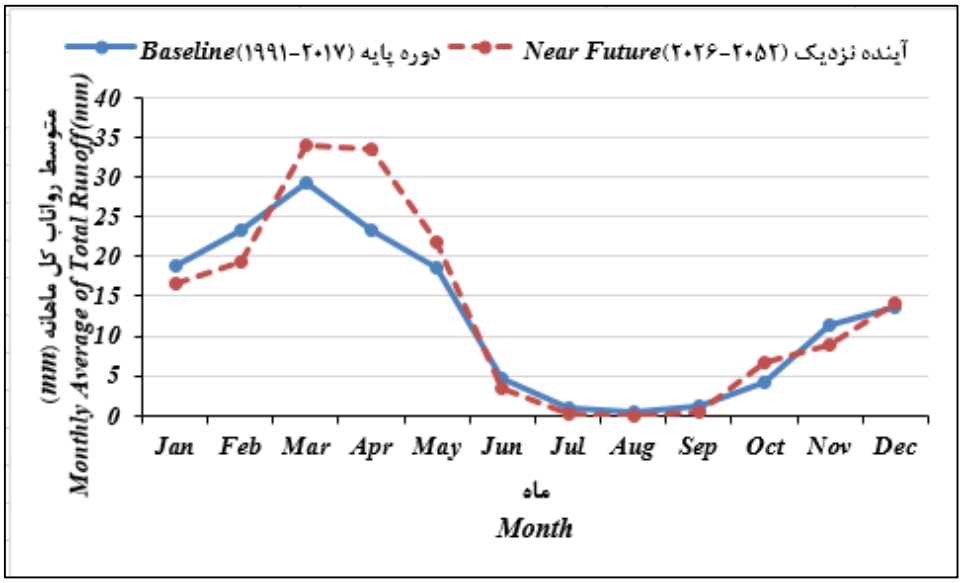
مطالعات گذشته نشان می‌دهند، تغییرات آینده در شرایط بارش و دما بر روی اجزای مختلف بیلان تاثیر خواهد گذاشت. لذا جهت بررسی این امر، نقشه‌های توزیعی بارش، متوسط دما و تبخیرتعرق ماهانه در بازه زمانی ۲۰۵۲-۲۰۲۶ تهیه و با فرمت ASCII به مدل WetSpass-M واسنجی شده معرفی گردید. مدل جهت ارزیابی اثر تغییراقلیم بر اجزای مختلف بیلان در آینده نزدیک اجرا شد. مقایسه خروجی‌های مدل در دوره پایه و آینده نزدیک نشان داد، تغییراقلیم آینده نزدیک، سبب افزایش ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصدی به ترتیب رواناب کل، جریان پایه (تغذیه آب زیرزمینی)، تبخیرتعرق واقعی سالانه و کاهش ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصدی به ترتیب رواناب مستقیم و برگاب سالانه خواهد شد. در مقیاس زمانی سالانه، رواناب مستقیم و تغذیه آب زیرزمینی به ترتیب در رتبه اول و دوم بیشترین درصد تغییرات و تبخیرتعرق واقعی کمترین درصد تغییرات را نسبت به تغییراقلیم آینده نزدیک نشان می‌دهد. افزایش بارندگی سالانه حوضه در آینده نزدیک، افزایش رواناب کل (مجموعی از رواناب مستقیم و جریان پایه) را در پی خواهد داشت و کاهش رواناب مستقیم به عنوان جزئی از رواناب کل در حوضه سبب افزایش جریان پایه می‌گردد. شکل ۶ مقادیر متوسط سالانه مهم‌ترین مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی حوضه را در دوره پایه و آینده نزدیک نشان می‌دهد. شکل ۷ متوسط تغییرات ماهانه رواناب کل حوضه را در دوره پایه و آینده نزدیک مقایسه می‌نماید. با نگاهی به شکل ۷ می‌توان دریافت که متوسط ماهانه رواناب کل آینده نزدیک حوضه، در ماه‌های مارس، آوریل، می، اکتبر و دسامبر افزایش و در بقیه ماه‌های سال کاهش می‌یابند به طوری که رواناب کل بین ۵۷/۲۶ تا ۹۸/۵۴- درصد تغییر خواهد داشت. مقایسه شکل ۵-الف و ۷ نشان‌دهنده انطباق بالای تغییرات ماهانه بارندگی و رواناب کل حوضه می‌باشد. چگونگی تغییرات متوسط ماهانه تبخیرتعرق واقعی حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد

افزایش متوسط دما و تغییرات مقدار و الگوی بارندگی آینده، کلیه اجزای بیلان آب حوضه نیشابور-رخ را تحت تاثیر قرار خواهد داد و با بیشترین اثرگذاری بر رواناب مستقیم، خطر وقوع وقایعی چون سیل و خشکسالی را بالا خواهد برد. گرچه جهت اتخاذ تصمیمات مناسب مدیریتی لازم است علاوه بر سناریو میانه، سناریوهای بدبینانه تا خوشبینانه نیز لحاظ گردد، لیکن نتایج استفاده از سناریو میانه (RCP4.5) در پژوهش حاضر، لزوم توجه به مسئله تاثیرگذاری تغییراقلیم بر کلیه اجزای بیلان آب حوضه مورد مطالعه را مشخص می‌نماید. لذا جهت تقلیل یا غلبه بر مشکلات آتی ناشی از تغییراقلیم و جلوگیری از بروز پیامدهای اجتماعی و اقتصادی ناشی از این پدیده، لازم است مدیران و سیاست‌گذاران و دستگاه‌های اجرایی متولی منابع آبی کشور برنامه‌های مدیریتی کوتاه مدت و درازمدت را تدوین و اجرا نمایند. عدم توجه به این موضوع سبب خواهد شد کشور هزینه‌های بالایی را بخاطر عدم اتخاذ استراتژی‌های مناسب مدیریتی جهت مقابله با اثرات منفی تغییراقلیم، بپردازد.



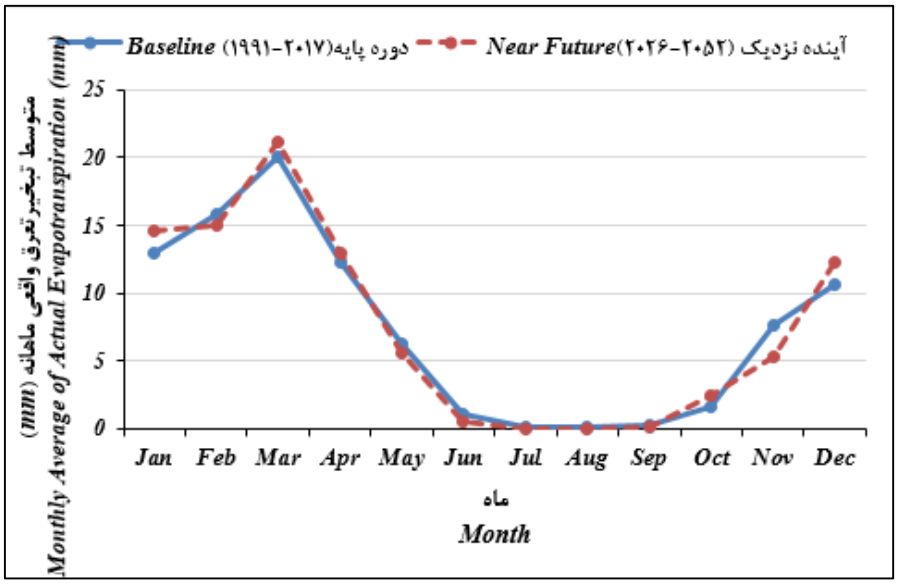
شکل ۶- مقادیر متوسط سالانه مهم‌ترین مؤلفه‌های بیلان هیدرولوژیکی حوضه در دوره‌های پایه و آینده نزدیک

Figure 6- The annual average values of the most important components of the hydrologic balance of the basin in the baseline and near future periods



شکل ۷- مقایسه تغییرات متوسط ماهانه رواناب کل حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

Figure 7- The Comparison of changes in monthly average of total runoff of the basin in the baseline and the near future periods



شکل ۸- مقایسه تغییرات متوسط ماهانه تبخیرتعرق واقعی حوضه در دوره پایه و آینده نزدیک

Figure 8- The Comparison of changes in monthly average of actual evapotranspiration of the basin in the baseline and the near future periods

نتایج این تحقیق با نتایج انصاری و همکاران در دشت سفیددشت (Ansari *et al.*, 2016)، الماسی و همکاران در حوضه آبخیز بازفت (Almasi *et al.*, 2017) و شرافتی و همکاران در شهر نیشابور (Sharafati *et al.*, 2021) همخوانی کامل داشته و در بخش‌هایی با نتایج وانگ و همکاران (Wang *et al.*, 2015)، شرستا و همکاران (Shrestha *et al.*, 2016)، گبرمسکل و کبد (Gebremeskel and Kebede, 2018) و منگیستو و همکاران (Mengistu *et al.*, 2020) متفاوت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

موقعیت جغرافیایی کشور ایران و توزیع غیریکنواخت بارندگی در آن در کنار تغییراقلیم، باعث تحمیل فشارهای مضاعف بر منابع آب کشور گردیده به طوری که دسترسی پایدار به این منابع را با خطری جدی مواجه نموده است. لذا در این پژوهش با رویکرد کسب دانش مناسب از اثر تغییراقلیم آینده بر مؤلفه‌های منابع آبی حوضه نیشابور-رخ به عنوان یک حوضه استراتژیک در تامین امنیت غذایی استان خراسان رضوی، مجموعه‌ای از یک مدل هیدرولوژیکی و شش مدل گردش کلی تحت سناریو RCP4.5 مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا مدل هیدرولوژیکی حوضه در بازه زمانی ۲۰۱۷-۱۹۹۱ در مدل WetSpass-M تهیه و واسنجی و اعتبارسنجی گردید. با بکارگیری روش اصلاح اریبی چارک‌ها جهت ریزمقیاس نمایی داده‌های اقلیمی مدل‌های گردش کلی و تعیین رتبه و وزن هر مدل توسط روش اعتبارسنجی متقابل leave one out امکان در نظرگرفتن گروهی مدل‌ها در پیش‌نگری شرایط اقلیمی حوضه در آینده نزدیک فراهم گردید. با وارد کردن نقشه‌های ماهانه بارش، متوسط دما و تبخیرتعرق در بازه ۲۰۵۲-۲۰۲۶ به مدل هیدرولوژیکی واسنجی شده حوضه، تاثیر تغییراقلیم بر اجزای مختلف بیلان در آینده نزدیک مشخص گردید. نتایج افزایش دمای متوسط در کلیه ماه‌ها و افزایش ۱/۲۱ درجه سانتیگراد متوسط دمای سالانه را نشان می‌دهد. بارندگی ماهانه در آینده نزدیک بین ۱۲/۳۴ تا ۵/۶۵- میلی‌متر تغییرات خواهد کرد و افزایش ۴/۶۶ درصدی بارش سالانه را در پی خواهد داشت. تغییرات بارندگی و دما در آینده نزدیک، باعث افزایش ۵/۹، ۱۴/۸۵، ۱/۴۲ درصدی به ترتیب رواناب کل، جریان پایه (تغذیه آب زیرزمینی)، تبخیر تعرق واقعی سالانه و کاهش ۱۵/۱۵ و ۳/۵۴ درصدی به ترتیب رواناب مستقیم و برگاب سالانه خواهد شد. نتایج این تحقیق درک عمیق‌تری را از اثر تغییراقلیم بر اجزای بیلان هیدرولوژیکی حوضه نیشابور-رخ مهیا نموده و لزوم اتخاذ تصمیمات مدیریتی مناسب با بکارگیری طیفی از سناریوهای بدبینانه تا خوشبینانه، جهت تقلیل تاثیرپذیری حوضه از تغییراقلیم آینده را مشخص می‌نماید.

منابع

1. Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Seyed Ghasemi, S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research 45*(10). https://doi.org/10.1029/2008WR007615.
2. Abdollahi, K., Bashir, I., & Batelaan, O. (2012). *WetSpass Graphical User Interface*. Brussels: Vrije Universiteit Brussels Department of Hydrology and Hydraulic Engineering.
3. Abdollahi, K., Bashir, I., Verbeiren, B., Harouna, M.R., Griensven, A.V., Huysmans, M., & Batelaan, O. (2017). A distributed monthly water balance model: formulation and application on Black Volta Basin, *Environmental Earth Sciences 76*(198): 1-18. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6512-1.
4. Almasi, P., Soltani, S., Goodarzi, M., & Modarres, R. (2017). Assessment the Impacts of Climate Change on Surface Runoff in Bazoft Watershed. *Journal of Water and Soil Science 20*(78): 39-52. http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3434-fa.html
5. Ansari, S., Massah Bavani, A., & Roozbahani, A. (2016). Effects of climate change on groundwater recharge (Case study: Sefid Dasht plain). *Journal of Water and Soil 30*(2): 416-431. (In Persian with English abstract)
6. Dakhlaoui, H., Ruelland, D., Tramblay, Y., & Bargaoui, Z. (2017). Evaluating the robustness of conceptual rainfall-runoff models under climate variability in northern Tunisia. *Journal of Hydrology* 550: 201-217. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.032.
7. Fereidoon, M., & Koch, M. (2018). SWAT-MODSIM-PSO optimization of multi-crop planning in the Karkheh River Basin, Iran, under the impacts of climate change. *Science of The Total Environment* 630: 502-516. http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.234.
8. Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, SC., Cox, P., Driouech, F., Emori, S., Eyring, V., Forest, C., Gleckler, P., Guilyardi, E., Jakob, C., Kattsov, V., Reason, C., & Rummukainen, M. (2013). *Evaluation of climate models. in: climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
9. Gebremeskel, G., & Kebede, A. (2018). Estimating the effect of climate change on water resources: Integrated use of climate and hydrological models in the Werii watershed of the Tekeze river basin, Northern Ethiopia. *Agriculture and Natural Resources 52*(2): 195-207. https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.06.010.
10. Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations- a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 3383-3390. https://doi.org/10.5194/hess-16-3383-2012.
11. Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature*, American Society of Agricultural and Biological Engineers. https://doi.org/10.13031/2013.26773.
12. Hashemi, H., Uvo C, B., & Berndtsson, R. (2015). Coupled modeling approach to assess climate change impacts on groundwater recharge and adaptation in arid areas. *Hydrology and Earth System Sciences 19*(10): 4165–4181. https://doi.org/10.5194/hess-19-4165-2015.
13. Hastie, T., Tibshirani, R., & Freidman, J.H. (2008). *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics.
14. Kahsay, K.D., Pingale, S.M., & Hatiye, S.D. (2018). Impact of climate change on groundwater recharge and base flow in the sub-catchment of Tekeze basin, Ethiopia. *Groundwater for Sustainable Development* 6: 121-133. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.12.002.
15. Lawrence Livermore National Laboratory - Green Data Oasis Available at http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projections/dcpInterface.html.
16. Mengistu, D., Bewket, W., Dosio, A., & Pantiz, H.J. (2021). Climate change impacts on water resources in the Upper Blue Nile (Abay) River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 592. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125614.
17. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., & Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers 50*(3): 885-900. https://doi.org/10.13031/2013.23153.
18. Ougahi, J.H., Cutler, ME.J., & Cook. SJ. (2022). Modelling climate change impact on water resources of the Upper Indus Basin. *Journal of Water & Climate Change 13*(2): 482-504. https://doi.org/10.2166/wcc.2021.233.
19. Safari Shad, M., Habibnejad Roshan, M., Solaimani, K., Ildoromi, A., & Zeinivand, H. (2017). The potential effects of the climate change on the river flow in Hamadan watershed-Bahar. *Hydrogeomorphology 4*(10): 81-98. (In Persian with English abstract)
20. Sharafati, A., Haji Seyed Asadollahi, S.B., & Shahbazi, A. (2021). Assessing the impact of climate change on urban water demand and related uncertainties: a case study of Neyshabur, Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 145: 473-487. https://doi.org/10.1007/s00704-021-03638-5
21. Shrestha, S., Bach, T.V., & Pandey, V.P. (2016). Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy* 6: 1-13. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.010.

22. Tan, M.L., Ibrahim, A.L., Yusop, Z., Chua, V.P., & Chan, N.W. (2017). Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research* 189: 1-10. https://doi.org/10.1016/g.atmosres.2017.01.008.
23. Wang, Y., Liao, W., Ding, Y., Wang, X., Jiang, Y., Song, X., & Lei, X. (2015). Water resources spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quaternary International* 380: 187-196. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.02.023.
24. Wang, Y., Sivandran, G., & Bielicki, J.M. (2017). The stationarity of two statistical downscaling methods for precipitation under different choices of cross-validation periods. *International Journal of Climatology 38*(5): 330-348. https://doi.org/10.1002/joc.5375.
25. Zhang, J., Wang, G., He, R., & Liu, C. (2009). Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River basin and its response to climate change. *Advances in Water Science 20*(2): 153-158.

Contents

Effects of Lateral Spacing in Tape Irrigation System on Salinity Distribution in Soil Profile under Wheat Cultivation 531
N. Karimi, S.H. Tabatabaei, M.H. Rahimian, S.A. Esmaeilzadeh-Hosseini
Mapping pH of Groundwater and Determination of Vulnerability Areas for Citrus and Rice Growth in Mazandaran 545
R. Fazloula, H. Pouryazdankhah
Evaluation and Variability of Flood-Oriented Health of Shiraz Darwazeh Quran Watershed from Watershed Management Structures 561
S.H.R. Sadeghi, M. Tavosi, S. Zare, V. Beiranvandi, H. Shekohideh, F. Akbari Imamzadeh, M. Bahlekeh, F. Khurshid Sokhangouy, R. Chamani
Carbon Stock and Some Chemical Properties of Soil in Sacred Groves and Pollarded Forest Stands of Northern Zagros Forests 579
N. Koosha, K. Mohammadi-Samani, V. Hosseini
Comparison of Soil Biological Activity in Forest with Coniferous and Broadleaf Trees in Biston Region of Kermanshah 593
S. Mehrnoosh, A. Beheshti Ale Agha, F. Rakhsh, M. Pourreza, A.A. Safari Sinegani
Application of the RothC Model in Simulating Effect of Climate Change on CO_2 Emissions and Soil Organic Carbon Stocks in Semi-arid Climate of Khorasan-e-Razavi 611
S. Bagherifam, M.A. Delavar, P. Keshavarz, P. Karami
Evaluation of WetSpass-M Model for Estimation of Hydrological Response of Neyshabur-Rookh Watershed to Climate Change of Future Years 629
S. Dowlatabadi, M. Amirabadizadeh, M. Zarei

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36 No. 5 2022

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).