

نشریه آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)



جلد ۳۸ شماره ۲

سال ۱۴۰۳



شماره پیاپی ۹۴

عنوان مقالات

۱۷۷ اثر تاریخ کاشت بر نرخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری
رضا سعیدی

۱۹۳ ارزیابی کارایی انواع تبدیل موجک در مدل سازی ترکیبی موجک- شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی
جریان ماهانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کارده)
عاطفه کاظمی چولانک- فرشته مدرسی- ابوالفضل مساعدی

۲۰۹ تأثیر زهکشی لانه موشی و کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا به عنوان گیاه کشت دوم اراضی
شالیزاری در منطقه رشت
ابراهیم کریمیان- مریم نوابیان- محمد حسن بیگلونی- محمد ربیعی

۲۲۵ تأثیر پوشش های درختچه ای بر برخی ویژگی های خاک در یک اقلیم نیمه خشک
زینب سهراب زاده- یحیی کوچ

۲۴۱ تأثیر نسبت های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز
در کشت بدون خاک
سحر ناصری- شهرام کیانی- حمیدرضا متقیان

۲۵۵ مقایسه اثر چند پلیمر اکریلیکی در کاهش تحرک برخی فلزات سنگین در یک خاک آلوده
علی باریکلو- پریرا علمداری- احمد گلچین

۲۷۱ مدل سازی مقاومت فروروی خاک با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه ریزی بیان ژن
شکراه اصغری- مهسا حسینیور کاشانی- حسین شهاب آرخازلو

۲۸۷ پیامد نظام های کشت بر شاخص پایداری و کربن آلی خاکدانه ها در خاک های با سابقه بلندمدت کشت نیشکر
نرگس ملایی- محسن شکل آبادی- محسن نائل

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

با شماره پروانه ۲۱/۲۰۱۵ مورخه ۱۳۶۸/۴/۱۱ و درجه علمی-پژوهشی شماره ۲۶۵۲۴ تاریخ ۱۳۷۳/۱۰/۱۹ از
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد ۳۸ شماره ۲ خرداد-تیر سال ۱۴۰۳

بر اساس مصوبه وزارت عتف از سال ۱۳۹۸، کلیه نشریات دارای درجه "علمی-پژوهشی" به نشریه "علمی" تغییر نام یافتند.

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد- تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار- آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

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

استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد- آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد- هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد- دانشکده کشاورزی - ص. پ. ۹۱۷۷۵-۱۱۶۳ - دبیرخانه نشریات علمی- نشریه آب و خاک

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- ۱۷۷ اثر تاریخ کاشت بر نرخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری
رضا سعیدی
- ۱۹۳ ارزیابی کارایی انواع تبدیل موجک در مدل سازی ترکیبی موجک- شبکه عصبی مصنوعی برای پیش بینی جریان ماهانه رودخانه
(مطالعه موردی: رودخانه کارده)
عاطفه کاظمی چولانک- فرشته مدرسی- ابوالفضل مساعدی
- ۲۰۹ تأثیر زهکشی لانه موشی و کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا به عنوان گیاه کشت دوم اراضی شالیزاری در منطقه رشت
ابراهیم کرمان- مریم نوابیان- محمد حسن بیگلونی- محمد ربیعی
- ۲۲۵ تأثیر پوشش های درختچه ای بر برخی ویژگی های خاک در یک اقلیم نیمه خشک
زینب سهراب زاده- یحیی کوچ
- ۲۴۱ تأثیر نسبت های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک
سحر ناصری- شهرام کیانی- حمیدرضا متقیان
- ۲۵۵ مقایسه اثر چند پلیمر اکریلیکی در کاهش تحرک برخی فلزات سنگین در یک خاک آلوده
علی باریکلو- پریسا علمداری- احمد گلچین
- ۲۷۱ مدل سازی مقاومت فروروی خاک با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه ریزی بیان ژن
شکراله اصغری- مهسا حسنیپور کاشانی- حسین شهاب آرخازلو
- ۲۸۷ پیامد نظام های کشت بر شاخص پایداری و کربن آلی خاکدانه ها در خاک های با سابقه بلندمدت کشت نیشکر
نرگس ملایی- محسن شکل آبادی- محسن نائل



Effect of Planting Date on the Rate of Evaporation and Transpiration Components of Maize under Salinity Stress Conditions

R. Saeidi *

1- Ph.D. of Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(* - Corresponding Author Email: Saeidi@org.ikiu.ac.ir)

Received: 26-10-2023
Revised: 14-12-2023
Accepted: 13-03-2024
Available Online: 13-03-2024

How to cite this article:

Saeidi, R. (2024). Effect of planting date on the rate of evaporation and transpiration components of maize, under salinity stress conditions. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 175-189. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85046.1350>

Introduction

Salinity stress causes reduction of crop evapotranspiration (ET_c) and yield. An unsuitable seed planting date can result in negative atmospheric effects, such as temperature stress, during the crop growth period. Consequently, salinity stress and unfavorable climatic conditions during this period interact to reduce crop water uptake. The mentioned conditions effect, should be investigated on crop transpiration amount (actual water requirement) and soil surface evaporation losses. This research results will have a determinative effect on the optimal use of water resources.

Materials and Methods

The studied crop in this research was S.C 704 maize. The crop planting was conducted in mini-lysimeters with a diameter of 40 cm and a height of 70 cm. The experiment factors included soil salinity stress and seed planting date. Soil salinity treatments were selected at four levels of 1.7 (S_1), 2.5 (S_2), 3.8 (S_3), 5.9 (S_4) $dS.m^{-1}$. Seed planting date included of 5 May (P_1), 25 May (P_2), 14 June (P_3) and 4 July (P_4). Crop growth period for all planting date treatments, was 140 days (FAO-56). Experiment was conducted as factorial based on completely randomized design with 16 treatments and three repetitions. Variance analysis and average comparison of data was done by SPSS software and with Duncan's multi-range test (at 5% probability level). Daily soil moisture amount was measured by a moisture meter. Irrigation time was determined for without water stress conditions. Readily available water limit was determined 0.4. Irrigation volume was calculated according to soil moisture deficit (up to FC limit), soil density, root depth, leaching fraction and soil surface area. To separate the evapotranspiration components, all treatments were performed in two series of mini-lysimeters. In the first series, soil moisture reduction was related to crop evapotranspiration amount. But in the second series, the plastic mulch was placed on soil surface. Soil moisture reduction in the second series, was only related to crop transpiration amount. Difference of data in the first and second series was equal to the evaporation amount. Linear function of Mass and Hoffman (1977) was used as the function of evapotranspiration-salinity, transpiration-salinity, and evaporation-salinity.

Results and Discussion

As salinity increased from S_1 to S_4 levels, evapotranspiration, transpiration, and evaporation amounts were measured on the planting dates P_1 , P_2 , P_3 , and P_4 . The measurements were as follows:

Evapotranspiration (mm): 619-548 (P_1), 621-549 (P_2), 624-547 (P_3), and 625-544 (P_4)



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85046.1350>

Transpiration (mm): 429-309 (P1), 421-295 (P2), 418-281 (P3), and 412-265 (P4)

Evaporation (mm): 190-239 (P1), 200-254 (P2), 206-266 (P3), and 213-279 (P4)

These ranges reflect the measured amounts for each variable under increasing salinity levels across the different planting dates. Under the influence of salinity stress, soil water potential decreases, leading to a reduction in water uptake by the crop and subsequently decreased crop transpiration. As a result of this reduction in crop water uptake, the remaining water in the soil is utilized for evaporation. In S_4 level and on dates of: P_1 , P_2 , P_3 and P_4 , crop transpiration portion decreased to 12.9%, 14.1%, 15.6% and 17.2%, respectively, and evaporation portion increased to the same amount. By adjusting the seed planting date to optimize the utilization of favorable atmospheric conditions during crop growth stages, the increase in the portion of evaporation is prevented. In initial stage of growth period, only 0 to 10% of soil surface is covered by crops (FAO-56) causing the evaporation component to have a dominant portion in the crop evapotranspiration parameter. As a result, placing of initial growth stage in warm days of year caused an increase in evaporation losses. It seems that S_1P_1 treatment was the optimal condition for transpiration increase and evaporation decrease. The estimated functions showed that (in salinity stress conditions) crop transpiration decreased more than ET_c . Therefore, the transpiration rate should be considered as the crop's net water requirement instead of ET_c (crop evapotranspiration). According to the Mass-Hoffman function, under stress conditions, the decreasing slope of transpiration and evapotranspiration and the increasing slope of evaporation become more pronounced. For instance, in planting dates of P_1 , P_2 , P_3 , and P_4 , for each unit ($dS.m^{-1}$) of increase in soil salinity, the evapotranspiration rates decreased by 2.51%, 2.82%, 3.3%, and 3.65%, respectively. Similarly, the transpiration rates decreased by 6.1%, 7.34%, 8.42%, and 9.2%, respectively, while the evaporation rates increased by 5.5%, 6.7%, 7%, and 7.82%.

Conclusion

Salinity and atmospheric temperature stresses had interaction effects on evapotranspiration and components rates. Postponing the seed planting date and not utilizing optimal weather conditions, especially during spring, can lead to damage to transpiration, which is a favorable aspect; however it is unfavorable in evaporation,. Therefore, in irrigated crops, it is advisable not to plant seeds during the warm months of the year, especially in July and August. Consequently, by controlling soil salinity and selecting the appropriate planting date, water can be optimally utilized.

Keywords: Growth period, Soil salinity, Water losses, Water requirement

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص ۱۷۵-۱۸۹

اثر تاریخ کاشت بر نرخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت در شرایط تنش شوری

رضا سعیدی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۳

چکیده

تنش‌های محیطی و شرایط اقلیمی در دوره رشد گیاه، از عوامل مؤثر بر میزان تبخیر-تعرق گیاه هستند. اثر تنش شوری و تاریخ کاشت بذر بر نرخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) در سال ۱۴۰۱ و در منطقه قزوین بررسی شد. برای تفکیک اجزای تبخیر و تعرق ذرت، کشت لایسیمیتری انتخاب شد. آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی اجرا شد. تیمارها شامل شوری خاک در چهار سطح $(S_1) 1/7$ ، $(S_2) 2/5$ ، $(S_3) 3/8$ ، $(S_4) 5/9$ دسی‌زیمنس بر متر و تاریخ کاشت شامل ۱۵ اردیبهشت (P_1) ، ۴ خرداد (P_2) ، ۲۴ خرداد (P_3) و ۱۳ تیر (P_4) بود. شوری عصاره اشباع خاک در تیمارها از طریق اعمال کسر آبشویی بر خاک، کنترل شد. مقدار روزانه رطوبت خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد. از تابع خطی مس-هافمن (۱۹۷۷) نیز به عنوان تابع شوری-تبخیر-تعرق، تابع شوری-تعرق و تابع شوری-تبخیر استفاده شد. با افزایش شوری از سطح S_1 به S_4 و در تاریخ‌های P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 به ترتیب مقدار تبخیر-تعرق در محدوده ۶۱۹-۵۴۸، ۶۲۱-۵۴۹، ۶۲۴-۵۴۷ و ۶۲۵-۵۴۴ میلی‌متر، مقدار تعرق در محدوده ۴۲۹-۳۰۹، ۴۲۱-۲۹۵، ۴۱۸-۲۸۱ و ۴۱۲-۲۶۵ میلی‌متر و مقدار تبخیر در محدوده ۱۹۰-۲۳۹، ۲۰۰-۲۵۴، ۲۰۶-۲۶۶ و ۲۱۳-۲۷۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در اثر تنش شوری، پتانسیل آب خاک کاهش یافت و به دنبال آن میزان جذب آب و تعرق گیاه کاهش پیدا کرد. با کاهش جذب آب (توسط گیاه)، آب باقی‌مانده از سهم تعرق در خاک، صرف جزء تبخیر و افزایش آن شد. از سوی دیگر تاریخ کاشت بذر نیز بر مقدار تبخیر (جزء نامطلوب) و تعرق (جزء مطلوب) مؤثر بود. به طوری که در بیش‌ترین سطح تنش شوری و در تاریخ‌های P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 ، سهم تعرق گیاه به ترتیب ۱۲/۹، ۱۴/۱، ۱۵/۶ و ۱۷/۲ درصد کاهش و سهم تبخیر از سطح خاک به همان اندازه افزایش یافت. در مرحله اولیه رشد گیاه، جزء تبخیر دارای سهم غالب در پارامتر تبخیر-تعرق گیاه بود. به همین دلیل قرارگیری مرحله اولیه رشد گیاه در روزهای گرم سال، باعث افزایش تلفات تبخیر شد. از این‌رو تیمار S_1P_1 دارای شرایط بهینه (در پژوهش حاضر) برای افزایش تعرق و کاهش تبخیر بود. تابع خطی مس-هافمن نیز نشان داد که در تاریخ‌های کشت P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 به ازای افزایش یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک، میزان تبخیر-تعرق به ترتیب ۲/۵۱، ۲/۸۲، ۳/۳ و ۳/۶۵ درصد کاهش، میزان تعرق به ترتیب ۶/۱، ۶/۳۴، ۷/۴۲ و ۸/۴۲ درصد کاهش و میزان تبخیر به ترتیب ۵/۵، ۶/۷ و ۷/۸۲ درصد افزایش داشت. در نتیجه با کنترل شوری خاک و انتخاب تاریخ مناسب کشت بذر، می‌توان برنامه‌ریزی مصرف بهینه آب را به طور بهینه مدیریت نمود.

واژه‌های کلیدی: تلفات آب، دوره رشد، شوری خاک، نیاز آبی

مقدمه

های مهم کشاورزی در کشور محسوب می‌شود. اما گسترش زمین‌های شور، یکی از بزرگ‌ترین معضلات تهدیدکننده کشاورزی در این منطقه به‌شمار می‌رود (Uossef Gomrokchi et al., 2020). تنش شوری باعث کاهش پتانسیل آب خاک، کاهش جذب آب و عناصر غذایی مفید توسط گیاه، افزایش مقاومت روزنه‌ای برگ‌ها و کاهش تعرق گیاه

در شرایط کمبود منابع آب‌های باکیفیت در بخش کشاورزی و بحران شور شدن اراضی کشاورزی، مدیریت کاهش اثرات منفی تنش شوری بر گیاهان زراعی، همواره مورد توجه پژوهش‌گران بوده است. دشت قزوین با پهنه‌ای به وسعت حدود ۴۴۰ هزار هکتار، یکی از قطب

۱- دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
(Email: Saeidi@org.ikiu.ac.ir) (*- نویسنده مسئول)

می‌شود (Saeidi et al., 2021). در پژوهشی در آمریکا گزارش شد که با افزایش شوری آب آبیاری از ۰/۵ به ۲/۵، ۵ و ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر به ترتیب ۷، ۱۵ و ۳۰ درصد از مقدار تبخیر - تعرق ذرت کاسته شد (Lacerda et al., 2016). در پژوهشی اثر شوری خاک شامل سطوح (S₁) ۰/۵، (S₂) ۱/۷، (S₃) ۲/۵، (S₄) ۳/۵، (S₅) ۴/۵، (S₆) ۵/۵، (S₇) ۶/۵ و (S₈) ۷/۵ دسی‌زیمنس بر متر، بر میزان جذب آب توسط گیاه ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش شوری خاک، مقدار جذب آب در مراحل رشد اولیه، توسعه، میانی و پایانی به ترتیب با شیب ۶/۸۱، ۷/۴، ۹/۱۳ و ۴/۲۵ درصد کاهش یافت (Saeidi, 2023).

در شرایط تنش‌های محیطی، تاریخ مناسب کاشت بذر گیاه به‌منظور استفاده از شرایط زمانی بهینه، ابزار مهمی در کاهش عوارض ناشی از تنش‌ها می‌باشد (Andarzian et al., 2015). انتخاب بازه زمانی مناسب برای دوره رشد گیاه در اقلیم خاص یک منطقه، از جهت مقدار پارامترهای هواشناسی (مانند دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و ...) می‌تواند بر میزان تبخیر-تعرق گیاه مؤثر باشد. از این‌رو اعلام شد که با جداسازی شوری و وضعیت نامطلوب اقلیمی در دوره رشد گیاه، جزو عواملی هستند که می‌توانند اثر متقابلی بر جذب آب و نیاز آبی واقعی گیاه بگذارند. به‌عنوان نمونه در کشت لایسیمی ذرت نشان داده شد که حساسیت ذرت به تنش شوری، با افزایش تقاضای تبخیر اتمسفر (در دوره رشد گیاه) افزایش یافت (Katerji et al., 2004). در پژوهش دیگر با استفاده از آزمایش گلدانی در فضای آزاد نشان داده شد که میزان تقاضای تبخیر اتمسفر بر پاسخ گیاه ارزن به تنش شوری مؤثر بوده است (Choudhary et al., 2019). زیرا با افزایش تقاضای تبخیر اتمسفر، نیاز تبخیر-تعرق گیاه بالا رفته و در شرایط تنش شوری (که باعث کاهش جذب آب می‌شود)، این مسئله اثر مضاعف تنش‌زا به‌همراه دارد.

در پژوهش‌های گذشته اهمیت انتخاب تاریخ مناسب برای کاشت بذر گیاه نشان داده شده است. در کشور مصر اثر تاریخ‌های متفاوت کشت بذر و سطوح آبیاری بر میزان جذب NPK، عملکرد و بهره‌وری آب ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که به‌علت بالا بودن دما در تابستان و تغییرات اقلیمی در منطقه خشک مصر، کاشت بذر ذرت در شهریور ماه تحت ۷۰ درصد آبیاری (نسبت به شرایط استاندارد)، می‌تواند اثر بهینه بر جذب نیتروژن، صفات رشد گیاه و عملکرد محصول داشته باشد (Abaza et al., 2023). در تحقیق دیگر گیاه عدس در دو تاریخ ۱۵ و ۲۵ فروردین در منطقه قزوین کشت شد. نتایج نشان داد که از تاریخ کشت ۱۵ تا ۲۵ فروردین، عملکرد بیولوژیک محصول عدس دیم به‌ترتیب از ۱۱۳۸ به ۶۷۵ کیلوگرم بر هکتار تغییر یافت. یکی از علل نتایج مذکور، اثر افزایش دما به‌خصوص در مراحل حساس رشد گیاه (مانند گل‌دهی و پُر شدن دانه‌ها) بود. به این صورت که با به تأخیر افتادن تاریخ کاشت بذر، دوره گل‌دهی و پُر شدن دانه‌های عدس با اوج گرمای سال همراه شد و در نتیجه عملکرد محصول کاهش پیدا کرد

(Soulhani et al., 2012). در پژوهشی در منطقه گرگان، بهره‌وری مصرف آب چهار ژنوتیپ گندم نان در هفت تاریخ کاشت (از ۱۰ آبان تا ۱۰ دی‌ماه با فاصله ۱۰ روز از هم) بررسی شد. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیش‌ترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب در تاریخ کاشت‌های دوم و سوم (۲۰ و ۳۰ آبان) به‌دست آمد. در نتیجه انتخاب تاریخ کاشت بهینه، اثر تعیین‌کننده در مدیریت مصرف منابع آبی دارد (Sajadi et al., 2023).

در تعیین تاریخ بهینه کاشت، میزان تلفات تبخیر از سطح خاک مسئله مهمی است که به‌عنوان جزء نامطلوب در پارامتر تبخیر-تعرق گیاه محسوب می‌شود و نمی‌توان آن‌را نادیده گرفت. در این‌باره پژوهشی بر روی ذرت در کشور چین انجام شد و اجزاء تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه، با استفاده از روش میکرو لایسیمی برآورد شد. نتایج نشان داد که در طول دوره رشد ذرت، حدود ۴۰ درصد از مقدار کل تبخیر-تعرق گیاه ذرت به جزء تبخیر از سطح خاک اختصاص یافته است (Ferreira et al., 2012). از این‌رو اعلام شد که با جداسازی اجزاء تبخیر - تعرق ذرت به دو جزء تبخیر از خاک و تعرق گیاه، این امکان وجود دارد که تحلیل بهتری از بهره‌وری آب داشته و با این کار می‌توان مدیریت مصرف آب را بهینه‌سازی نمود (Zhou et al., 2017).

به‌این منظور می‌توان زمان کاشت بذر را طوری تعیین کرد که مرحله اولیه رشد گیاه در بازه زمانی با شرایط آب و هوایی متعادل و دمای پایین‌تر قرار گیرد. به‌دلیل این‌که براساس گزارش نشریه فائو-۵۶، مرحله اولیه رشد گیاه دارای بیش‌ترین میزان تبخیر از سطح خاک در کل دوره رشد گیاه می‌باشد. البته در شرایط تنش شوری، نقش جزء نامطلوب تبخیر برجسته‌تر می‌شود. زیرا به‌علت کاهش پتانسیل آب خاک در شرایط تنش شوری، جذب آب و تعرق گیاه کاهش یافته و جزء تبخیر همواره نقش رقابتی با تعرق گیاه (جزء مطلوب) ایفا می‌کند، تا سهم آب بیش‌تری به خود اختصاص دهد. به‌این صورت که در شرایط تنش شوری، آبی که باید سهم تعرق گیاه بشود، توسط گیاه جذب نشده و صرف تبخیر از سطح خاک می‌گردد (Saeidi, 2022 a). در تحقیقی مشابه (در دانشگاه تهران) گیاه ذرت در گلدان‌هایی با ارتفاع ۳۶ و قطر ۲۵ سانتی‌متر کاشته شد و اثر تنش شوری بر روی آن بررسی شد. تیمارهای شوری آب آبیاری شامل سطوح (S₁) ۱/۷، (S₂) ۳/۳۶، (S₃) ۶/۳۳ و (S₄) ۸/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر بود. جذب آب توسط گیاه در تیمارهای S₁، S₂، S₃ و S₄ (نسبت به شاهد)، به‌ترتیب ۸/۰۸، ۲۳/۷۵، ۴۴/۷۷ و ۶۵/۱۷ درصد (در فصل بهار) و ۴/۵، ۱۲/۸۴، ۲۹/۲۷ و ۴۲/۲۴ درصد (در فصل پاییز) کاهش یافت. نتایج نشان داد که در فصل بهار به‌علت بالاتر بودن تقاضای تبخیر اتمسفر (نسبت به پاییز)، سهم بیشتری از آب به جزء تبخیر اختصاص پیدا کرد و در نتیجه کاهش جذب آب با شدت بیشتری اتفاق افتاد (Bazrafshan et al., 2020).

تاکنون پاسخ اجزای تبخیر و تعرق گیاه ذرت به تغییر تاریخ کشت بذر در شرایط تنش شوری بررسی نشده است. از این‌رو هدف از پژوهش

حاضر با عنوان اثر تاریخ کاشت بر نرخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت، در شرایط تنش شوری تعیین می‌شود. در این تحقیق می‌توان اثر متقابل شرایط آب و هوایی دوره رشد گیاه و عامل تنش شوری را بر میزان تلفات تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه (نیاز آبی واقعی) مطالعه نمود. از نتایج حاصل می‌توان برای تعیین تاریخ مناسب کاشت ذرت در شرایط اعمال تنش شوری و مدیریت بهینه مصرف آب در منطقه مورد مطالعه، بهره‌برداری نمود.

مواد و روش‌ها

در سال ۱۴۰۱ پژوهشی در گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(۱) (شهر قزوین) با موقعیت جغرافیایی ۳۶° ۱۹' ۲۳" عرض شمالی و ۵۰° ۰۰' ۳۸" طول شرقی انجام شد. گیاه مورد مطالعه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴ بود. به‌منظور اعمال دقیق تنش شوری بر خاک و اندازه‌گیری میزان جذب آب توسط گیاه، بستر کشت به‌صورت مینی‌لایسیمترهای استوانه‌ای شکل با قطر ۴۰ و ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر انتخاب شد. البته در پژوهش‌های گذشته نیز از مینی‌لایسیمترهایی با ابعاد مذکور برای کشت ذرت استفاده شد (Saeidi, 2022 a; Dehghanisanij et al., 2018). برای کنترل شوری خاک (از طریق آبیاری)، اندازه‌گیری حجم و شوری زه‌آب خروجی، در کف هر

مینی‌لایسیمتر از لوله‌های سوراخ‌دار و فیلتر شن (به‌عنوان زهکش) استفاده شد. خاکی که داخل مینی‌لایسیمترها ریخته شد، مخلوطی از خاک مزرعه، ماسه بادی و کود حیوانی با نسبت ۱، ۳ و ۱ بود که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شد. در مورد میزان مناسب تراکم خاک، ابتدا اقدام به اندازه‌گیری چگالی ظاهری یک نمونه خاک آماده کشت (شخم خورده) در شرایط طبیعی مزرعه شد و سپس تراکم خاک داخل مینی‌لایسیمتر بر اساس آن تعیین شد. از این‌رو با توجه به حجم هر مینی‌لایسیمتر، وزن مشخصی از خاک به‌صورت لایه لایه به تراکم مذکور رسانده شد و با غرقاب نمودن آن، از هرگونه نشست احتمالی و جریان ترجیحی در خاک جلوگیری شد. در مورد نحوه کشت بذور ابتدا در داخل هر مینی‌لایسیمتر تعداد سه بذر به‌صورت دستی و با فواصل یکسان از هم کاشته شد. پس از جوانه‌زنی و رسیدن گیاهان به سه برگ، بهترین گیاه برای اعمال تیمارها باقی ماند و سایر گیاهان از سطح خاک حذف شدند. با توجه به مساحت خاک در هر مینی‌لایسیمتر و کاشت یک بوته در آن، تراکم تعداد بوته در واحد سطح منطبق بر تراکم استاندارد ۸۰۰۰۰ بوته در هکتار برای گیاه ذرت بود. در تحقیقی مشابه نیز با هدف بررسی تأثیر تنش شوری و قارچ میکوریزا بر ویژگی‌های مورفولوژیک گیاه ذرت، شیوه کشت گیاهان به‌صورت پژوهش حاضر گزارش شد (Dehghani et al., 2017).

جدول ۱- ویژگی‌های خاک مینی‌لایسیمتر

Table 1- Mini-lysimeter soil properties

پارامتر Parameter	واحد Unit	مقدار Amount
هدایت الکتریکی عصاره اشباع Electrical conductivity of saturated extract	dS.m ⁻¹	0.53
pH	-	7.3
بافت خاک Soil texture	-	لوم شنی Sandy loam
شن Sand	%	54
سیلت Silt	%	35
رس Clay	%	11
رطوبت جرمی در حد ظرفیت زراعی Moisture content at field capacity (FC)	%	24.5
رطوبت جرمی در نقطه پژمردگی دائم Moisture content at permanent wilting point (PWP)	%	10.6
جرم مخصوص ظاهری Bulk density	g.cm ⁻³	1.36

تیمارهای پژوهش

(P₂)، ۲۴ خرداد (P₃) و ۱۳ تیر (P₄) بود که با فاصله زمانی ۲۰ روز از هم انتخاب شد. کل طول دوره رشد گیاه برای تیمارهای تاریخ کاشت یکسان بود و مطابق با طول دوره رشد ذرت در نشریه فائو-۵۶، به مدت ۱۴۰ روز در نظر گرفته شد (Allen et al., 1998). باتوجه به این که تیمارهای تنش شوری پس از سه برگی شدن گیاه اعمال شد، تاریخ آن برای تیمارهای P₁، P₂، P₃ و P₄ به ترتیب ۲۹ اردیبهشت، ۱۸ خرداد، ۷ تیر و ۲۶ تیر بود. به طور کلی برای بررسی اثر دو عامل تنش شوری و تاریخ کاشت بذری بر مقادیر تبخیر-تعرق و اجزای آن، آزمایش به صورت فاکتوریل و در قالب طرح کاملاً تصادفی، با ۱۶ تیمار و سه تکرار اجرا شد. تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های واقعی (تبخیر-تعرق و اجزای آن) توسط نرم‌افزار SPSS و با آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

برنامه‌ریزی آبیاری

مقدار روزانه رطوبت خاک توسط دستگاه رطوبت‌سنج ساخت شرکت دلتاتی (ΔT) مدل HH₂، در مرکز سطح هر مینی‌لایسمتر و در عمق توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. در مورد نحوه تشخیص عمق توسعه ریشه گیاه، مینی‌لایسمترهای جداگانه‌ای برای این کار در نظر گرفته شد و با خارج کردن ریشه گیاه از خاک در مراحل مختلف رشد، ارتفاع آن‌ها اندازه‌گیری شد. در خصوص کار با دستگاه رطوبت‌سنج نیز قبل از شروع آزمایش، اعداد ثبت شده توسط دستگاه مذکور نسبت به مقادیر واقعی رطوبت خاک واسنجی شد. به این صورت که قبل از کشت، خاک یک مینی‌لایسمتر به طور کامل از آب اشباع شد و سینسور دستگاه رطوبت‌سنج در آن قرار داده شد. همراه با کاهش رطوبت خاک در روزهای آتی، اقدام به اندازه‌گیری هم‌زمان مقدار واقعی رطوبت خاک و قرائت عدد از روی دستگاه شد. سپس در یک نمودار، داده‌های واقعی رطوبت خاک در محور عمودی و داده‌های ثبت شده توسط دستگاه در محور افقی قرار داده شد و منحنی اِشیل (با معادله مشخص) برای تبدیل داده‌های دستگاه به داده‌های واقعی رطوبت تهیه شد (شکل ۱).

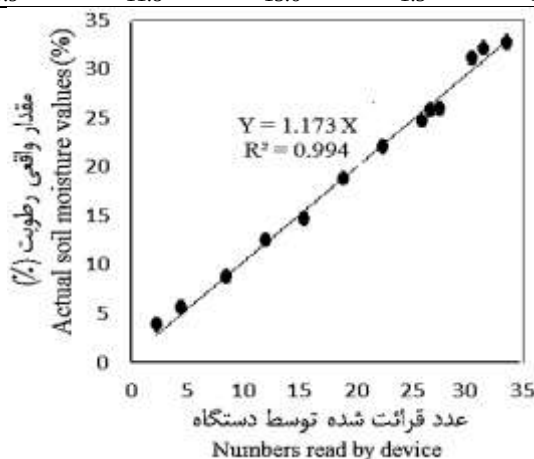
فاکتورهای مورد بررسی در پژوهش حاضر، دو عامل تنش شوری خاک و تاریخ کاشت بذری گیاه بود. تیمارهای شوری شامل شوری عصاره اشباع خاک در چهار سطح با هدایت الکتریکی (S₁) ۱/۷، (S₂) ۲/۵، (S₃) ۳/۸، (S₄) ۵/۹ دسی‌زیمنس بر متر بود که بر منطقه ریشه گیاه اعمال شد. علت انتخاب مقادیر مذکور این بود که براساس گزارش نشریه فائو-۲۹، S₁ سطح آستانه تحمل ذرت به شوری عصاره اشباع خاک بود و سطوح S₁، S₂ و S₃ محدوده‌ای بودند که عملکرد ذرت را به ترتیب ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد کاهش می‌دادند (Ayers & Westcot, 1985). برای جلوگیری از اثر تنش شوری بر جوانه‌زنی بذری، تیمارهای شوری پس از سه برگی شدن گیاه اعمال شد. تنش شوری از طریق آب آبیاری بر خاک اعمال شد. به این صورت که از ترکیب آب باکیفیت چاه (S₀=۰/۵ dS.m⁻¹) و زه‌آب بسیار شور (با شوری ۲۰۹ dS.m⁻¹) جمع شده در زهکش حائل شوره‌زار منطقه آبیکی قزوین، سطوح شوری در تیمارها تولید شد (جدول ۲). روش کار به این ترتیب بود که در زمان اعمال تیمارهای شوری، اولین آبیاری با هدف شور شدن عصاره اشباع خاک در حد تیمار مد نظر انجام شد. به طوری که ابتدا خروجی زهکش مینی‌لایسمتر بسته شد و پس از آبیاری با آب شور تا حد اشباع خاک، حدود سه ساعت فرصت داده شد تا خاک به صورت اشباع باشد. سپس خروجی مینی‌لایسمتر باز شد و با اندازه‌گیری شوری زه‌آب (متعادل شده)، اطمینان حاصل شد که شوری مدنظر به خاک اعمال شده است. پُر واضح بود که آبیاری پیوسته با آب در سطح شوری تیمارها باعث تجمع نمک‌ها در خاک و افزایش شوری خاک پس از هر نوبت آبیاری می‌شد. از این رو برای اعمال صحیح تنش‌ها، شوری خاک (در هر یک از سطوح S₁ تا S₄) در حد امکان و از طریق کنترل کسر آبشویی، ثابت نگه داشته شد. در پژوهشی مشابه که با هدف مدل‌سازی پاسخ گیاه ذرت به تنش شوری در خاکی با بافت لوم شنی انجام شد، میزان کسر آبشویی (LF^۱) به مقدار ۰/۵ در نظر گرفته شد تا شوری نیم‌رخ خاک در حد امکان یکنواخت شود (Akhtari et al., 2014). در پژوهش حاضر نیز با استناد به پژوهش مذکور و مشابهت بافت خاک، مقدار کسر آبشویی ۰/۵ انتخاب شد. البته اعمال تنش شوری در زمانی تأیید شد که میزان شوری زه‌آب خروجی از مینی‌لایسمتر با شوری آب ورودی به آن، به تعادل رسیده باشند.

از سوی دیگر فاکتور دوم پژوهش، تاریخ کاشت بذری بود. در استان قزوین، تاریخ مناسب کاشت بذری ذرت سینگل کراس ۷۰۴ از نیمه اردیبهشت ماه تا نیمه تیر ماه گزارش شد (Alikhani et al., 2015). از این رو تیمارهای تاریخ کاشت بذری در بازه زمانی مذکور تعیین شد. تیمارهای تاریخ کاشت بذری شامل ۱۵ اردیبهشت (P₁)، ۴ خرداد

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی منابع آب مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Qualitative properties of used water sources in the research

سطوح شوری Salinity level	هدایت الکتریکی Electrical conductivity (dS.m ⁻¹)	سدیم Sodium (meq.L ⁻¹)	منیزیم Magnesium (meq.L ⁻¹)	کلسیم Calcium (meq.L ⁻¹)	پتاسیم Potassium (meq.L ⁻¹)	سولفات Sulfate (meq.L ⁻¹)	بی‌کربنات Bicarbonate (meq.L ⁻¹)	کربنات Carbonate (meq.L ⁻¹)	کلر Chlorine (meq.L ⁻¹)
S ₀	0.5	2.36	0.88	1.35	0.2	1.42	1.12	0.41	1.74
S ₁	1.7	9.46	2.66	4	0.7	5.38	3.8	0.64	6.6
S ₂	2.5	14.8	3.6	5.7	0.87	7.8	5.7	0.8	10.5
S ₃	3.8	19.8	7.2	9.8	1.1	11.4	9.4	1.7	15.1
S ₄	5.9	29.9	11.8	15.6	1.5	19.4	14.2	3.7	21.3



شکل ۱- منحنی واسنجی مقادیر واقعی رطوبت خاک، نسبت به اعداد قرائت شده توسط دستگاه

Figure 1- Calibration curve of actual soil moisture values, relative to the numbers read by device

تخلیه مجاز: ۴۰ درصد رطوبت بین دو حد FC و PWP، θ_{FC} : رطوبت وزنی خاک در حد ظرفیت مزرعه (درصد) و θ_{PWP} : رطوبت وزنی خاک در حد نقطه پژمردگی دائم (درصد) می‌باشد.

از سوی دیگر حجم آب آبیاری باید طوری تعیین می‌شد تا کمبود رطوبت خاک ($\theta_{FC} - \theta_m$) جبران شده و تنش شوری تیمار مد نظر نیز از طریق آب آبیاری، بر خاک اعمال گردد. با توجه به مقدار کمبود رطوبت خاک در زمان آبیاری، جرم مخصوص خاک، عمق ریشه، کسر آبشویی و مساحت سطح خاک در هر مینی‌لایسیتر، حجم آب آبیاری با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد. در این شرایط ماهیت آب خروجی از انتهای مینی‌لایسیترها (نیاز آبشویی)، صرفاً بابت شستشوی املاح تجمع یافته در خاک (حاصل از آبیاری قبلی) و تعادل شوری خاک در حد تیمار مد نظر بوده است.

$$V_I = \left[\frac{(\theta_{FC} - \theta_m)}{100} \times \rho_b \times D \times A \right] \times (1 + LF) \quad (2)$$

V_I : حجم آب آبیاری (متر مکعب)، ρ_b : جرم مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)، D : عمق توسعه ریشه (متر)، A :

در برنامه‌ریزی آبیاری هدف این بود که هیچ‌گونه تنش آبی بر گیاهان اعمال نشود. از این‌رو زمان انجام آبیاری طوری تعیین شد که حتی در مراحل حساس رشد نیز، آب به‌صورت سهل‌الوصول در دسترس گیاه باشد. در این باره در پژوهشی در منطقه قزوین گزارش شد که حد آب سهل‌الوصول خاک (RAW) در حساس‌ترین مرحله رشد ذرت نیز بیش از ۴۰ درصد بوده است (Saeidi, 2021 b). بنابراین زمان آبیاری، پس از تخلیه ۴۰ درصد از رطوبت خاک بین دو حد ظرفیت مزرعه (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) تعیین شد. درصد رطوبت وزنی خاک در حد FC و PWP از طریق قرار دادن نمونه خاک اشباع در دستگاه صفحات فشاری (به‌ترتیب تحت فشارهای مکشی یک‌سوم و ۱۵ اتمسفر) و سپس خشک کردن خاک در گرم‌خانه، محاسبه و در جدول ۱ ارائه شد. برای اندازه‌گیری و کنترل مقدار پارامتر RAW نیز از رابطه (۱) استفاده شد.

$$RAW = \frac{\theta_{FC} - \theta_m}{\theta_{FC} - \theta_{PWP}} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، RAW : معرف حد آب سهل‌الوصول خاک (اعشار)، θ_m : مقدار رطوبت وزنی خاک (درصد) قبل از انجام آبیاری (پس از

3- Permanent wilting point, PWP

1- Readily available water, RAW

2- Field capacity, FC

مساحت سطح خاک (متر مربع) و LF : کسر آبشویی خاک بود که بر اساس توضیحات قبلی، عدد $0/5$ در نظر گرفته شد.

اندازه‌گیری تبخیر-تعرق و اجزاء آن

با اندازه‌گیری و احتساب حجم آب آبیاری، حجم زه‌آب و حد تخلیه مجاز رطوبت خاک ($RAW=0/4$)، از رابطه (۳) برای برآورد میزان تبخیر-تعرق گیاه (در فاصله بین دو آبیاری) استفاده شد (Saeidi, 2023). البته در مورد احتمال وقوع بارندگی و تأثیر آن بر شوری خاک این سناریو مطرح شد که اگر بارندگی اتفاق افتاد، میزان شوری خاک بلافاصله پس از بارندگی، کنترل و تنظیم گردد. در خصوص اندازه‌گیری تبخیر-تعرق برای شرایط مذکور، قرار شد که پایش رطوبت خاک و محاسبات تبخیر-تعرق در زمان بارندگی پایان یابد و پس از اتمام بارندگی، دور جدید محاسبات آغاز گردد.

$$ET_c = \left(\frac{V_i - V_d}{A} \right) - \left(\frac{\theta_m}{100} \times \rho_b \times D \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، ET_c : مقدار تبخیر-تعرق گیاه (متر) و V_d : حجم زه آب خروجی از مینی لایسمتر پس از آبیاری (متر مکعب) بود.

به‌منظور تفکیک تبخیر-تعرق و اندازه‌گیری اجزای آن، همه تیمارها و تکرارها در دو سری مینی لایسمتر اجرا شدند. در سری اول، سطح خاک مینی لایسمتر بدون پوشش و در حالت طبیعی قرار داشت. از این‌رو تغییرات کاهشی رطوبت خاک در بین دو آبیاری، نشان‌دهنده مجموع مقادیر دو پارامتر تبخیر و تعرق بود. اما در سری دوم مینی لایسمترها، برای حذف اثر تبخیر و برآورد جزء تعرق گیاه، از مالچ پلاستیکی با رنگ روشن و به‌صورت ورقه‌های نازک بر روی سطح خاک استفاده شد. به طوری که برای جلوگیری از جذب گرمای تابشی خورشید توسط مالچ و انتقال آن به خاک، مالچ پلاستیکی با فاصله ۵ سانتی‌متری از سطح خاک قرار داده شد. لذا تهویه مناسب در سطح خاک امکان‌پذیر شد و از تشکیل قطره‌های آب در زیر مالچ و تأثیر آن بر مقدار رطوبت خاک جلوگیری شد (Saeidi, 2021 a). بنابراین تغییرات کاهشی رطوبت خاک در سری دوم مینی لایسمترها فقط مربوط به تعرق گیاه بود و اختلاف آن با داده‌های سری اول، نشان‌دهنده مقدار تبخیر از سطح خاک بود.

روابط بین شوری و اجزای تبخیر-تعرق

در نشریه فائو-۲۹، رابطه (۴) با عنوان رابطه خطی مَس و هافمن (Mass & Hoffman, 1977) برای بررسی میزان کاهش عملکرد نسبی محصول در اثر افزایش شوری بیش از حد آستانه تحمل گیاه ارائه شد (Ayers & Westcot, 1985). در پژوهش حاضر با الهام گرفتن از رابطه (۴)، روابط (۵) الی (۷) برای بررسی میزان کاهش تبخیر-تعرق نسبی و اجزای آن در اثر افزایش شوری بیش از حد آستانه تحمل ذرت به‌کار گرفته شد.

$$Y = 100 - b (EC_e - EC_{e,th}) \quad (4)$$

در رابطه (۴): Y : عملکرد نسبی محصول (%)، b : درصد کاهش محصول به‌ازای افزایش هر واحد شوری، EC_e : هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (دسی‌زیمنس بر متر) و $EC_{e,th}$: آستانه تحمل گیاه به تنش شوری خاک (دسی‌زیمنس بر متر) است.

$$(ET/ET_{th}) = 100 - b_1 (EC_e - EC_{e,th}) \quad (5)$$

$$(T_r/T_{r,th}) = 100 - b_2 (EC_e - EC_{e,th}) \quad (6)$$

$$(E/E_{th}) = 100 - b_3 (EC_e - EC_{e,th}) \quad (7)$$

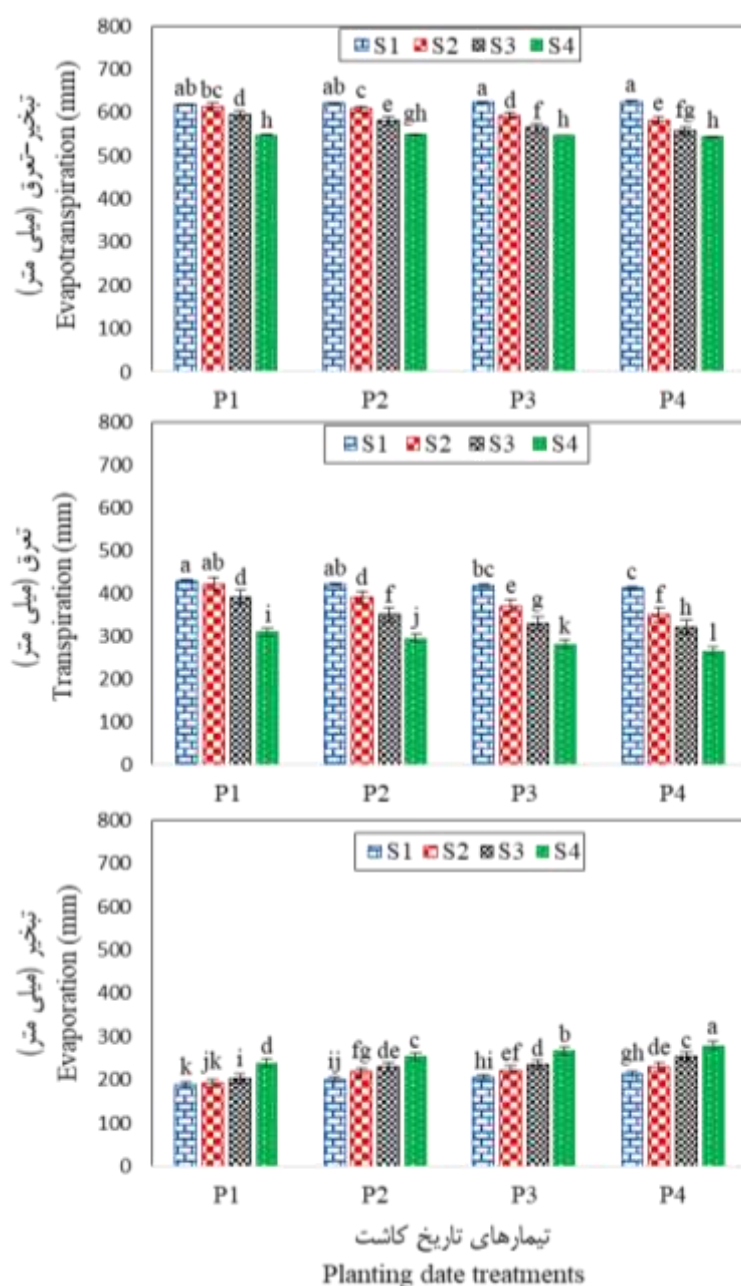
در روابط (۵) الی (۷): کسرهای $\frac{ET}{ET_{th}}$ ، $\frac{T_r}{T_{r,th}}$ و $\frac{E}{E_{th}}$ به‌ترتیب معرف تبخیر-تعرق نسبی (%، تعرق نسبی (% و تبخیر نسبی (%، آن‌هم نسبت به آستانه تحمل گیاه به تنش شوری بود. b_1 ، b_2 و b_3 به‌ترتیب درصد کاهش تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر به‌ازای افزایش هر واحد شوری، EC_e و $EC_{e,th}$ نیز طبق تعریف رابطه (۴) بوده است.

نتایج و بحث

تبخیر-تعرق و سهم اجزای آن

در این پژوهش مقادیر تبخیر-تعرق ذرت و اجزای آن، در چهار تاریخ کشت ۱۵ اردیبهشت (P_1)، ۴ خرداد (P_2)، ۲۴ خرداد (P_3) و ۱۳ تیر (P_4) و در سطوح شوری خاک شامل (S_1) $1/7$ ، (S_2) $2/5$ ، (S_3) $3/8$ ، (S_4) $5/9$ دسی‌زیمنس بر متر اندازه‌گیری شد. در سطوح شوری S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 مقدار تبخیر-تعرق به‌ترتیب برابر با 614 ، 595 و 548 میلی‌متر (تاریخ P_1)، 621 ، 608 ، 581 و 549 میلی‌متر (تاریخ P_2)، 624 ، 593 ، 565 و 547 میلی‌متر (تاریخ P_3) و 625 ، 582 ، 557 و 544 میلی‌متر (تاریخ P_4) بود. به‌همین ترتیب مقدار تعرق برابر با 429 ، 422 ، 391 و 309 میلی‌متر (تاریخ P_1)، 421 ، 390 ، 351 و 295 میلی‌متر (تاریخ P_2)، 418 ، 370 ، 330 و 281 میلی‌متر (تاریخ P_3) و 412 ، 351 ، 321 و 265 میلی‌متر (تاریخ P_4) و مقدار تبخیر برابر با 190 ، 192 ، 204 و 239 میلی‌متر (تاریخ P_1)، 200 ، 218 ، 230 و 254 میلی‌متر (تاریخ P_2)، 206 ، 223 ، 235 و 266 میلی‌متر (تاریخ P_3) و 213 ، 231 ، 254 و 279 میلی‌متر (تاریخ P_4) اندازه‌گیری شد. مقایسه میانگین داده‌های مذکور در شکل ۲ آورده شد. تیمارهای با حروف انگلیسی مشترک در شکل ۲، دارای اختلاف معنی‌دار در مقدار داده‌ها نبوده‌اند.

نتایج تجزیه واریانس در جدول ۳ نیز نشان داد که اثر دو عامل تنش شوری و تاریخ کشت بر صفات تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بوده است. علت این بود که با افزایش تنش شوری، میزان پتانسیل آب خاک، جذب آب و تعرق توسط گیاه کاهش پیدا کرد. البته در مقابل کاهش تعرق گیاه، آب باقی‌مانده در خاک صرف جزء نامطلوب تبخیر و افزایش آن شد. از این‌رو تعرق گیاه با شدت بیشتری نسبت به پارامتر تبخیر-تعرق کاهش یافت. نتایج مذکور در پژوهش‌های گذشته نیز تأیید شد.



شکل ۲- مقایسه میانگین مقادیر تبخیر-تعرق و اجزای آن در تاریخ‌های متفاوت کاشت

Figure 2- Comparison of average values of evapotranspiration and its components in different planting dates

جدول ۳- تجزیه واریانس صفات مورد بررسی
Table 3- Variance analysis of investigated traits

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Average of squares		
		تبخیر-تعرق Evapotranspiration	تبخیر Evaporation	تعرق Transpiration
تنش شوری Salinity stress	3	12570**	7215**	38138**
تاریخ کاشت Planting date	3	691**	3042**	5642**
تنش شوری × تاریخ کاشت Planting date × Salinity stress	9	278**	81**	416**
خطا Error	32	25	21	34

** نشان دهنده تفاوت معنی دار در سطح احتمال یک درصد

** : significant at 1%

(Guo et al., 2021). نکته مهم دیگر این که در شکل ۳ نشان داده شد که با تغییر تاریخ کاشت بذر و نزدیک شدن آن به روزهای گرم سال، نمودار دمایی در مرحله اولیه رشد، با افزایش مقدار همراه بود. از این رو در اثر تغییر در تاریخ کاشت بذر و قرارگیری مرحله اولیه رشد گیاه در گرم‌ترین روزهای سال، میزان تلفات تبخیر از سطح خاک به بیش‌ترین مقدار ممکن رسید. البته همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، در چنین شرایطی سطح تنش شوری وارد بر گیاه نیز اثر منفی مضاعف داشت و موجب کاهش جذب آب و انتقال سهم تعرق به سوی تلفات تبخیر شد. در پژوهشی مشابه دیگر اثر سطوح شوری آب آبیاری شامل (S₁) ۱/۷، (S₂) ۳/۳۶، (S₃) ۶/۳۳ و (S₄) ۸/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر، بر روی گیاه ذرت آزمایش شد. نتایج نشان داد که با افزایش تنش شوری، جذب آب توسط گیاه کاهش یافت. اما میزان کاهش جذب آب در فصل بهار (تقاضای تبخیر بالا) نسبت به فصل پاییز (تقاضای تبخیر پایین) متفاوت بود. یعنی در شرایط تقاضای تبخیر بالا (فصل بهار) نسبت به تقاضای تبخیر پایین (فصل پاییز)، حساسیت ذرت به تنش شوری بیشتر بود (Bazrafshan et al., 2020). در مقایسه با نتایج پژوهش اخیر این نکته قابل بحث بود که افزایش توان تبخیرکنندگی اتمسفر در کنار فاکتور تنش شوری، به‌طور مضاعف میزان جذب آب (توسط گیاه) را کاهش داده و اثر متقابل بر افزایش تلفات تبخیر از سطح خاک داشته‌اند. از این رو علاوه بر کنترل تنش‌های محیطی، باید مراحل رشد گیاه به‌گونه‌ای با وضعیت اقلیمی منطقه تطبیق داده شوند که اثر تنش دمایی محیط به کمینه مقدار خود برسد.

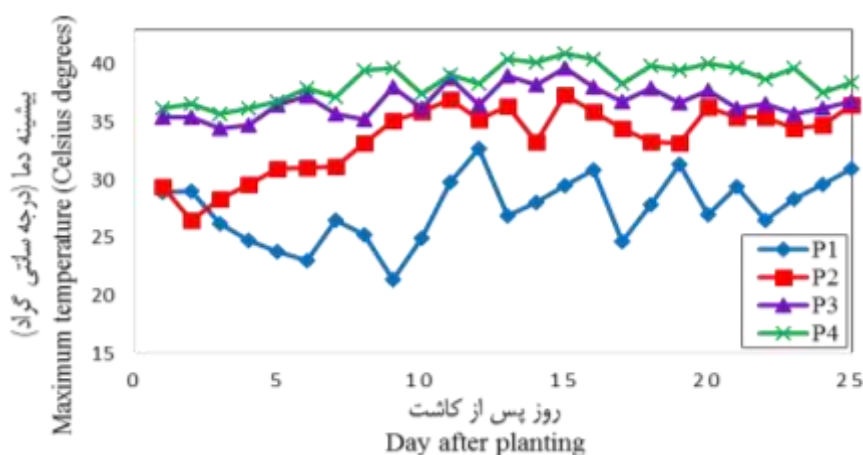
در مورد سهم اجزای تبخیر و تعرق گیاه ذکر می‌شود که با افزایش شوری خاک از سطح S₁ به S₄، سهم تعرق گیاه (T_r/ET_c) از ۶۹/۳ به ۵۶/۴ درصد (در کشت P₁)، ۶۷/۸ به ۵۳/۷ درصد (در کشت P₂)، ۶۷ به ۵۱/۴ درصد (در کشت P₃) و ۶۵/۹ به ۴۸/۷ درصد (در کشت P₄) رسید. به‌همین ترتیب سهم تبخیر (E/ET_c) از ۳۰/۷ به ۴۳/۶ درصد (در کشت P₁)، ۳۲/۲ به ۴۶/۳ درصد (در کشت P₂)، ۳۳ به ۴۸/۶ درصد

به‌طوری که در اقلیم نیمه‌خشک منطقه باجگاه (شیراز)، سه تیمار شوری آب آبیاری شامل (S₁) ۰/۶، (S₂) ۲ و (S₃) ۴ دسی‌زیمنس بر متر بر روی ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد در تیمارهای S₁، S₂ و S₃ مقدار تبخیر - تعرق به ترتیب ۷۶۰، ۷۵۴ و ۷۵۴ میلی‌متر، مقدار تعرق به ترتیب ۵۷۸، ۵۴۷ و ۵۱۰ میلی‌متر و مقدار تبخیر از سطح خاک به ترتیب ۱۸۳، ۲۱۳ و ۲۴۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شد (Azizian & Sepaskhah, 2014). در تحقیق دیگر اثر تنش شوری آب آبیاری با سطوح ۰/۵، ۲/۱، ۳/۵ و ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر بر گیاه ذرت اعمال شد. نتایج نشان داد که افزایش شوری آب از سطح ۰/۵ به ۵/۷ دسی‌زیمنس بر متر باعث شد که در کل دوره رشد ذرت میزان تبخیر-تعرق از ۴۲۰ به ۳۲۰ میلی‌متر، تعرق از ۲۸۵ به ۱۲۴ میلی‌متر و تبخیر از ۱۳۵ به ۱۹۶ میلی‌متر تغییر کند (Saeidi, 2022 b). باتوجه به نتایج پژوهش‌های گذشته، تنش شوری باعث کاهش میزان تبخیر-تعرق و تعرق گیاه و افزایش میزان تبخیر از سطح خاک شد، که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت داشت.

از سوی دیگر به‌سبب متغیر بودن مقادیر پارامترهای هواشناسی در روزها و ماه‌های مختلف، میزان تبخیر-تعرق و اجزای آن در تیمارهای تاریخ کاشت گیاه متفاوت بود. این قضیه که مراحل مختلف رشد گیاه در چه بازه زمانی و شرایط آب و هوایی قرار داشته‌اند، نکته حائز اهمیت و مؤثر بر مقدار اجزای تبخیر و تعرق گیاه بود. به‌دلیل این که در مرحله اولیه رشد گیاه، اندام‌های گیاهی از صفر تا ۱۰ درصد از سطح زمین را می‌پوشاند (فائو-۵۶) و جزء تبخیر (در مرحله اولیه رشد گیاه) دارای سهم غالب در پارامتر تبخیر-تعرق گیاه می‌باشد. پس اگر مرحله اولیه رشد گیاه هم‌زمان با روزهای اوج گرما باشد، تلفات تبخیر از سطح خاک افزایش می‌یابد. در این باره در آزمایشی بر روی ذرت در چین گزارش داده شد که بیشترین مقدار تبخیر از سطح خاک برابر با ۳/۹۱ میلی‌متر بر روز بود که در مرحله اولیه رشد ذرت اتفاق افتاد و کم‌ترین مقدار آن برابر با ۰/۱ میلی‌متر بر روز بود که در مرحله پایانی رشد انجام شد

و سهم تبخیر به همان اندازه افزایش یافت. از این رو در شرایط تنش شوری هر سهمی از تعرق گیاه که کاهش پیدا کرده است، به همان میزان به سهم تبخیر از سطح خاک افزوده شده است.

(در کشت P_3) و $34/1$ به $51/3$ درصد (در کشت P_4) رسید. به این معنا که در شرایط تنش شوری مذکور و در تاریخ‌های کشت P_3 ، P_2 و P_4 سهم تعرق گیاه به ترتیب $12/9$ ، $14/1$ ، $15/6$ و $17/2$ درصد کاهش



شکل ۳- مقدار بیشینه دما در بازه زمانی مرحله اولیه رشد گیاه، در تاریخ‌های مختلف کشت

Figure 3- The maximum temperature value in the time of crop initial growth stage, in different planting dates

روابط تبخیر-تعرق و اجزاء آن با تنش شوری

در شکل ۴ رابطه تبخیر-تعرق (ET)، تعرق (T_r) و تبخیر (E) (متغیرهای وابسته) نسبت به میزان شوری خاک (متغیر مستقل) بررسی شد. از نکات قابل بحث در شکل مذکور، شیب کاهشی دو پارامتر ET و T_r و شیب افزایشی پارامتر E ، در اثر افزایش تنش شوری بود. در اصل T_r که نشان‌دهنده جذب آب و تعرق گیاه بود، با شدت بیشتری نسبت به ET کاهش یافت. اما خنثی شدن شدت کاهشی T_r توسط شیب افزایشی E در شرایط تنش شوری، باعث شد که شیب کاهشی ET تعدیل شده و حساسیت کمتری را نشان دهد. از این رو لازم است که در شرایط واقعی به جای پارامتر ET ، جزء T_r که نشان‌دهنده نیاز خالص آبی واقعی گیاه است، بررسی شده و توصیه‌های مدیریتی بر اساس آن صورت پذیرد.

از سوی دیگر تغییر تاریخ کاشت بذر نیز بر شیب تغییرات تبخیر-تعرق و اجزای آن (نسبت به تنش شوری) مؤثر بود. به طوری که با نزدیک شدن به فصل گرم سال، تقاضای اتمسفر برای تبخیر و رقابت بین دو جزء تعرق و تبخیر (برای تصاحب آب) شدت گرفت. در نتیجه تعویق تاریخ کاشت بذر و عدم استفاده از شرایط بهینه آب و هوایی (در فصل بهار) منجر به زیان دیدن جزء مطلوب تعرق و افزایش جزء نامطلوب تبخیر گردید. از این رو برای شرایط واقعی در مزرعه توصیه کاربردی این خواهد بود که در فصل گرم سال (به خصوص در ماه‌های تیر و مرداد)، نباید فرایند کاشت بذر آغاز گردد. اما این در حالی است که در اغلب کشت‌های آبی که به عنوان کشت دوم مزارع در نظر گرفته

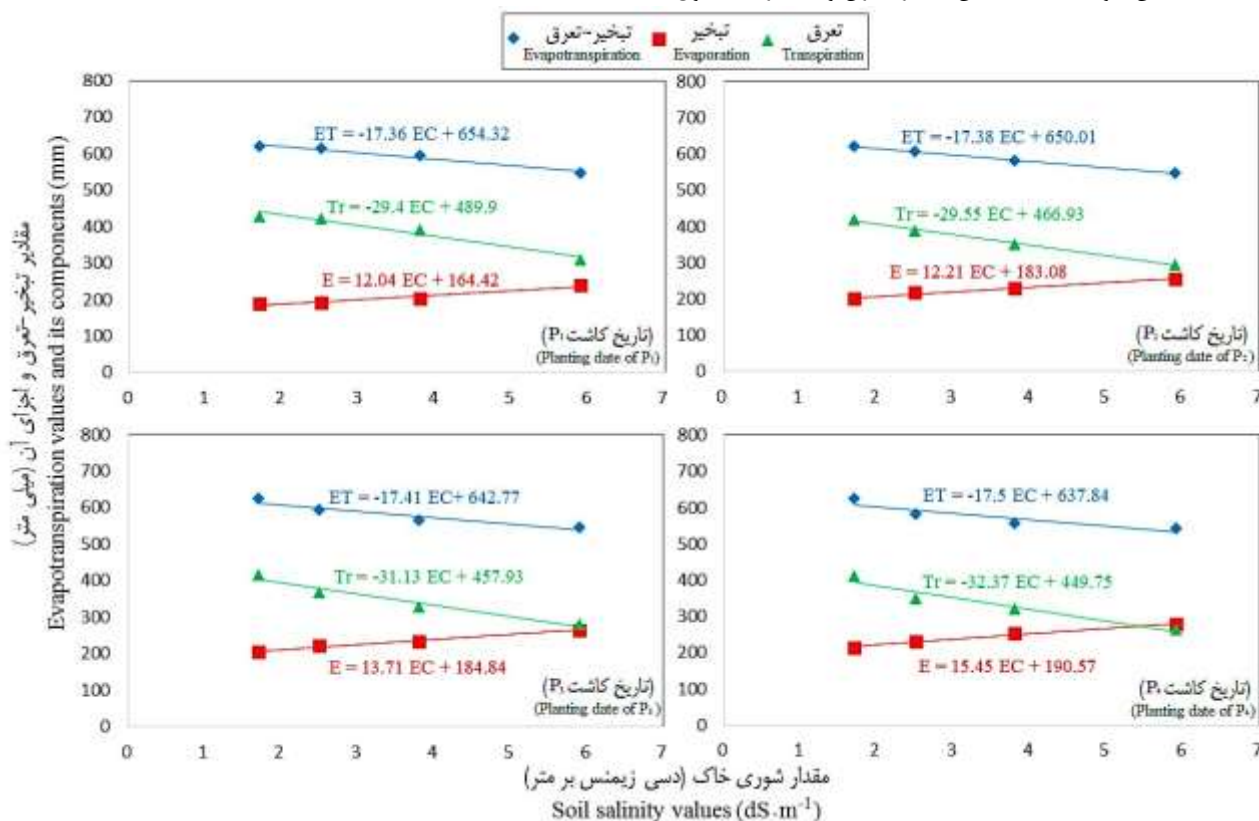
البته این نکته هم نشان داده شد که تغییر دادن تاریخ کاشت بذر برای استفاده بهینه از شرایط معتدل اتمسفری در مراحل رشد گیاه، می‌تواند از افزایش سهم تبخیر جلوگیری نماید. در پژوهش عزیزیان و سپاسخواه (Azizian & Sepaskhah, 2014) و برای شرایط شوری آب آبیاری با سطوح S_1 ($0/6$)، S_2 (2) و S_3 (4 دسی‌زیمنس بر متر نیز نشان داده شد که با افزایش شوری، سهم تعرق گیاه ذرت کاهش و سهم تبخیر افزایش یافته است. به طوری که در تیمارهای S_1 ، S_2 و S_3 سهم تعرق گیاه به ترتیب 76 ، 72 و 68 درصد و سهم تبخیر از سطح خاک به ترتیب 24 ، 28 و 32 درصد برآورد شد. در پژوهش دیگر، اثر شش سطح آبیاری شامل 100 ، 85 ، 75 ، 70 ، 55 و 40 درصد نیاز آبی گیاه، بر روی ذرت انجام شد. نتایج نشان داد که به طور مشابه اثر تنش آبی باعث کاهش سهم تعرق گیاه از 87 به 73 درصد و افزایش سهم تبخیر از 13 به 27 درصد شده بود (Trout & Dejonge, 2017). از این رو پاسخ اجزای تبخیر و تعرق نسبت به تنش‌های محیطی در پژوهش‌های گذشته، با پژوهش حاضر مطابقت داشت. جمع‌بندی نتایج این بخش از پژوهش بر انتخاب تاریخ مناسب کشت بذر، جهت کاهش اثر متقابل تنش شوری و تنش فصلی اتمسفر تأکید دارد. به طوری که با کاشت بذر در زمان‌های نزدیک به تاریخ P_1 ، می‌توان از اثرات منفی اتمسفر در فصل گرم سال که بر اجزای تبخیر و تعرق می‌گذارد، حتی الامکان جلوگیری نمود. زیرا افزایش تنش‌های دمایی در محیط رشد گیاه بر افزایش مقاومت و انسداد روزنه‌ها، کاهش تعرق گیاه و افزایش جزء تبخیر (به خصوص در سطح فاقد پوشش گیاهی در مرحله اولیه رشد گیاه) مؤثر خواهد بود.

ذرت شد و منطبق بر نتایج پژوهش حاضر بود.

در شکل ۵ روابط تبخیر-تعرق-شوری، تعرق-شوری و تبخیر-شوری براساس رابطه مس-هافمن (Mass & Hoffman, 1977) ارائه شد. روابط مذکور نشان دادند که به ازای هر یک واحد (دسی‌زیمنس بر متر) افزایش تنش شوری خاک نسبت به حد آستانه تحمل گیاه ذرت، پاسخ پارامترهای تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر چگونه بوده است. بر این اساس در تاریخ‌های کشت P_1 , P_2 , P_3 , P_4 و به‌ازای افزایش یک دسی‌زیمنس بر متر شوری خاک، میزان تبخیر-تعرق به‌ترتیب $۲/۸۲$, $۲/۵۱$, $۳/۳$ و $۳/۶۵$ درصد کاهش، میزان تعرق به‌ترتیب $۶/۱$, $۷/۳۴$, $۸/۴۲$ و $۹/۲$ درصد کاهش و میزان تبخیر به‌ترتیب $۵/۵$, $۶/۷$, ۷ و $۷/۸۲$ درصد افزایش داشت. از این‌رو با انتخاب تاریخ بهینه برای کاشت گیاه، می‌توان اثرات منفی تنش شوری بر اجزای تبخیر-تعرق گیاه را مدیریت نمود. به‌طور مشابه رابطه مس-هافمن برای عملکرد محصول ذرت تحت سطوح شوری آب آبیاری شامل $۳/۸$, $۳/۱$, $۲/۴$, $۱/۷$, ۱ , $۰/۳$ و $۴/۵$ دسی‌زیمنس بر متر، به‌صورت $Y/Y_{max}=1-0.21(EC_i-1.7)$ برآورد شد (Blanco et al., 2008).

می‌شوند، در ماه‌های گرم سال اقدام به بذریاشی می‌شود. در این‌باره در شکل ۴ مشاهده شد که در تاریخ کاشت P_4 ، رسیدن شوری خاک به سطح S_4 ($۵/۹$ دسی‌زیمنس بر متر) منجر به غلبه جزء E بر Tr و در نتیجه کاهش راندمان تبخیر-تعرق ذرت به کمتر از ۵۰ درصد شده است. این مسئله نکته مهمی بوده و نشان‌دهنده اتحاد تنش شوری و تاریخ نامناسب کشت بر افزایش تلفات آبی، از طریق فرآیند تبخیر بوده است.

در پژوهش‌های گذشته چندان پاسخ اجزای تبخیر و تعرق ذرت به سطوح شوری خاک و تاریخ‌های مختلف کشت، بررسی نشده است. اما به‌طور مشابه در تحقیقی با تیمارهای شوری آب آبیاری شامل $۰/۵$, $۲/۵$ و $۷/۵$ دسی‌زیمنس بر متر، بین مقدار تبخیر-تعرق گیاه ذرت و سطح شوری آب، رابطه خطی $ET=-0.717 EC+15.07$ ارائه شد (Lacerda et al., 2016). در پژوهش دیگر تنش شوری در مراحل رشد ۴ برگی، گل‌دهی و شیری شدن دانه‌های ذرت اعمال شد و به ترتیب روابط $Y=-13.1EC+122$ ، $Y=-7.6EC+149$ و $Y=-10.9EC+131$ بین عملکرد محصول و میزان شوری برازش داده شد (Saeidi et al., 2019). از این‌رو در پژوهش‌های مذکور نشان داده شد که تنش شوری باعث کاهش تبخیر-تعرق و عملکرد محصول



شکل ۴- پاسخ تبخیر-تعرق ذرت و اجزای آن به افزایش شوری عصاره اشباع خاک

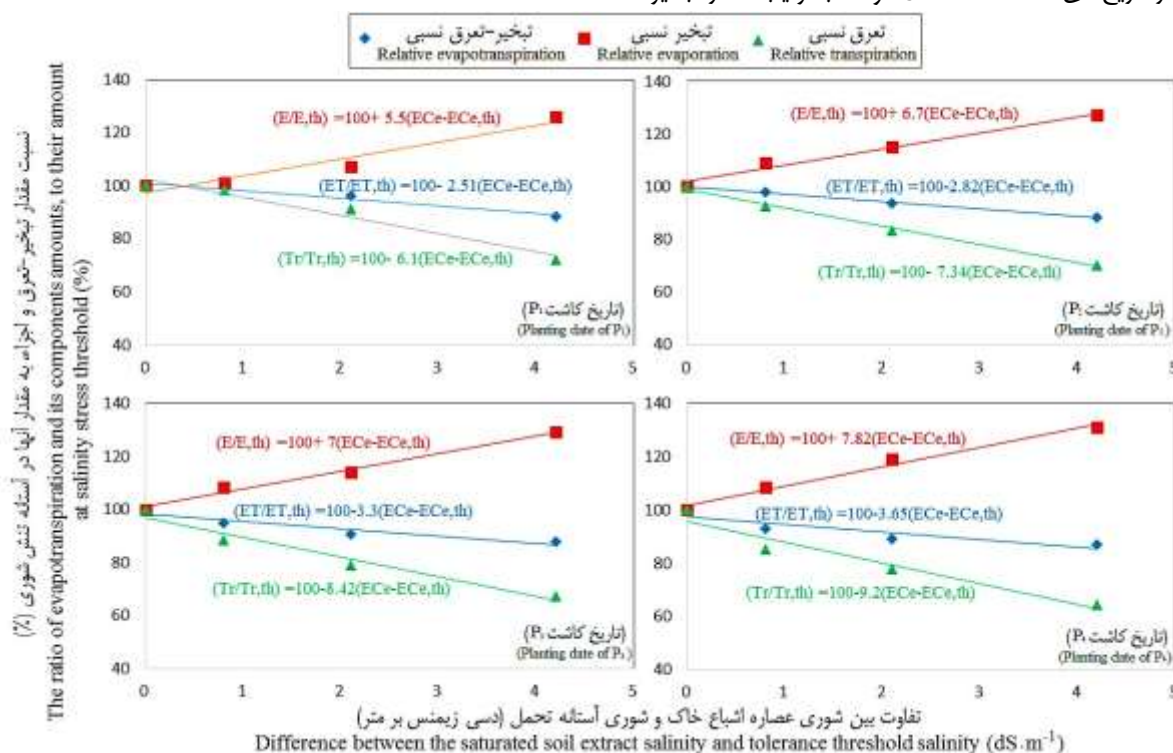
Figure 4- Response of maize evapotranspiration and its components to increasing of saturated soil extract salinity

تعرق ۱۱/۴، ۱۱/۶، ۱۲/۳ و ۱۳ درصد کاهش، مقدار تعرق ۲۸، ۳۰، ۳۲/۸ و ۳۵/۷ درصد کاهش و مقدار تبخیر ۲۵/۸، ۲۷، ۲۹/۱ و ۳۱ درصد افزایش داشته باشد. دلیل نتایج مذکور این بود که با افزایش میزان شوری خاک، مقدار پتانسیل آب خاک، جذب آب و تعرق توسط گیاه کاهش پیدا کرد. از سوی دیگر با تغییر تاریخ کاشت بذر از P_1 تا P_4 و به علت نزدیک شدن به روزهای گرم سال، برهمکنش دو عامل تنش شوری و توان تبخیرکنندگی اتمسفر برای کاهش تعرق گیاه و افزایش تبخیر از سطح خاک، به اوج خود رسید. این مسئله به این صورت تبیین شد که در صورت تأمین نیاز تبخیر-تعرق گیاه، همواره رقابت تصاحب آب بین دو جزء تعرق (جزء مطلوب) و تبخیر (جزء نامطلوب) برقرار است. اما در شرایط اعمال تنش شوری، راندمان جذب آب توسط گیاه کاهش یافته و بخشی از آن آبی که به عنوان سهم تعرق گیاه (در شرایط استاندارد منطقه) وجود داشته است، به جزء تبخیر انتقال داده می‌شود. در این میان تاریخ کاشت بذر باید به گونه‌ای تعیین شود که مرحله اولیه رشد گیاه (به دلیل فاقد پوشش گیاهی مناسب در سطح خاک)، دارای معتدل‌ترین شرایط آب و هوایی در کل دوره رشد گیاه باشد.

در پژوهش دیگر تحت چهار سطح تنش شوری آب آبیاری شامل (S_1) ۱/۷، (S_2) ۳/۳۶، (S_3) ۶/۳۳ و (S_4) ۸/۳۵ دسی‌زیمنس بر متر، رابطه مس-هافمن برای جذب نسبی آب توسط گیاه ذرت به صورت $X=100-8.3(EC_i-1.48)$ ارائه شد (Bazrafshan et al., 2020). نتایج پژوهش اخیر از نظر شیب کاهش جذب آب، به نتایج پژوهش حاضر نزدیک بود. جمع‌بندی کلیه نتایج این نکته را خاطر نشان می‌کند که بازه زمانی دارای بیشینه دما در محیط مزرعه (به دلیل افزایش توان تبخیرکنندگی اتمسفر) و به طور هم‌زمان مواجه بودن با تنش شوری، عواملی هستند که برهمکنش آن‌ها موجب کاهش جذب آب توسط گیاه و افزایش تلفات آب (تبخیر) می‌گردد. به طوری که سطح شوری S_4 و تاریخ کاشت P_4 در پژوهش حاضر، دارای بدترین شرایط برای جذب آب توسط گیاه ذرت و بیشینه تلفات تبخیر بوده است. در نتیجه ایجاد شرایط مناسب برای گیاه، نیازمند مدیریت دوجانبه از لحاظ انتخاب تاریخ بهینه کشت و کنترل شوری خاک می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که اثر دو عامل تنش شوری و تاریخ کاشت بذر بر مقدار صفات تبخیر-تعرق، تعرق و تبخیر، در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. افزایش شوری خاک از سطح S_1 به S_4 باعث شد که در تاریخ‌های کاشت P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 به ترتیب مقدار تبخیر-



شکل ۵- پاسخ تبخیر-تعرق نسبی و اجزای آن به افزایش شوری عصاره اشباع خاک، در تاریخ‌های مختلف کشت

Figure 5- Response of relative evapotranspiration and its components amounts, to increasing of saturated soil extract salinity, in different planting dates

تعرق به عنوان نیاز خالص آبی واقعی گیاه، مشاهده شد. کاربرد رابطه مَس-هافمن نیز نشان داد که به ازای افزایش هر یک دسی-زیمنس بر متر شوری خاک، میزان تبخیر-تعرق بین ۲/۵۱ تا ۳/۶۵ درصد کاهش، تعرق بین ۶/۱ تا ۹/۲ درصد کاهش و میزان تبخیر نیز بین ۵/۵ تا ۷/۸۲ درصد افزایش داشته است. در نتیجه برای مزارعی که با تنش شوری خاک مواجه هستند، توصیه می شود که حتی المقدور با انتخاب تاریخ مناسب کشت به خصوص در کشت های دوم سال، از مضرات ناشی از تنش های دمایی و توان تبخیرکنندگی اتمسفر در روزهای گرم سال اجتناب نمایند.

در نتیجه بالاترین سطح تنش شوری موجب شد که در تاریخ های کاشت P_1 ، P_2 ، P_3 و P_4 سهم تعرق گیاه به ترتیب ۱۲/۹، ۱۴/۱، ۱۵/۶ و ۱۷/۲ درصد کاهش و سهم تبخیر به همان اندازه افزایش یابد. از این رو سطح شوری S_1 و تاریخ کاشت P_1 در پژوهش حاضر، دارای شرایط بهینه برای جذب آب توسط گیاه ذرت و کمینه تلفات تبخیر بود. روابط بین تبخیر-تعرق و اجزای آن با تنش شوری نشان داد که جزء تعرق گیاه با شیب بیشتری نسبت به پارامتر تبخیر-تعرق کاهش یافت. تا جایی که در تاریخ کاشت P_4 و سطح شوری S_4 مقدار تبخیر بر تعرق غلبه کرد و راندمان جذب آب توسط گیاه به کم تر از ۵۰ درصد رسید. از این رو در شرایط تحت تنش شوری، لزوم در نظر گرفتن جزء

References

1. Abaza, A., Elshamly, A., Alwahibi, M., Elshikh, M., & Ditta, A. (2023). Impact of different sowing dates and irrigation levels on NPK absorption, yield and water use efficiency of maize. *Scientific Reports*, 13, 12956. 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40032-9>
2. Akhtari, A., Homaee, M., & Hoseini, Y. (2014). Modeling plant response to salinity and soil nitrogen deficiency. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 3(4), 33-49. (In Persian with English abstract)
3. Alikhani, F., M.Zamani, D., & Yousefi, R. (2015). Determining the probability of proper work days for operations of sewing corn in Qazvin Province. *Journal of Bio Systems Engineering*, 4(2), 1-19. (In Persian with English abstract)
4. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation Drainage Paper No.56*. Pp. 1-326.
5. Andarzian, B., Hoogenboom, G., Bannayan, M., & Shirali, M. (2015). Determining optimum sowing date of wheat using CSM-CERES-Wheat model. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(2), 189-199. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.04.004>
6. Ayers, R.S., & Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage Paper No.29*. Pp. 32.
7. Azizian, A., & Sepaskhah, A.R. (2014). Maize response to water, salinity and nitrogen levels: yield-water relation, water-use efficiency and water uptake reduction function. *Journal of Plant Production*, 8(2), 183-214. <https://doi.org/10.22069/IJPP.2014.1524>
8. Bazrafshan, A., Shorafa, M., Mohammadi, M.H., & Zolfaghari, A.A. (2020). Maize response to salinity stress using water uptake models in different seasons. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2171-2182. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.281105.668201>
9. Blanco, F.F., Folegatti, M.V., Gheyi, H.R., & Fernandes, P.D. (2008). Growth and yield of corn irrigated with saline water. *Journal of Scientia Agricola*, 65(6), 574-580. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600002>
10. Choudhary, S., Vadez, V., Hash, C.T., & Kishor, P.K. (2019). Pearl millet mapping population parents: performance and selection under salt stress across environments varying in evaporative demand. *Journal of Biological Sciences*, 89(1), 201-211. <https://doi.org/10.1007/s40011-017-0933-1>
11. Dehghani, A., Kazemeini, S.A., Zarei, M., & Alinia, M. (2017). Effects of salt stress and mycorrhiza fungi on morpho-physiological characteristics of sweet corn. *Journal of Crop Production and Processing Isfahan University of Technology*, 7(1), 101-113. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jcpp.7.1.101>
12. Dehghanisanij, H., Kanani, E., & Akhavan, S. (2018). Evaluation of corn evapotranspiration and its components and relationship between leaf area index and components in surface and subsurface drip irrigation systems. *Journal of Water and Soil*, 31(6), 1549-1560. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V31I6.64019>
13. Ferreira, M.I., Silvestre, J., Conceic, N., & Malheiro, A.C. (2012). Crop and stress coefficients in rain fed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Journal of Irrigation Science*, 30, 433-447. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0352-2>
14. Guo, T., Liu, C., Xiang, Y., Zhang, P., & Wang, R. (2021). Simulations of the soil evaporation and crop transpiration beneath a maize crop canopy in a humid area. *Journal of Water*, 13(14), 1-13. <https://doi.org/10.3390/w13141975>
15. Katerji, N., van Hoorn, J.W., Hamdy, A., & Mastrorilli, M. (2004). Comparison of corn yield response to plant water stress caused by salinity and by drought. *Journal of Agriculture Water Management*, 65, 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2003.08.001>
16. Lacerda, C.F., Ferreira, J.F.S., Liu, X., & Suarez, D.L. (2016). Evapotranspiration as a criterion to estimate nitrogen

- requirement of maize under salt stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 202, 192-202. <https://doi.org/10.1111/jac.12145>
17. Maas, E.V., & Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance: Current assessment. *Journal of Irrigation Drainage*, ASCE, 103, 115-134.
18. Saeidi, R., Soltani, M., Liaghat, A.M., & Sotoodehneia, A. (2019). The effect of salinity on maize yield in various growth stages. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(8), 1975-1983. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2019.275824.668125>
19. Saeidi, R. (2021 a). Separation the evaporation and transpiration in maize cultivation and investigation of their response to different irrigation levels. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(5), 1263-1273. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.318297.668881>
20. Saeidi, R. (2021 b). Effect of drought and salinity stress in estimation of forage maize yield through of periodic evapotranspiration, with using of different models. *Journal of Water Research in Agriculture*, 35(2), 107-121. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2021.355044.876>
21. Saeidi, R., Ramezani-Etedali, H., Sotoodehnia, A., Kaviani, A., & Nazari, B. (2021). Salinity and fertility stresses modifies K_s and readily available water coefficients in maize (Case study: Qazvin region). *Journal of Irrigation Science*, 39, 299-313. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00711-1>
22. Saeidi, R. (2022 a). Evaluation of multivariate regression models in estimation of evaporation and transpiration components of maize, under salinity stress conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(1), 71-84. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2022.335453.669157>
23. Saeidi, R. (2022 b). Determination of salinity stress coefficient in the different growth stages of forage maize. *Journal of Water Research in Agriculture*, 36(1), 75-92. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/jwra.2022.356739.902>
24. Saeidi, R. (2023). The sensitivity effect of maize growth stages on application of water uptake reduction functions, under salinity stress conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(4), 597-612. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2023.357997.669488>
25. Sajadi, F., Sharifan, H., Soughi, H., & Abdolhosseini, M. (2023). Investigating the performance and water productivity of wheat cultivars in different sowing dates and irrigation conditions (a case study in Gorgan Plain). *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(1), 91-110. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.20969.3609>
26. Soltani, M., Liaghat, A.M., & Sotoodehneia, A. (2012). Conjunctive effect of planting date and time of supplementary irrigation on water productivity of lentil in rainfed conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 43(3), 243-248. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2012.29286>
27. Uossef Gomrokchi, A., Akbari, M., Hassanoghli, A., & Younesi, M. (2020). Monitoring soil salinity and vegetation using multispectral remote sensing data in interceptor drain of salt marsh in Qazvin plain. *Journal of Geography and Environmental Sustainability*, 10(1), 37-52. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22126/GES.2020.4434.2103>
28. Trout, T.J., & Dejonge, K.C. (2017). Water productivity of maize in the US high plains. *Journal of Irrigation Science*, 35, 251-266. <https://doi.org/10.1007/s00271-017-0540-1>
29. Zhou, S., Liu, W., & Lin, W. (2017). The ratio of transpiration to evapotranspiration in a rain fed maize field on the Loess Plateau of China. *Journal of Water Science and Technology*, 17(1), 221-228. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.108>

Assessment of the Performance of Various Wavelet Transforms in Combined Wavelet-neural Network Modeling for Monthly River Flow Prediction (Case Study: Kardeh Watershed)

A. Kazemi Choolanak¹, F. Modaresi^{ID 2*}, A. Mosaedi^{ID 3}

1, 2 and 3- Master's Degree Student, Assistant Professor and Professor in Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

Received: 15-01-2024
Revised: 26-02-2024
Accepted: 03-03-2024
Available Online: 03-03-2024

How to cite this article:

Kazemi Choolanak, A., Modaresi, F., & Mosaedi, A. (2024). Assessment of the performance of various wavelet transforms in combined wavelet-neural network modeling for monthly river flow prediction (Case study: Kardeh watershed). *Journal of Water and Soil*, 38(2), 191-206. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86414.1371>

Introduction

Predicting river flow is one of the most crucial aspects in water resources management. Improving forecasting methods can lead to a reduction in damages caused by hydrological phenomena. Studies indicate that artificial neural network models provide better predictions for river flow compared to physical and conceptual models. However, since these models may not offer reliable performance in estimating unstable data, using preprocessing techniques is necessary to enhance the accuracy and performance of artificial neural networks in estimating hydrological time series with nonlinear relationships. One of these methods is wavelet transformation, which utilizes signal processing techniques.

Materials and Methods

In this study, to evaluate the efficiency of discrete and continuous wavelet types in the Wavelet-Artificial Neural Network (WANN) hybrid model for monthly flow prediction, a case study was conducted on the Kardeh Dam watershed in the northeast of Iran, serving as a water source for part of Mashhad city and irrigation downstream agricultural lands. Monthly streamflow estimates for the upstream sub-basin of the Kardeh Dam were obtained from the meteorological and hydrometric stations' monthly statistics over a 30-year period (1991-2020). The WANN model is a hybrid time series model where the output of the wavelet transform serves as a data preprocessing method entering an artificial neural network as the predictive model. The combination of wavelet analysis and artificial neural network implies using wavelet capabilities for feature extraction, followed by the neural network to learn patterns and predict data, potentially enhancing the models' performance by leveraging both methods. The 4-fold cross-validation method was employed for the artificial neural network model validation, where the model underwent validation and accuracy assessment four times, each time using 75% of the data for training and the remaining 25% for model validation. The final results were presented by averaging the validation and accuracy results obtained from each of the four model runs. To evaluate and compare the performance of the models used in this study, three evaluation indices, Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Root Mean Square Error (RMSE), and Pearson correlation coefficient (R), were employed.

Results and Discussion



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86414.1371>

The analysis of meteorological and hydrometric data in this study revealed that monthly streamflow in two time steps, T-1 and T-2, were the most effective predictive variables. Each of the two runoff variables of the previous month (Qt-1) and the previous two months (Qt-2) were analyzed by each of the Haar and Fejer-Korovkin2 discrete wavelet transforms and the two continuous Symlet3 and Daubechies2 wavelets at three levels. The results of each level of decomposition was given as input to the ANN model. The presented results at each decomposition level indicated that hybrid models could accurately predict lower flows compared to the single ANN model, and the estimation of maximum values also significantly improved in the hybrid models. Among the wavelets used, Haar wavelets exhibited the weakest performance, and the less commonly employed Kf2 wavelet showed a moderate performance. Since the Haar and Fk2 wavelets, with their discrete structure, did not perform well in decomposing continuous monthly streamflow data, continuous wavelet models outperformed discrete wavelet models. The hybrid models, combining wavelet analysis and artificial neural networks, demonstrated up to an 11% improvement over the performance of the single neural network model.

Conclusion

Streamflow is a crucial element in the hydrological cycle, and predicting it is vital for purposes such as flood prediction and providing water for consumption. The objective of this research was to evaluate the performance of different types of discrete and continuous wavelet models at various decomposition levels in enhancing the efficiency of artificial neural network (ANN) models for streamflow prediction. Since climate and watershed characteristics can influence the nature of data fluctuations and, consequently, the results of the wavelet model decomposition, choosing an appropriate wavelet model is essential for obtaining the best results. Considering the existing variations in the results of different studies regarding the selection of the best wavelet type, it is suggested to use both continuous and discrete wavelet types in modeling to achieve the best predictions and select the optimal results. Given that a lower number of input variables in neural network models lead to higher accuracy in modeling results, it is recommended to perform decomposition at a two-level depth to reduce input components to the neural network model, thereby reducing the model execution time.

Keywords: Artificial Neural Network, Continuous wavelet, Cross-validation, Discrete wavelet, Hybrid model, Wavelet transform

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۱۹۱-۲۰۶

ارزیابی کارایی انواع تبدیل موجک در مدل‌سازی ترکیبی موجک- شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه کارده)

عاطفه کاظمی چولانک^۱ - فرشته مدرسی^{۲*} - ابوالفضل مساعدی^۳ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

چکیده

رواناب پدیده‌ای مهم در چرخه هیدرولوژیکی است، از این رو پیش‌بینی میزان رواناب رودخانه برای اهدافی نظیر برنامه‌ریزی فعالیت‌های کشاورزی، پیش‌بینی سیلاب و تأمین آب مصرفی حائز اهمیت است. پیچیده بودن مدل‌های فیزیکی یکی از دلایلی است که باعث شده پژوهشگران به مدل‌های داده‌مبناء و مبتنی بر هوش مصنوعی روی آورند. وجود تغییرات آماری در داده‌ها سبب می‌شود که مدل‌سازی جریان رودخانه با مدل‌های داده‌مبناء با مشکلاتی در فرآیند یادگیری مدل همراه باشد. لذا لازم است با مدل‌سازی تلفیقی، دقت پیش‌بینی جریان ارتقاء یابد. هدف تحقیق حاضر، ارزیابی کارایی انواع موجک‌های گسسته و پیوسته در مدل ترکیبی موجک- شبکه عصبی (WANN) برای پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه کارده در ایستگاه ورودی به سد کارده است. بدین منظور، دو موجک گسسته Haar و Fejer-Korovkin2 و دو موجک پیوسته Symlet3 و Daubechies2 در ترکیب با مدل ANN مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی داده‌های هواشناسی و هیدرومتری در یک دوره ۳۰ ساله (۱۳۷۰-۱۳۹۹) نشان داد که جریان ماهانه در دو گام زمانی T-1 و T-2 بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (در سطح اطمینان ۹۵٪) بودند. آنالیزهای ترکیبی در سه سطح تجزیه انجام و کارایی مدل‌ها با روش صحت‌سنجی متقاطع در ۴ سطح مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های ترکیبی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل ANN بودند و مدل ترکیبی پیشنهادی Symlet3-ANN در سطح ۳، نتایج بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه داد، بطوری‌که شاخص‌های R، RMSE و NSE در بخش واسنجی به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۲۵ و ۰/۸۱ و در بخش صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۳۰ و ۰/۶۲ بود. همچنین ملاحظه شد دقت نتایج در سطح دو و سه تفاوت معناداری ندارند و بهتر است جهت کاهش مؤلفه‌های ورودی به مدل ANN و کاهش زمان اجرای مدل، تجزیه در سطح دو انجام شود.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، شبکه عصبی مصنوعی، صحت‌سنجی متقاطع، مدل هیبریدی، موجک پیوسته، موجک گسسته

مقدمه

پیش‌بینی‌های بهتری را نسبت به مدل‌های فیزیکی و مفهومی نظیر IHACRES، SWAT، MIKE 11 و HEC-HMS برای جریان رودخانه ارائه می‌کنند (Jimeno-Sáez et al., 2017; Young et al., 2017; Ahmadi et al., 2019; Wagena et al., 2020). تارک و آووک (Tareke & Awoke, 2023) در تحقیقی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی بلندمدت جریان رودخانه و خشکسالی هیدرولوژیکی در اتیوپی پرداختند و نشان دادند شبکه عصبی مصنوعی ابزار خوبی برای پیش‌بینی جریان در مناطقی است که همبستگی خوبی بین بارش و جریان وجود دارد اما در مناطق خشک مدل مناسبی نیست.

در چند سال اخیر، پیش‌بینی رواناب رودخانه از مهم‌ترین موضوعات در حوزه مدیریت منابع آب بوده است. بهبود بخشیدن به روش‌های پیش‌بینی جریان منجر به کاهش خسارات ناشی از پدیده‌های هیدرولوژیکی از جمله خشکسالی و سیلاب خواهد شد. برای مدل‌سازی رواناب دو رویکرد اصلی شامل رویکردهای فیزیکی و مفهومی فرآیند محور و رویکردهای تجربی داده محور وجود دارد (Ahooghalandari et al., 2016). مطالعات صورت گرفته برای مقایسه این دو رویکرد اغلب نشان می‌دهند که مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، استادیار و استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(Email: Fmodaresi@um.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

مدل‌های خودهمبسته (AR)، میانگین متحرک خودهمبسته (ARMA)، رگرسیون خطی (LR) و ANN را برای پیش‌بینی جریان در چین بررسی کردند؛ نتایج مطالعات آنها نشان می‌دهد که مدل‌های ترکیبی مبتنی بر موجک، عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد دارد. طیب و همکاران (Tayyab et al., 2019) از ترکیب مدل‌های Feed-Forward Back-Propagation Neural Network (FFBPNN) و radial basis function neural network (RBFNN) با یک مدل آنالیز موجک گسسته برای مدل‌سازی رابطه بارش- رواناب ماهانه در حوضه رودخانه جینشا در رودخانه یانگ تسه در چین استفاده کردند و نشان دادند که تبدیل موجک گسسته عملکرد مدل‌ها را بهبود می‌بخشد. با توجه به مطالعات صورت گرفته مشاهده می‌شود که استفاده از مدل‌های آنالیز موجک به طرز چشمگیری دقت مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را در مدل‌سازی جریان را افزایش داده است. تاکنون، اکثر تحقیقات مبتنی بر مدل ترکیبی (موجک- شبکه عصبی) Wave-ANN از یک موجک مشخص در یک سطح تجزیه خاص استفاده کرده‌اند (Dalkiliç & Hashemi, 2020; Tayyab et al., 2019). با توجه به اهمیت نوع موجک و سطح تجزیه آن در پیش‌پردازش داده‌های ورودی مدل‌ها و کارایی بالای مدل Wave-ANN در پیش‌بینی جریان رودخانه، در این مطالعه کارایی دو مدل گسسته Haar و Fejer-Korovkin و دو مدل پیوسته Symlet3 و Daubechies در سه سطح تجزیه یک، دو و سه در ترکیب با شبکه عصبی مصنوعی مورد ارزیابی قرار گرفته و عملکرد آنها در مقایسه با هم و نیز در شرایط عدم بکارگیری تبدیل موجک بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی و داده‌ها

حوضه آبریز کارده با مساحتی در حدود ۶۸۰/۵ کیلومتر مربع در شمال شرق ایران و شمال شهر مشهد قرار دارد که جزء نواحی کوهستانی و مرتفع شمال این شهر محسوب می‌شود و بخشی از حوضه رودخانه کشف رود از زیرحوضه‌های قره قوم است. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی، در محدوده ۲۶ درجه و ۵۹ دقیقه تا ۴۴ درجه و ۵۹ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۸ درجه و ۳۶ دقیقه عرض جغرافیایی قرار دارد. رودخانه کارده از تلاقی دو شاخه کوشک آباد و آل سرچشمه می‌گیرد. سد مخزنی کارده به ظرفیت حدود ۳۸ میلیون متر مکعب در بخش انتهایی این حوضه و بر روی رودخانه (شکل ۱) قرار دارد و تأمین کننده بخشی از آب شرب شهر مشهد و همچنین آبیاری اراضی کشاورزی پایین دست حوضه است (Dastorani et al., 2022). از این رو، در مطالعه حاضر، پیش‌بینی جریان ورودی به این سد مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور برآورد رواناب ماهانه

اگر چه از شبکه‌های عصبی مصنوعی به‌عنوان یک ابزار پرکاربرد برای پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود، اما این مدل ممکن است در تخمین داده‌های ناپایدار عملکرد قابل اعتمادی ارائه ندهد (Okkan, 2013). بنابراین، برای بهبود دقت و عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در تخمین سری‌های زمانی هیدرولوژیکی با روابط غیرخطی، نیاز به استفاده از تکنیک‌های پیش‌پردازش داده‌ها می‌باشد (Dalkiliç & Hashemi, 2020). یکی از این روش‌ها، تبدیل موجک است که از تکنیک پردازش سیگنال بهره می‌برد. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که اطلاعات حاصل از تحلیل موجک درباره رفتار و ساختار سری‌های مشاهده شده، پیش‌بینی‌های موفق را در پیش‌بینی سری‌های هیدرولوژیکی ارائه داده است (Danandeh Mehr et al., 2020; Sithara et al., 2020; Abda et al., 2021). بسیاری از مطالعات با مدل ترکیبی تحلیل موجک و شبکه عصبی مصنوعی (WNN) شکل می‌گیرد، به پیش‌بینی‌های موفق دست یافته‌اند؛ بعنوان مثال صدیقی (Siddiqi et al., 2021) از پیش‌پردازش موجک برای بهبود دقت مدل ANN برای پیش‌بینی میانگین ماهانه جریان در حوضه رودخانه ایندوس، پاکستان استفاده کردند و نشان دادند که مدل ترکیبی در پیش‌بینی جریان ماهانه در مقایسه با مدل منفرد بهتر عمل می‌کند. برای پیش‌بینی جریان‌های روزانه در شمال شرقی برزیل، فریره و همکاران (Freire et al., 2019) انواع موجک پیوسته Daubechies, Symlet, Coifet و مدل موجک گسسته Meyer را با مدل ANN ترکیب کردند. نتایج آنها نشان داد که ANN مبتنی بر موجک به طرز چشمگیری عملکرد مدل ANN را بهبود بخشیده و موجک گسسته Meyer بالاترین موفقیت را در پیش‌بینی نشان داد. دالکلیک و هاشمی (Dalkiliç & Hashemi, 2020) دریافتند که مدل ترکیبی شبکه عصبی با مدل موجک هار (WNN) در تخمین جریان ماهانه نسبت به مدل ANN و مدل سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) عملکرد موفق‌تری دارد. گونس و همکاران (Güneş et al., 2021) در یک مدل ترکیبی از تبدیل‌های موجک پیوسته Daubechies و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) برای تخمین جریان ماهانه استفاده کردند و نشان دادند که مدل ترکیبی عملکرد بهتری نسبت به مدل ANN دارد. همچنین در پژوهشی ییلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2022) برای بهبود مدل ANN، از مدل پیوسته Daubechies استفاده کردند و نشان دادند مدل ترکیبی پیشنهادی دقت پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه را بطور قابل توجهی در مقایسه با ANN افزایش می‌دهد. بیسواس و چاکرابورتی (Chakraborty & Biswas, 2023) نیز نشان دادند که ترکیب مدل آنالیز موجک پیوسته Daubechies با مدل ANN و مدل Long-Short Term Memory (LSTM) دقت پیش‌بینی رواناب توسط این دو مدل را افزایش می‌دهد.

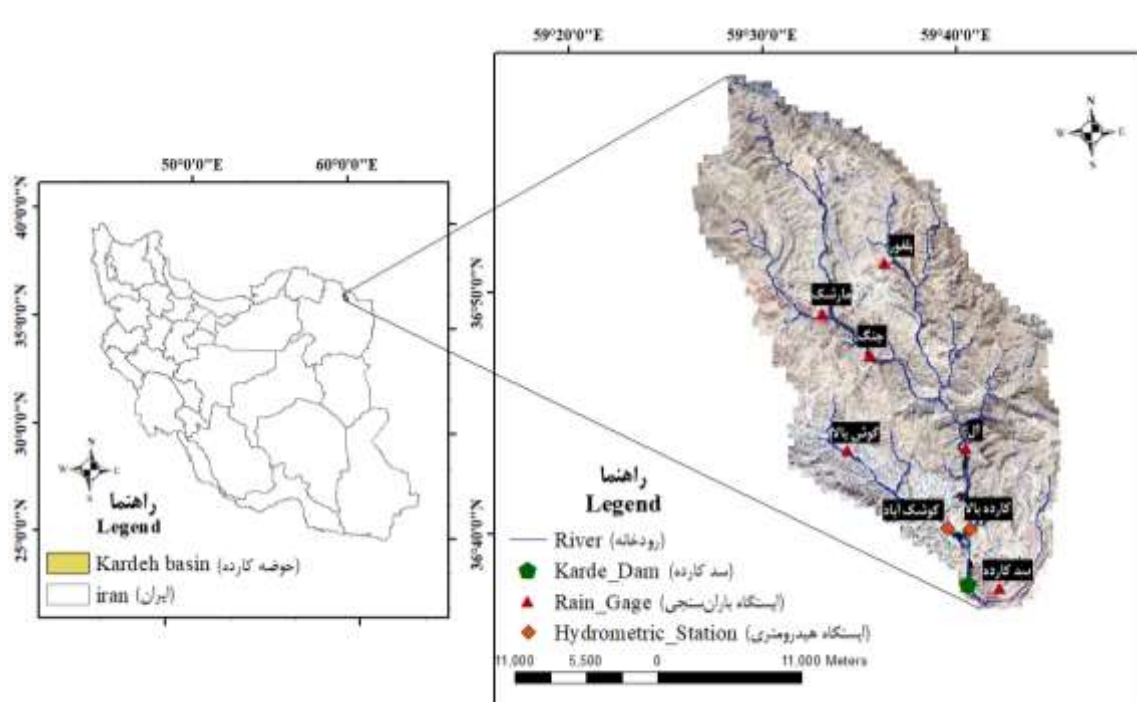
سان و همکاران (Sun et al., 2019) کاربرد تبدیل موجک با

زیرحوضه بالادست سد کارده از آمار ماهانه ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری حوضه (جدول ۱ و شکل ۱) در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۳۹۹-۱۳۷۰) استفاده گردید. تغییرات متوسط بارش و جریان ماهانه محدوده مطالعاتی در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانی و آماری ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری مورد استفاده در منطقه مطالعاتی در بازه زمانی (۱۳۹۹-۱۳۷۰)

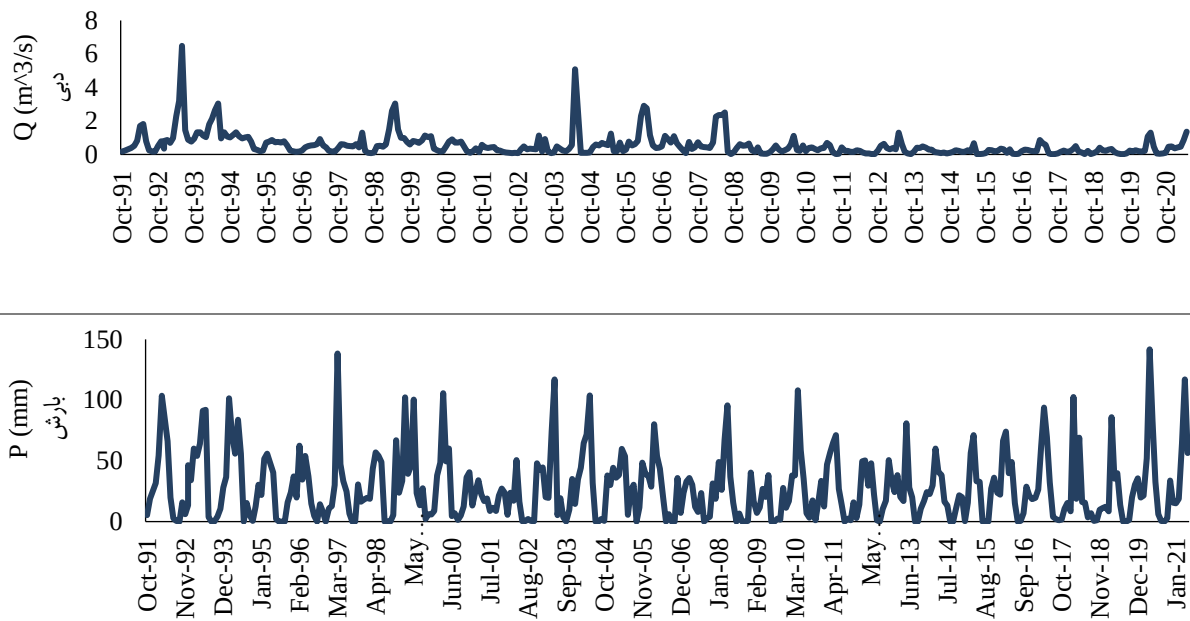
Table 1- Geographical and statistical properties of the meteorological and hydrometric stations in the study area in the period 1991-2021

Station type	Station		XUTM	YUTM	Mean	Stdev
نوع ایستگاه	نام ایستگاه		طول	عرض	میانگین	انحراف معیار
Meteorological هواشناسی	Al	آل	738112	4066830	25.14	26.44
	Jong	جنگ	730763	4073907	27.20	28.85
	Goosh Bala	گوش بالا	729015	4066640	24.25	25.86
	Bolghoor	بلغور	731891	4081022	31.74	31.48
	Kardeh Dam	سد کارده	740690	4056097	23.49	32.79
	Mareshk	مارشک	727063	4077158	25.89	26.22
Hydrometric هیدرومتری	Kardeh	کارده	738303	4060437	0.54	0.64
	Kooshk Abad	کوشک آباد	736998	4060587	0.02	0.06



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و ایستگاه های هواشناسی و هیدرومتری آن

Figure 1- The geographical location of the study area and its hydro-meteorological and hydrometric stations



شکل ۲- تغییرات ماهانه جریان و بارش محدوده مطالعاتی (۱۳۹۹-۱۳۷۰)

Figure 2- Monthly variations of streamflow and precipitation within the study area over a 30-year period (1991-2020)

$$CWT_x^\varphi(\tau, s) = |S|^{\frac{1}{2}} \varphi * \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt \quad (1)$$

که در آن s پارامتر مقیاس (عکس فرکانس)، τ پارامتر انتقال و $*$ نشان‌دهنده مزدوج مختلط است (Cannas et al., 2006). پارامتر انتقال مربوط به مکان تابع موجک در هنگام جابجایی آن از طریق سیگنال است که با اطلاعات زمانی در تبدیل موجک مطابقت دارد. پارامتر مقیاس s به صورت $1/\text{frequency}$ تعریف می‌شود و با اطلاعات فرکانس مطابقت دارد. موجک مادر $\varphi(t)$ تابع تبدیل است. مقیاس‌های بزرگ (فرکانس‌های پایین) سیگنال را بسط می‌دهد و اطلاعات دقیق پنهان در سیگنال را ارائه می‌دهند، در حالی که مقیاس‌های کوچک (فرکانس‌های بالا) سیگنال را فشرده می‌کند و اطلاعات کلی درباره سیگنال ارائه می‌دهند (Cannas et al., 2006).

تبدیل موجک گسسته (DWT) به زمان محاسبات کمتری در مقایسه با CWT نیاز دارد و پیاده‌سازی آن ساده‌تر از CWT است. مقیاس‌ها و موقعیت‌های DWT معمولاً براساس توان‌های دو عامل (مقیاس‌ها و موقعیت‌های دوتایی) هستند (Partal & Kisi, 2007). این امر با تغییر نمایش موجک به صورت زیر به دست می‌آید (Malat, 1999).

$$\varphi_{j,k}(t) = S_0^{-\frac{j}{2}} \varphi \left(\frac{t - k\tau_0 S_0^j}{S_0^j} \right) \quad (2)$$

در رابطه بالا، j و k اعداد صحیح هستند و $S_0 > 1$ یک مرحله زمانی ثابت است. اثر گسسته‌سازی موجک این است که مقیاس فضای

مدل آنالیز موجک

تبدیل موجک (WT) یک روش پردازش سیگنال است که به عنوان جایگزینی برای تبدیل فوریه پیشنهاد شده است. این روش سری‌های زمانی را تجزیه می‌کند، نویز را کاهش داده و تخمین‌ها را بهبود می‌بخشد (Nayak et al., 2013; Grossmann & Morlet, 1984). تحلیل فوریه دارای یک نقطه ضعف اولیه است که اطلاعات زمانی را در تبدیل به حوزه فرکانسی از دست می‌دهد، در حالی که WT شامل چند تفکیک‌پذیری در حوزه زمان و فرکانس است (Tiwari & Chatterjee, 2011). تبدیل موجک یک تبدیل ریاضی قدرتمند است که کمک می‌کند تا جنبه‌های روندها، نقاط شکست و ناپیوستگی‌هایی را که تکنیک‌های سنتی تحلیل داده‌ها نمی‌توانند تشخیص دهند، با جزئیات بیشتری بررسی شوند (Adamowski & Sun, 2010). این روش از فواصل طولانی برای نشان دادن اطلاعات فرکانس پایین در سری‌های زمانی و فواصل کوتاه برای نمایش جزئیات فرکانس بالا استفاده می‌کند (Momeni & Nourani, 2022).

برخلاف تبدیل فوریه، عرض تابع موجک با هر جزء طیفی در تبدیل موجک تغییر می‌کند. تبدیل موجک، در فرکانس‌های بالا، وضوح زمانی خوب و وضوح فرکانس ضعیف را ارائه می‌دهد در حالی که در فرکانس‌های پایین، وضوح فرکانس خوب و وضوح زمانی ضعیف را ارائه می‌دهد. تبدیل موجک پیوسته (CWT) یک سیگنال $x(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود (Kim & Valdes, 2003).

قابل تغییر می باشد که مقدار بهینه آن باید محاسبه شود. توابع مورد استفاده در نوروهای لایه میانی و خروجی به ترتیب از نوع خطی و سیگموئیدی هستند که در معادله ۳ و ۴ ارائه شده است (Modaresi et al., 2017):

$$f(x) = x \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad a > 0 \quad (4)$$

برای محاسبه توابع در هر نورو، وزن (w) و بایاس (b) برای ورودی های نوروها به صورت $(w_j x_j + b_j)$ در نظر گرفته می شود. $(j = 1, 2, \dots, m)$ که مقادیر بهینه آن باید از طریق واسنجی مدل تعیین شود.

به منظور آموزش یا واسنجی شبکه عصبی MLP، از الگوریتم Feed Forward Back Propagation (FFBP) برای دستیابی به بهترین مدل سازی استفاده می شود، که در آن تابع خطا طبق معادله زیر به عنوان تابع هدف برای هر یک از تکرارها به حداقل می رسد (Araghinejad, 2014).

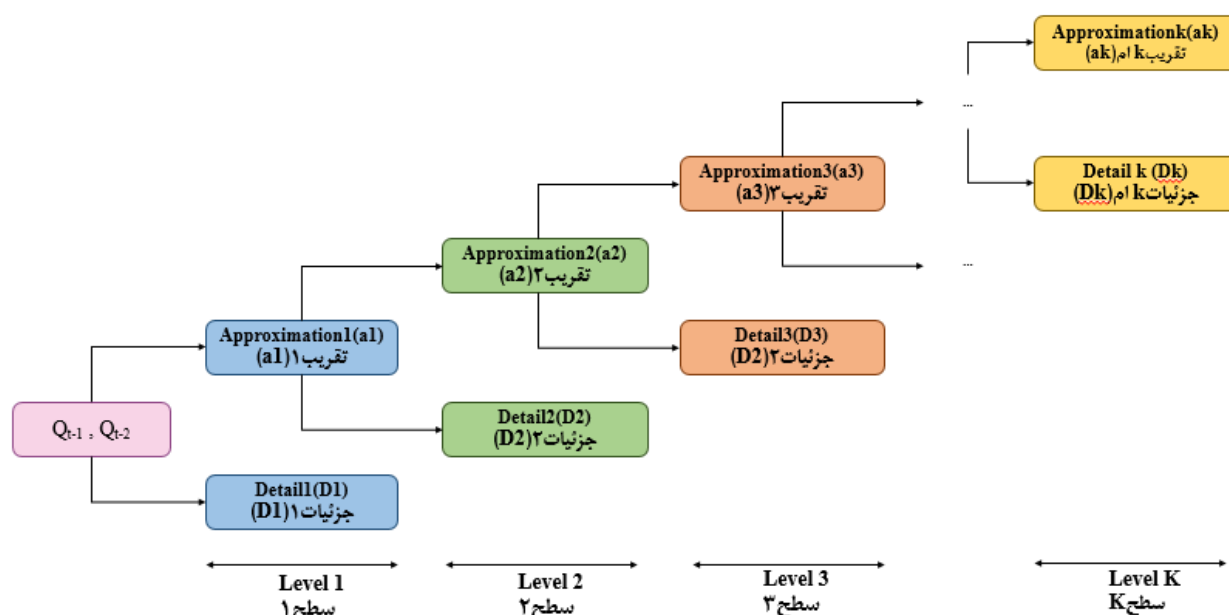
$$E = \frac{1}{nc} \sum_{i=1}^{nc} e_i^2 \quad (5)$$

در رابطه ۵، E تابع خطا، e_i خطای شبیه سازی مدل برای i امین داده آموزشی و nc تعداد جفت های آموزشی است.

زمانی اکنون در سطوح گسسته نمونه برداری می شود. مقدار $S_0 = 2$ به گونه ای انتخاب شد که نمونه برداری از محور فرکانس با نمونه گیری دوتایی مطابقت داشته باشد. موجک مادر φ ، الگوریتم تبدیل موجک "a Trous" است. ضریب انتقال $\tau = 1$ برای اطمینان از نمونه گیری دوتایی در محور زمان انتخاب می شود (Cannas et al., 2006). شکل ۳ چگونگی تجزیه توسط تبدیل های موجک برای سطوح مختلف را نشان می دهد؛ تابع موجک با عبور دادن داده ها از فیلتر مربوطه، آنها را به دو دسته تقریب (Approximation) و جزئیات تقسیم (Detail) می کند. تقریب نماینده اجزا با فرکانس پایین و جزئیات شامل اجزایی با مقیاس کوچک یا فرکانس بالا بوده و فرآیند تجزیه امواج می تواند تا چندین مرحله ادامه یابد (Wang & Ding, 2003). تفاوت اصلی انواع تبدیل های موجک در نوع تابع موجک مادر است. در موجک های گسسته، این توابع از نوع پلکانی هستند در حالی که در موجک های پیوسته، از تبدیل پیوسته در موجک مادر استفاده می شود.

مدل شبکه عصبی مصنوعی

در این مقاله، یک شبکه عصبی سه لایه با ساختار پرسپترون (MLP) استفاده شده است. در این نوع شبکه عصبی، تعداد نوروهای لایه ورودی و خروجی به ترتیب برابر با تعداد متغیرهای پیش بینی کننده (m) پیش بینی شونده است، در حالی که تعداد نوروهای لایه میانی



شکل ۳- چگونگی تجزیه سری زمانی X توسط تبدیل های موجک برای سطوح مختلف

Figure 3- The decomposition of time series X using wavelet transforms for different levels

اجرای مدل، ۷۵ درصد داده‌ها (۳ گروه) برای آموزش و ۲۵ درصد باقیمانده (۱ گروه) برای صحت‌سنجی مدل استفاده شدند. در نهایت برای ارائه نتایج نهایی حاصل از ۴ بار اجرای مدل، از نتایج بدست آمده از هر بخش واسنجی و صحت‌سنجی میانگین گرفته شده است. شایان ذکر است که در هر بار اجرای مدل، تعداد نوروهای بهینه لایه میانی نیز از بازه (۳،۸) براساس یافته‌های مطالعات پیشین تعیین شده است (Modaresi et al., 2017).

معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی و مقایسه کارایی مدل‌های بکار رفته در این تحقیق از سه شاخص ارزیابی نش-ساتکلیف (NSE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون (R) استفاده شد که به ترتیب در روابط ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است (Moriassi et al., 2007):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (7)$$

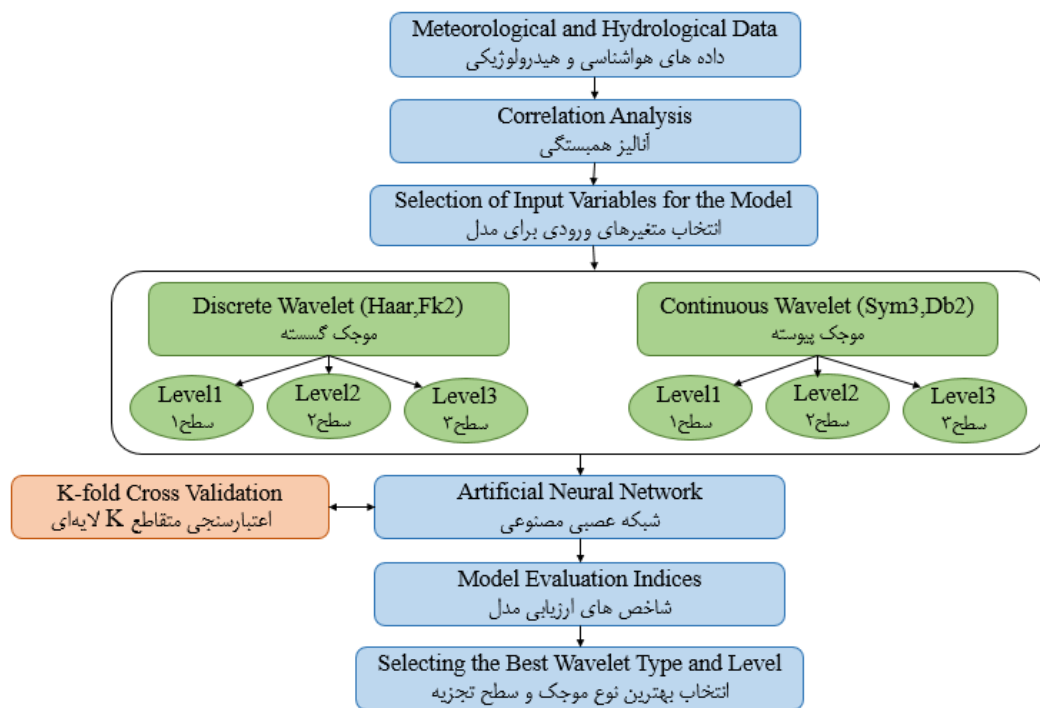
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) - (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (8)$$

مدل ترکیبی موجک- شبکه عصبی (WANN)

مدل WANN یک مدل ترکیبی از نوع سری است که در آن، خروجی تبدیل موجک به‌عنوان روش پیش‌پردازش کننده داده‌ها به عنوان ورودی به شبکه عصبی مصنوعی به‌عنوان مدل پیش‌بینی کننده وارد می‌شود. ترکیب آنالیز موجک و شبکه عصبی مصنوعی به معنای استفاده از قابلیت‌های موجک برای استخراج ویژگی‌ها و سپس استفاده از شبکه‌های عصبی برای یادگیری الگوها و پیش‌بینی داده‌ها است. این روش می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد مدل‌ها داشته باشد، زیرا از توانایی‌های هر دو روش بهره می‌برد.

در این تحقیق از دو مدل گسسته Haar و fk و دو مدل پیوسته Symlet3 و Daubechies که تحقیقات پیشین نشان‌دهنده قابلیت بالای آنها در افزایش دقت پیش‌بینی‌ها هستند (Momeneh & Güneş et Dalkiliç & Hashemi, 2020 ; Nourani., 2022 ; al., 2021)، در سه سطح تجزیه ۱، ۲ و ۳ استفاده شد و زیرسری‌های اصلی (ai) و جزئی (di) در هر تجزیه به‌عنوان ورودی به مدل شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفتند. فلوچارت مراحل انجام تحقیق در شکل ۴ آورده شده است.

برای واسنجی مدل شبکه عصبی مصنوعی از روش اعتبارسنجی متقاطع ۴ لایه‌ای (4-fold cross validation) استفاده شد. بدین صورت که داده‌ها به چهار گروه تقسیم شدند و هر یک از مدل‌های ترکیبی ۴ بار مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت و در هر بار



شکل ۴- شمای کلی روند تحقیق

Figure 4- Flowchart of the current research

(شکل ۵) و مشاهده شد که جریان هر ماه با جریان در یک و دو ماه قبل از خود دارای همبستگی بالایی در سطح اطمینان ۹۵٪ ($P < 0.05$) است، لذا دو متغیر جریان در زمان $T-1$ (Q_{t-1}) و $T-2$ (Q_{t-2}) به عنوان متغیرهای پیش بینی کننده جریان مورد استفاده قرار گرفتند و مدل زیر برای این مطالعه تعریف شد.

$$Q_t = f((Q_{t-1}) \cdot (Q_{t-2})) \quad (9)$$

نتایج مدل ترکیبی WANN

با توجه به ورودی های انتخاب شده از مرحله قبل، هر یک از دو متغیر رواناب ماه قبل (Q_{t-1}) و رواناب دو ماه قبل (Q_{t-2}) توسط هر یک از تبدیل های موجک در سه سطح تجزیه شده و نتایج حاصل از هر سطح تجزیه به عنوان ورودی به مدل ANN داده شد (شکل ۶).

نتایج مدل ترکیبی WANN در سطح تجزیه یک

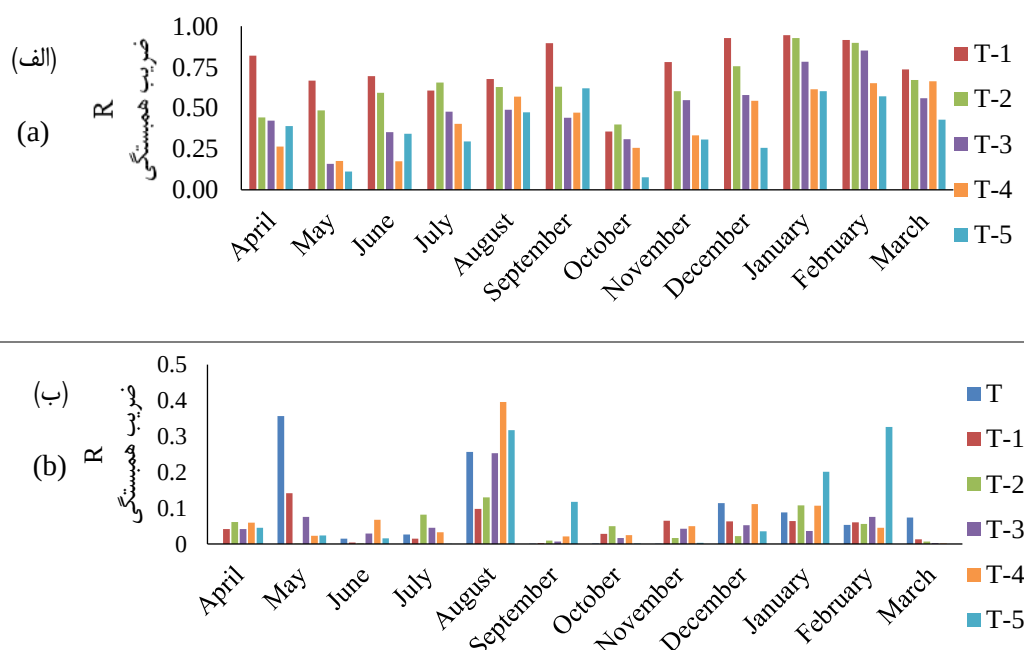
در سطح یک، به ازای هر یک از متغیرهای پیش بینی کننده، دو سری زمانی حاصل از تجزیه موجک شامل یک زیر سیگنال اصلی (a_{1i}) و یک زیر سیگنال جزئی (d_{1i}) بعنوان ورودی به مدل شبکه عصبی داده شد. در شکل ۷، نتایج صحت سنجی بدست آمده از مدل های ترکیبی حاصل از ۴ آنالیز موجک پیوسته و گسسته در هر یک از لایه های صحت سنجی متقاطع براساس شاخص های NSE، RMSE و R نشان داده شده است.

در روابط فوق، P_i و O_i به ترتیب جریان ماهانه مشاهداتی و پیش بینی شده در زمان i ، $\bar{P}$ و $\bar{O}$ به ترتیب میانگین جریان ماهانه مشاهداتی و پیش بینی شده و N تعداد داده ها می باشد. دامنه تغییرات شاخص نش-ساتکلیف از منفی بی نهایت تا یک می باشد. هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک تر باشد، خطای مدل کمتر است. شاخص RMSE از صفر تا بی نهایت تغییر می کند. هر چه مقدار این شاخص به صفر نزدیک تر باشد، نشان دهنده خطای کمتر و کارایی بهتر مدل می باشد. شاخص R در دامنه ۱- تا ۱ تغییر می کند. مقدار ۱ و ۱- به ترتیب نشان دهنده همبستگی کامل مستقیم و معکوس مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده می باشد. همچنین مقدار صفر این شاخص نشان می دهد که مقادیر مشاهداتی و پیش بینی شده هیچگونه همبستگی خطی معنی داری ندارند. بنابراین هرچه مقدار این شاخص به یک نزدیک تر باشد، کارایی مدل بهتر است و تغییرات مقادیر مشاهداتی و تخمین زده شده همسو می باشد.

نتایج و بحث

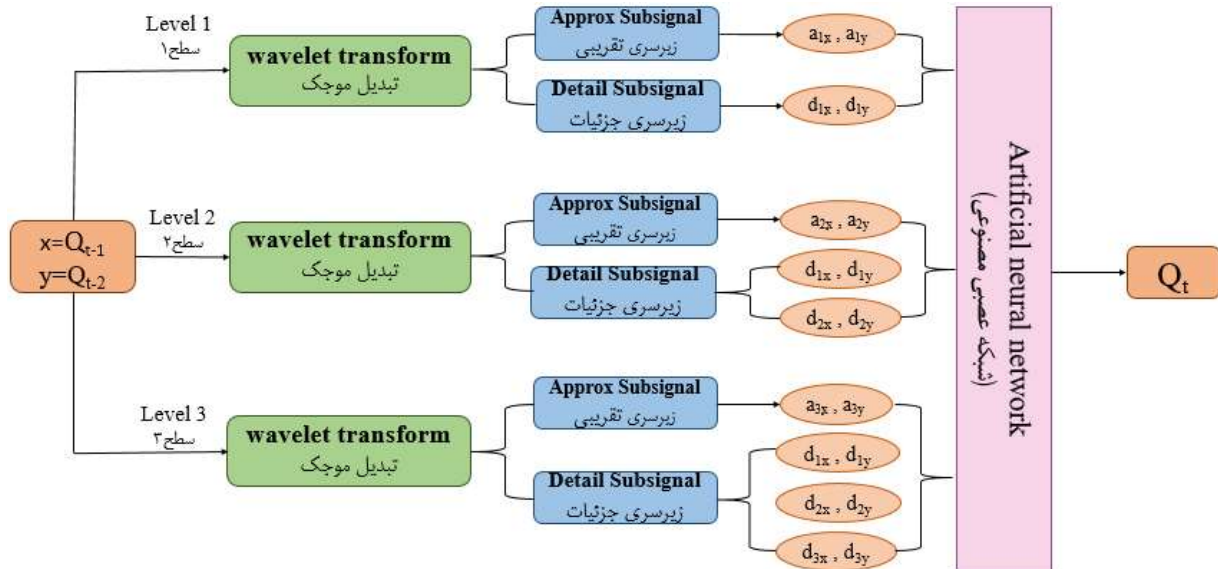
نتایج آنالیز همبستگی

به منظور تعیین بهترین متغیرهای پیش بینی کننده جریان، میزان همبستگی جریان هر ماه با بارش در تأخیرهای زمانی صفر تا ۵ ماه و نیز مقدار خودهمبستگی جریان تا ۵ ماه قبل مورد بررسی قرار گرفت



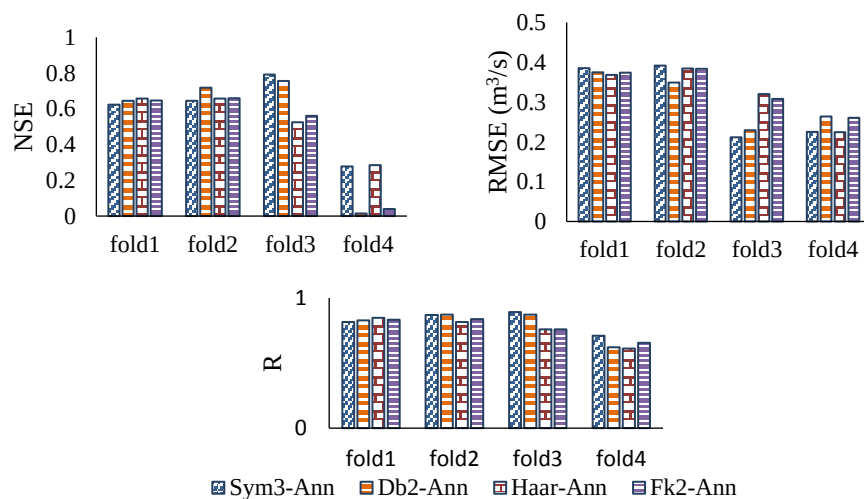
شکل ۵- همبستگی جریان با جریان ماه های قبل (الف) و همبستگی جریان با بارش همان ماه و ماه های قبل (ب)

Figure 5-The correlation of streamflow with streamflow for previous months (a) and the correlation of streamflow with precipitation for the same month preceding months (b)



شکل ۶- فلوچارت تشکیل مدل ترکیبی برای هریک از روش‌های آنالیز موجک

Figure 6- Flowchart for constructing a combined model for each of the wavelet analysis methods



شکل ۷- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های ترکیبی در سطح اول تجزیه (صحت‌سنجی متقاطع)

Figure 7- The evaluation indices values of the hybrid models at the first level of decomposition (crossvalidation)

واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که ملاحظه می‌شود عملکرد مدل‌های ترکیبی با موجک پیوسته بهتر از موجک گسسته بوده است و از میان آنها، دقت نتایج مدل Sym3-ANN در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد و مدل ترکیبی Haar-ANN کمترین دقت را در این سطح تجزیه دارد.

نتایج مدل ترکیبی WANN در سطح دوم تجزیه

در سطح تجزیه دو، سه سری زمانی حاصل از آنالیز موجک شامل یک زیر سیگنال اصلی (a_{1i}) و دو زیر سیگنال جزئی (d_{1i} و d_{2i}) به

همانطور که مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی در هر یک از چهار دسته متفاوت است. با توجه به شکل ۷ بین دو مدل پیوسته استفاده شده، در fold1 و fold2 مدل Db2-ANN دقت بالاتری نسبت به مدل Sym3-ANN دارد اما در fold3 و fold4 دقت Sym3ANN بالاتر است بطوری‌که در میانگین کلی هم دقت بالاتری را نشان می‌دهد.

دقت دو مدل گسسته، در سه fold اول تفاوت زیادی ندارد اما در fold4 دقت مدل Fk2-ANN بطور قابل ملاحظه‌ای بالاتر است. بطور کلی بین هر چهار مدل ترکیبی، مدل Sym3-ANN عملکرد بهتری دارد. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌ها را در دو بخش

ازای هر یک از متغیرهای پیش بینی کننده بعنوان ورودی وارد مدل شبکه عصبی شد. مقادیر شاخص های اعتبارسنجی در سطح دو در هر بخش در شکل ۸ آورده شده است.

در سطح دو، مقایسه نتایج دو مدل Sym3-ANN و Db2-ANN نشان می دهد فقط در fold2 دقت مدل Db2-ANN بالاتر بوده و در سه fold دیگر مدل Sym3-ANN دقت بالاتری داشته است. بین دو مدل Haar-ANN و Fk2-ANN در هر چهار fold دقت مدل Haar-

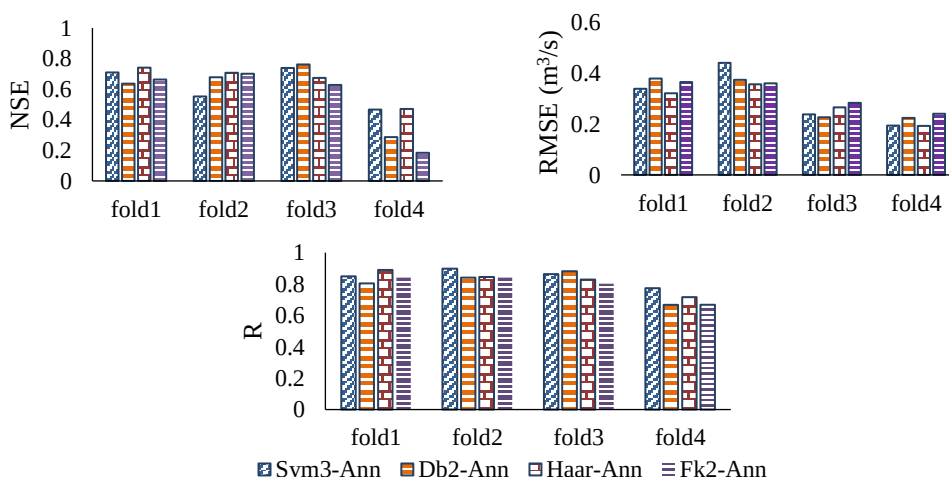
ازای هر یک از متغیرهای پیش بینی کننده بعنوان ورودی وارد مدل شبکه عصبی شد. مقادیر شاخص های اعتبارسنجی در سطح دو در هر بخش در شکل ۸ آورده شده است.

در سطح دو، مقایسه نتایج دو مدل Sym3-ANN و Db2-ANN نشان می دهد فقط در fold2 دقت مدل Db2-ANN بالاتر بوده و در سه fold دیگر مدل Sym3-ANN دقت بالاتری داشته است. بین دو مدل Haar-ANN و Fk2-ANN در هر چهار fold دقت مدل Haar-

جدول ۲- متوسط مقادیر شاخص های اعتبارسنجی مدل ها در سطح اول تجزیه

Table 2- The average value of the assessment indices at the first level of decomposition

Hybrid model مدل هیبریدی	The optimal number of neurons تعداد بهینه نورون ها	Calibration واسنجی			Validation صحت سنجی		
		NSE	RMSE (m ³ /s)	R	NSE	RMSE (m ³ /s)	R
Sym3-ANN	8	0.78	0.27	0.88	0.60	0.30	0.82
Db2-ANN	7	0.76	0.28	0.87	0.53	0.31	0.80
Haar-ANN	4	0.68	0.32	0.83	0.53	0.32	0.76
Fk2-ANN	7	0.69	0.31	0.84	0.47	0.34	0.77



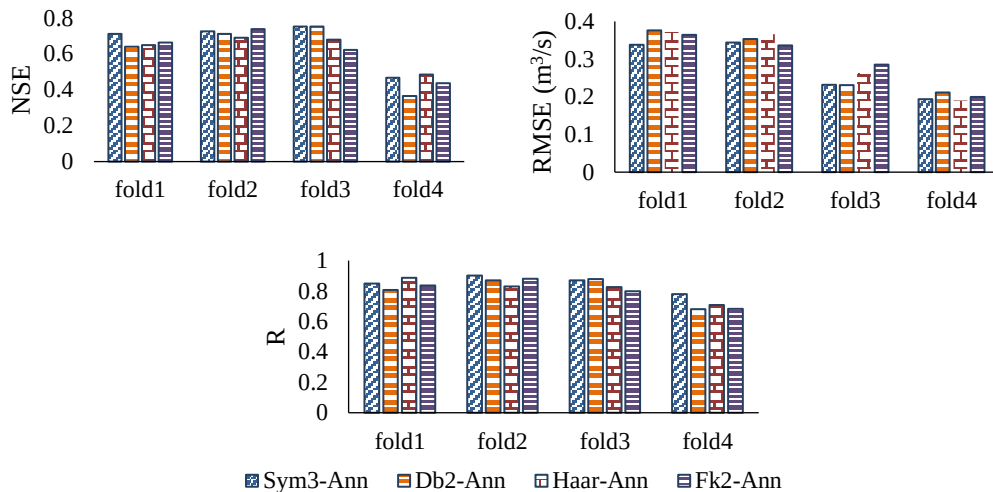
شکل ۸- شاخص های ارزیابی مدل های ترکیبی در سطح دوم تجزیه (صحت سنجی متقاطع)

Figure 8- The evaluation indices values of the hybrid model at the second level of decomposition (cross-validation)

جدول ۳- متوسط مقادیر شاخص های اعتبارسنجی مدل ها در سطح دوم تجزیه

Table 3- The average value of the assessment indices at the second level of decomposition

Hybrid model مدل هیبریدی	The optimal number of neurons تعداد بهینه نورون ها	Calibration واسنجی			Validation صحت سنجی		
		NSE	RMSE (m ³ /s)	R	NSE	RMSE (m ³ /s)	R
Sym3-ANN	4	0.83	0.24	0.91	0.60	0.31	0.84
Db2-ANN	8	0.76	0.28	0.87	0.59	0.30	0.80
Haar-ANN	5	0.73	0.29	0.87	0.61	0.30	0.81
Fk2-ANN	8	0.73	0.29	0.86	0.54	0.32	0.79



شکل ۹- شاخص‌های ارزیابی مدل‌های ترکیبی در سطح سوم تجزیه (صحت‌سنجی متقاطع)

Figure 9- The evaluation indices values of the hybrid models at the third level of decomposition (crossvalidation)

واسنجی مدل ۰/۹ و در قسمت صحت‌سنجی ۰/۸۵ است که نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بالاتری را نشان می‌دهد. مدل ترکیبی Haar-ANN در سطح تجزیه سه دقت کمتری نسبت به سطح تجزیه دو دارد و سایر مدل‌ها نیز اگرچه دقت بالاتری نشان داده‌اند اما اختلاف معنی داری بین مقادیر شاخص‌ها در سطح دو و سه مشاهده نمی‌شود و لذا نیاز به تجزیه سری زمانی داده‌ها در سطوح بالاتر نمی‌باشد. با توجه به مقادیر شاخص‌های ارزیابی در هر سطح تجزیه، بین سه سطح تجزیه، سطح یک پایین‌ترین عملکرد را دارد و سطح سه عملکرد بالاتری را بجز در مدل Haar نشان داده است. مدل Haar در سطح دو عملکرد بالاتری را نشان داده است.

در جدول ۵، مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل ANN منفرد و بهترین نتایج هر مدل ترکیبی در بهترین سطح تجزیه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که همه مدل‌های ترکیبی نتایج بهتری نسبت به مدل ANN منفرد ارائه می‌کنند. مقدار شاخص RMSE در بخش صحت‌سنجی همه مدل‌های ترکیبی ۰/۳ است که نسبت به مدل ANN منفرد کاهش یافته است.

نتایج مدل ترکیبی WANN در سطح سوم تجزیه

در سطح سه، به ازای هر متغیر ورودی به مدل موجک، یک زیر سیگنال اصلی (a_{1i}) و سه زیر سیگنال جزئی (d_{1i} و d_{2i} و d_{3i}) حاصل از تجزیه توسط هر مدل پیوسته یا گسسته ایجاد می‌شود که بعنوان ورودی به مدل شبکه عصبی وارد می‌شوند. مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی در سطح سه در هر بخش در شکل ۹ آورده شده است. در سطح سه، مقادیر شاخص‌ها در هر بخش نشان می‌دهد که دقت مدل Sym3-ANN در تمامی foldها از مدل Db2-ANN بالاتر است، در مقایسه نتایج دو مدل ترکیبی موجک گسسته و شبکه عصبی در دو fold اول دقت مدل Fk2-ANN بالاتر است در حالی که در دو fold بعد دقت مدل Haar-ANN بالاتر است. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که عملکرد مدل ترکیبی Sym3-ANN در سطح سه نیز بهتر از سایر مدل‌ها می‌باشد بطوری که مقدار شاخص NSE در بخش واسنجی ۰/۸۱ و در بخش صحت‌سنجی به ۰/۶۲ رسیده است. مقدار RMSE در واسنجی ۰/۲۵ و در صحت‌سنجی ۰/۳ است که عملکرد بالایی مدل ترکیبی Sym3-ANN را نشان می‌دهد. مقدار ضریب همبستگی در

جدول ۴- متوسط مقادیر شاخص‌های اعتبارسنجی مدل‌ها در سطح سوم تجزیه

Table 4- The average value of the assessment indices at the third level of decomposition

Hybrid model مدل هیبریدی	The optimal number of neurons تعداد بهینه نورون‌ها	Calibration واسنجی			Validation صحت‌سنجی		
		NSE	RMSE (m ³ /s)	R	NSE	RMSE (m ³ /s)	R
Sym3-ANN	3	0.81	0.25	0.90	0.62	0.30	0.85
Db2-ANN	6	0.78	0.27	0.89	0.61	0.30	0.81
Haar-ANN	6	0.78	0.27	0.89	0.59	0.31	0.80
Fk2-ANN	7	0.73	0.29	0.86	0.60	0.30	0.80

در دو بخش واسنجی و صحت سنجی و شاخص NSE در بخش صحت سنجی تنها یک درصد نسبت به Fk2-ANN بالاتر می باشد و عملاً تفاوت معنی داری بین این دو مدل ملاحظه نمی شود. بررسی تعداد نورون های بهینه در شبکه های عصبی ترکیبی نیز نشان می دهد که مدل sym3-ANN توانسته است با کمترین تعداد نورون در لایه میانی، بهترین نتیجه را ارائه دهد که این امر نشان دهنده آموزش پذیری آسان و با کمترین پیچیدگی شبکه عصبی بوده است.

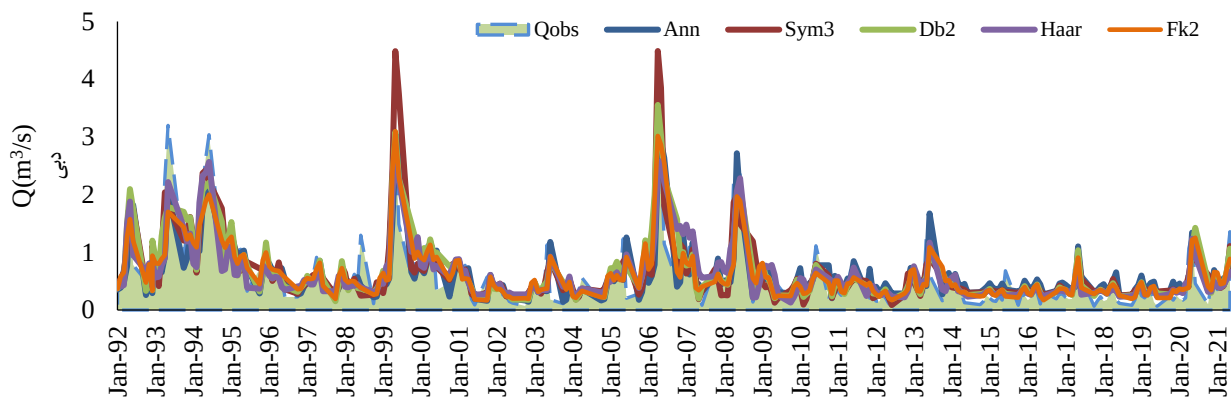
در شکل ۱۰ مقادیر جریان مشاهداتی و جریان مدل سازی شده توسط مدل منفرد ANN و چهار مدل ترکیبی در بهترین سطح تجزیه ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود که مدل های هیبریدی توانسته اند دی های کمتر را با دقت بهتری نسبت به مدل ANN منفرد برآورد نمایند. همچنین برآورد مقادیر حداکثری نیز در مدل های ترکیبی بسیار بهبود یافته است که این با نتایج دالکلیک و هاشمی (Dalkiliç & Hashemi, 2020) و ییلماز و همکاران (Yilmaz et al., 2022) مطابقت دارد. در این میان، ضعیف ترین عملکرد موجک ها مربوط به موجک هار بود. همچنین موجک Kf2 که کمتر در مطالعات هیدرولوژی به کار گرفته شده بود، نیز عملکردی متوسط داشته است که این موضوع با نتایج احمدی و مداح (Ahmadi & Maddah, 2020) مطابقت دارد.

مقدار شاخص NSE بیشترین مقدار را در دو بخش واسنجی و صحت سنجی در مدل ترکیبی Sym3-ANN دارد که به ترتیب ۰/۸۱ و ۰/۶۲ می باشد که بطور قابل ملاحظه ای نسبت به مدل ANN منفرد بهبود یافته و همچنین نسبت به سایر مدل های ترکیبی نتایج بهتری در دو بخش واسنجی و صحت سنجی ارائه می کند که این نتایج همسو با نتایج فریره و همکاران (Freire et al., 2019) می باشد. مقدار شاخص R نیز بالاترین مقدار را در مدل ترکیبی Sym3-ANN دارد لذا مدل Sym3-ANN در سطح تجزیه سه بالاترین دقت مدل سازی را دارد. در مقایسه دیگری بین دو مدل ترکیبی Db2-ANN در سطح سه و مدل Haar-Ann در سطح دو ملاحظه می شود که مقادیر شاخص های ارزیابی مدل ها در بخش صحت سنجی دقت یکسانی را برای این دو مدل ارائه داده اند اما مدل ترکیبی Db2-ANN در بخش واسنجی دقت بالاتری داشته است که با نتایج مهسواران و خوسا (Maheswaran & Khosa, 2012) همسو می باشد و لذا مدل Db2-ANN بعد از مدل ترکیبی Sym-ANN دقت بالاتری دارد. مقادیر شاخص ها برای دو مدل پیوسته نشان می دهد که در دو بخش واسنجی و صحت سنجی دقت مدل ترکیبی Sym3-Ann بالاتر از مدل Db2-Ann است. همچنین مقادیر شاخص ها برای دو مدل گسسته نشان می دهد که مدل Haar-ANN در سطح دو اختلاف چندانی با دقت مدل Fk2-ANN ندارد بطوری که در مدل Haar-ANN ضریب همبستگی

جدول ۵- مقایسه نتایج بهترین مدل های ترکیبی با مدل شبکه عصبی منفرد در مراحل واسنجی و صحت سنجی

Table 5- Comparison of the results of the best combined models with a singular neural network model in the calibration and validation stages

Model Name نام مدل	Decomposition level سطح تجزیه	The optimal number of neurons تعداد بهینه نورون ها	Calibration واسنجی			Validation صحت سنجی		
			NSE	RMSE (m ³ /s)	R	NSE	RMSE (m ³ /s)	R
ANN	-	6	0.64	0.34	0.80	0.42	0.36	0.73
Sym3-ANN	Level3	3	0.81	0.25	0.90	0.62	0.30	0.85
Db2-ANN	Level3	6	0.78	0.27	0.89	0.61	0.30	0.81
Haar-ANN	Level2	5	0.73	0.29	0.87	0.61	0.30	0.81
Fk2-ANN	Level3	7	0.73	0.29	0.86	0.60	0.30	0.80



شکل ۱۰- مقایسه جریان مشاهداتی با جریان پیش‌بینی شده با مدل‌های شبکه عصبی منفرد و ترکیبی

Figure 10- Comparison between observed data flow and predicted flow using singular and combined neural network models

نتیجه‌گیری

Fk2 ساختاری گسسته دارند در تجزیه داده‌های جریان ماهانه که از نوع پیوسته هستند، کارایی مناسبی نداشته‌اند؛ بطوری‌که در بررسی نتایج هر مدل ترکیبی مشاهده شد که مدل‌های موجک پیوسته نسبت به مدل‌های موجک گسسته عملکرد بهتری دارند و نتایج مدل شبکه عصبی منفرد را تا حد قابل قبولی بهبود می‌بخشند، بطوری‌که مدل‌های گسسته تا ۹ درصد و مدل‌های پیوسته تا ۱۱ درصد نتایج مدل ANN منفرد را بهبود بخشیده‌اند. از آنجایی‌که آب و هوا و ویژگی‌های حوضه می‌تواند بر نوع نوسانات داده‌ها و در نتیجه نتایج حاصل از تجزیه مدل موجک تأثیرگذار باشد، انتخاب مدل موجک مناسب برای به‌دست آوردن بهترین نتایج مهم است. با توجه به وجود تفاوت‌های موجود میان نتایج تحقیقات مختلف در انتخاب بهترین نوع موجک، پیشنهاد می‌شود که برای دستیابی به بهترین پیش‌بینی‌ها، از هر دو نوع موجک پیوسته و گسسته در مدل‌سازی‌ها استفاده شده و بهترین نتایج برگزیده شود. همچنین، نتایج تحقیق حاضر نشان داد که انتخاب سطح تجزیه نیز در دقت نتایج حاصل مدل ترکیبی حائز اهمیت است؛ در این تحقیق اگرچه در سطح سوم تجزیه داده‌ها برای اکثر مدل‌ها نتایج بهتری ارائه داد اما دقت نتایج در سطح دو و سه تفاوت معنی‌داری نداشتند؛ از آنجایی‌که تعداد کمتر متغیرهای ورودی در مدل‌های شبکه عصبی منجر به دقت بالاتری در نتایج مدل‌سازی می‌شود، پیشنهاد می‌شود جهت کاهش مؤلفه‌های ورودی به مدل شبکه عصبی و در نتیجه کاهش زمان اجرای مدل، تجزیه در سطح دو صورت گیرد.

وجود تغییرات آماری در داده‌ها سبب می‌شود که مدل‌سازی جریان رودخانه با مدل‌های داده‌مبنا با مشکلاتی در فرآیند یادگیری مدل همراه باشد. از این رو لازم است با استفاده از مدل‌سازی تلفیقی، دقت پیش‌بینی جریان ارتقاء یابد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی عملکرد انواع مدل موجک گسسته و پیوسته در سطوح تجزیه متفاوت در بهبود کارایی مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی رواناب بود. بدین منظور، حوضه آبریز کارده واقع در حوضه قره قوم، در شمال شرق ایران به عنوان منطقه مطالعاتی مورد ارزیابی قرار گرفت و جریان ورودی به سد کارده که یکی از منابع اصلی تأمین آب شرب شهر مشهد است مورد مدل‌سازی قرار گرفت بررسی همبستگی متغیرهای بارش و جریان ماهانه این رودخانه نشان داد که رواناب در دو گام زمانی T-1 و T-2 بهترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده (در سطح اطمینان ۹۵٪) جریان رودخانه هستند. در این تحقیق، کارایی دو مدل آنالیز موجک گسسته Haar و Fejer-Korovkin2 و دو مدل پیوسته Symlet3 و Daubechies2 در سه سطح تجزیه در ترکیب با مدل شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی جریان مورد ارزیابی قرار گرفت. کارایی مدل‌های هیبریدی WANN با استفاده از روش صحت‌سنجی متقاطع در ۴ سطح ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل‌های ترکیبی در مقایسه با مدل شبکه عصبی منفرد کارایی بهتری داشتند. از آنجا که دو مدل Haar و

References

1. Abda, Z., Chettih, M., & Zerouali, B. (2021). Assessment of neuro-fuzzy approach based different wavelet families for daily flow rates forecasting. *Journal of Model Earth Syst Environ*, 7, 1523–1538. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00855-1>
2. Adamowski, J.F., & Sun, K. (2010). Development of a coupled wavelet transform and neural network method for flow forecasting of non-perennial rivers in semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, 390(1), 85-91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.033>
3. Ahmadi, F., & Maddah, M.A. (2020). Development of wavelet-Kstar algorithm hybrid model for the monthly

- precipitation prediction (case study: synoptic station of shvaz). *Journal of Soil and Water Research*, 52(2), 409-420. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.314110.668808>
4. Ahmadi, M., Moeini, A., Ahmadi, H., Motamedvaziri, B., & Zehtabiyani, G.R. (2019). Comparison of the performance of SWAT, IHACRES and artificial neural networks models in rainfall-runoff simulation (case study: Kan watershed, Iran). *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 111, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.05.002>
5. Ahooghalandari, M., Khiadani, M., & Kothapalli, G. (2016). Assessment of Artificial Neural Networks and IHACRES models for simulating streamflow in Marillana catchment in the Pilbara, Western Australia. *Austr Journal Water Resource*, 19, 116-126.
6. Araghinejad, S. (2014). Data-driven modeling: using MATLAB in water resources and environmental engineering. *Journal of Water Science and Technology Library*, 67, 265.
7. Belayneh, A., & Adamowski, J. (2012). Standard precipitation index drought forecasting using neural networks, wavelet neural networks, and support vector regression. *Journal of Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2012/794061>
8. Cannas, B., Alessandra, F., See, L., & Sias, G. (2006). Data preprocessing for river flow forecasting using neural networks: Wavelet transforms and data partitioning. *Physics and Chemistry of the Earth*, 31(18), 1164-1171. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2006.03.020>
9. Chakraborty, S., & Biswas, S. (2023). River discharge prediction using wavelet-based artificial neural network and long short-term memory models: a case study of Teesta River Basin, India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(8), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02443-y>
10. Chen, C.H. (1999). Wavelet approach to optimizing dynamic system. *Control Theory and Applications. IEE Proceedings*, 146(2), 213-219. <https://doi.org/10.1049/ip-cta:19990516>
11. Danandeh Mehr, A., Kahya, E., & Olyaie, E. (2013). Streamflow prediction using linear genetic programming in comparison with a neurowavelet technique. *Journal of Hydrology*, 505, 240-249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.003>
12. Dastorani, M.T., Hajibigloo, M., & Shojaei, H. (2022). Identification of the land use changes on river flooding bed, affective on reservoir water quality (Case study: headwater of Kardeh reservoir). *Geography and Development*, 20(66), 255-282. <https://doi.org/10.22111/J10.22111.2022.6739>
13. Dalkılıç, H.Y., & Hashimi, S.A. (2020). Prediction of daily streamflow using artificial neural networks (ANNs), wavelet neural networks (WNNs), and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) models. *Water Supply*, 20(4), 1396-1408. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.062>
14. Freire, P.K.d.M.M., Santos, C.A.G., & da Silva, G.B.L. (2019). Analysis of the use of discrete wavelet transforms coupled with ANN for shortterm streamflow forecasting. *Apply Soft Computer*, 80, 494-505. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.024>
15. Graps A. (1995). An Introduction to wavelet. *Computing in Science and Engineering*, 2, 50-61. <https://doi.org/10.1109/99.388960>
16. Grossmann, A., & Morlet, J. (1984). Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 15(4), 723-736. <https://doi.org/10.1137/0515056>
17. Güneş, M., Parim, C., Yıldız, D., & Büyüklü, A. (2021). Predicting monthly streamflow using a hybrid wavelet neural network: case study of the Çoruh River Basin. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3065-3075. <https://doi.org/10.15244/pjoes/130767>
18. Jimeno-Saez, P., Senent-Aparicio, J., Perez-Sanchez, J., & PulidoVelazquez, D. (2018). A comparison of SWAT and ANN models for daily runoff simulation in different climatic zones of peninsular Spain. *Water*, 10(2), 192. <https://doi.org/10.3390/w10020192>
19. Katipoglu, O.M. (2023). Monthly streamflow prediction in Amasya, Türkiye, using an integrated approach of a feedforward backpropagation neural network and discrete wavelet transform. *Modeling Earth Systems and Environment*, 9(2), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01629-7>
20. Kim, T.W., Valdes, J.B. (2003). Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(6), 319-328. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2003\)8:6\(319\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:6(319))
21. Maheswaran, R., Khosa, R. (2012). Comparative study of different wavelets for hydrologic forecasting. *Computers and Geosciences*, 46, 284-295. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.12.015>
22. Mallat, S. (1999). A Wavelet Tour of Signal Processing, 2nd ed. Academic, New York.
23. Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., & Poggi, J.M. (2001). Wavelet toolbox for use with Matlab.
24. Modaresi, F., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2017). A comparative assessment of artificial neural network, generalized regression neural network, least-square support vector regression, and k-nearest neighbor regression for monthly streamflow forecasting in linear and nonlinear conditions. *Water Resources Management*, 32(5), 243-258. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1807-2>
25. Momeneh, S., & Nourani, V. (2022). Application of a novel technique of the multi-discrete wavelet transforms

- in hybrid with artificial neural network to forecast the daily and monthly streamflow. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(2), 4629–4648. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01387-6>
26. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., & Van Liew, M.W. (2007). Model evaluation guidelines for systemic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
27. Nayak, P., Venkatesh, B., Krishna, B., & Jain, S.K. (2013). Rainfall-runoff modeling using conceptual, data driven, and wavelet based computing approach. *Journal of Hydrology*, 493, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.016>
28. Okkan, U. (2013). Wavelet neural network model for reservoir inflow prediction. *Scientia Iranica*, 19, 1445-1455. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.10.009>
29. Partal, T., Kisi, O. (2007). Wavelet and neuro-fuzzy conjunction model for precipitation forecasting. *Journal of Hydrology* 342(1):199–212. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.026>
30. Poonia, V., & Tiwari, H.L. (2020). Rainfall-runoff modeling for the Hoshangabad Basin of Narmada River using artificial neural network. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(18), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05930-6>
31. Rajendra, P., Murthy, K.V.N., Subbarao, A., & Boadh, R. (2019). Use of ANN models in the prediction of meteorological data. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(14), 1051–1058. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00590-2>
32. Santos, C.A.G., & Silva, G.B.L. (2014). Daily streamflow forecasting using a wavelet transform and artificial neural network hybrid models. *Hydrological Sciences Journal* 59(2) :312–324. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.800944>
33. Santos, C.A.G., Freire, P.K.M.M., Silva, G.B.L., & Silva, R.M. (2014). Discrete wavelet transform coupled with ANN for daily discharge forecasting into Três Marias reservoir. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 364, 100–105. <https://doi.org/10.5194/piahs-364-100-2014>
34. Shoaib, M., Shamseldin, A.Y., & Melville, B.W. (2014). Comparative study of different wavelet based neural network models for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 515(1-2), 47-58. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.055>
35. Siddiqi, T.A., Ashraf, S., Khan, S.A., & Iqbal, M.J. (2021). Estimation of datadriven streamflow predicting models using machine learning methods. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(11), 1058-1567. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07446-z>
36. Sithara, S., Pramada, S.K., & Thampi, S.G. (2020). Sea level prediction using climatic variables: a comparative study of SVM and hybrid wavelet SVM approaches. *Acta Geophysica*, 68, 1779–1790. <https://doi.org/10.1007/s11600-020-00484-3>
37. Sun, Y., Niu, J., & Sivakumar, B. (2019). A comparative study of models for short-term streamflow forecasting with emphasis on waveletbased approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33, 1875–1891. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01734-7>
38. Tareke, K.A., & Awoke, A.G. (2023). Hydrological drought forecasting and monitoring system development using artificial neural network (ANN) in Ethiopia. *Heliyon*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13287>
39. Tayyab, M., Zhou, J., Dong, X., Ahmad, I., & Sun, N. (2019). Rainfall-runof modeling at Jinsha River basin by integrated neural network with discrete wavelet transform. *Meteorology Atmospheric Physics*, 131(1), 115–125. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0546-5>
40. Tiwari, D.K., Tiwari, H.L., & Nateriya, R. (2022). Runoff modeling in Kolar river basin using hybrid approach of wavelet with artificial neural network. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3), 963. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.246>
41. Tiwari, M.K., & Chatterjee, C. (2011). A new wavelet-bootstrap-ANN hybrid model for daily discharge forecasting. *Journal of Hydroinformatics*, 13(3), 500–519. <https://doi.org/10.2166/hydro.2010.142>
42. Wagena, M.B., Goering, D., Collick, A.S., Bock, E., Fuka, D.R., Buda, A., & Easton, Z.M. (2020). Comparison of short-term streamflow forecasting using stochastic time series, neural networks, process-based, and Bayesian models. *Environmental Modelling & Software*, 126(4), 104669. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104669>
43. Wambua, R.M. (2014). Drought forecasting using indices and artificial neural networks for upper tana River Basin, Kenya-A review concept. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 4(4), 1-12. <https://doi.org/10.4172/2165-784X.1000152>
44. Wang, W., & Ding, J. (2003). Wavelet network model and its application to the prediction of hydrology. *Nature and Science*, 1(1), 67-71.
45. Yilmaz, M., Tosunoğlu, F., Kaplan, N.H., Üneş, F., & Hanay, Y.S. (2022). Predicting monthly streamflow using artificial neural networks and wavelet neural networks models. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 3-20. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01403-9>
46. Young, C.C., Liu, W.C., & Wu, M.C. (2017). A physically based and machine learning hybrid approach for accurate rainfall modeling during extreme typhoon events. *Applied Soft Computing*, 53(3-4), 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.052>

Effect of Mole Drainage and Nitrogen Fertilizer on the Yield and Yield Components of Rapeseed as a Second Crop of Paddy Fields in Rasht Region

E. Karamian¹, M. Navabian², M.H. Biglouei^{3*}, M. Rabiee⁴

1 and 3- Master's Student and Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran, respectively.

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran & Department of Water Engineering and Environment, Caspian Sea Basin Research Center, University of Guilan, Rasht, Iran

(*- Corresponding Author Email: biglou@guilan.ac.ir)

4- Researcher of the Country Rice Research Institute, Rasht, Iran

Received: 21-01-2024
Revised: 18-04-2024
Accepted: 20-04-2024
Available Online: 20-04-2024

How to cite this article:

Karamian, E., Navabian, M., Biglouei, M.H., & Rabiee, M. (2024). Effect of mole drainage at different levels of nitrogen fertilizer on the yield and yield components of rapeseed as a Second Crop of Paddy Fields in Rasht region. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 207-221. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86500.1374>

Introduction

Many agricultural lands in Guilan province of Iran, especially paddy fields, remain uncultivated in the second half of the year due to various reasons including heavy rainfall, low soil permeability (stickiness of soil particles) and inefficiency of the existing drains. Mole drainage as a low-cost drainage method, proportion for rice cultivation conditions and easier to implement than pipe drainage, can be a suitable solution in the development of second cropping. Due to the oil content of 40% of the seed, the rapeseed plant is one of the valuable oil plants and has the ability to be cultivated as a second crop in paddy fields. Nitrogen plays a key role in the performance of plants and its deficiency causes limitations in plant production. Equipping paddy fields with mole drains along with the application of appropriate level of nitrogen fertilizer can increase the quantitative and qualitative yield of rapeseed as a second crop and contribute to the food security of the country. Therefore, the development of the cultivated area of rapeseed in paddy fields after rice harvesting in Rasht region, the study of the combined effect of mole drainage and different levels of nitrogen fertilizer on yield and yield components were the aims of this project.

Materials and Methods

In order to investigate the effects of mole drainage and nitrogen fertilizer on the yield and yield components of rapeseed as a second crop in Rasht rice fields, a factorial layout based on a randomized complete block design with three replications at the research field of the Faculty of Agricultural Sciences of Guilan University was implemented in the crop year of 2022-2023. The factors included mole drainage at three levels (without drainage, without gravel and with gravel) as D0, D1 and D2 respectively, and nitrogen fertilizer as urea source at two levels (180 and 240 kg ha⁻¹) as N1 and N2 respectively. Rapeseed plant (*Brassica napus*) of Delgan cultivar was selected as the second crop after rice harvest. To carry out the experiment, at first the desired land was blocked and divided into plots, then the underground drains of mole were created without gravel and with gravel with a special blade in the desired plots. To drain the drainage from the mole drains, the polyca pipe was installed at the end of each mole tunnel, then the other side of polyca pipe was connected to the sub-pipe collection and finally led to the main surface drain. This experiment was conducted in 18 plots and each one was 9 × 6 meters. The distance between plots was 1.5 m, between replications was two meters, and the distance between plants was 15 and between rows was 25 cm. To avoid the effectiveness of drainage treatments from undrained treatments, undrained plots were considered at the end of the field. Before



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86500.1374>

cultivation, basic chemical fertilizers, 200 kg ha⁻¹ of potassium from potassium sulfate source and 200 kg ha⁻¹ of phosphorus from ammonium phosphate source were applied. Nitrogen fertilizer from urea source was applied at the level of 180 and 240 kg ha⁻¹ in equal amount at three stages. Just before the harvest stage, to determine the traits of the number of seed in the pods of sub-branches, the number of seed per pod, the weight of seed in sub-branches, the weight of seed in the main branch and the weight of seed per plant, ten plants were randomly selected and harvested manually from the crown area. Also, to determine the seed yield, one square meter was randomly selected from each plot, taking into account the borders, and the bushes were manually harvested from the crown area. After the moisture content of the seeds reached the desired level, the seeds were separated from the pods and weighed using a laboratory scale with an accuracy of one thousandth of a gram, and the seed yield was calculated in kg ha⁻¹. SOXTEC SYSTEM HT 1043 Extraction Unit set was used to determine oil percentage and Kjeldahl set was used to determine seed protein. Statistical analysis of the data was done using SAS software (version 9.4) and comparison of means was done using the minimum significant difference test at 5% probability level. Excel software was used to draw the graphs.

Results and Discussion

The results of variance analysis of the data showed that the interaction effects of mole drainage and nitrogen fertilizer on the traits of seed weight in the main branches, seed weight in the plant and seed yield was significant at 5% probability level, so that the highest seed weight in the main branch with 0.733 seeds in the mole drainage with gravel with a nitrogen fertilizer level of 180 kg ha⁻¹ (D2×N1) treatment was obtained and the highest seed weight in the plant with 1.443 g in the mole drainage without gravel with a nitrogen fertilizer level of 240 kg ha⁻¹ (D1×N2) treatment was obtained. Also, the highest seed yield was obtained under 3579.48 kg ha⁻¹ in the treatment of mole drainage without gravel using 240 kg ha⁻¹ of fertilizer (D1×N2) which is compared to the treatment of without drainage and drainage with gravel with the same level of fertilizer 13.63 and 2.31 percentage was higher, respectively. In addition, rapeseed plant is more important in terms of oil percentage, no significant difference was observed between drainage and nitrogen fertilizer treatments in terms of average oil percentage. Therefore, the mole drainage treatment without gravel with a fertilizer level of 240 kg ha⁻¹ (D1×N2) is the most suitable option for rapeseed cultivation as the second crop after rice harvesting.

Conclusion

The results of this study showed that mole drainage without gravel by improving soil ventilation conditions and preventing waterlogging of paddy fields along with the level of nitrogen fertilizer of 240 kg ha⁻¹ increased the yield of rapeseed compared to the condition of without drainage at the same level of nitrogen fertilizer. Therefore, rapeseed cultivation in vast paddy fields after rice harvesting can be recommended as a basic solution in order to increase the production of oilseeds and provide part of the country's oil consumption.

Keywords: Delgan cultivar, Number of seed in a pod, Oil percentage, Protein percentage, Seed weight

تأثیر زهکشی لانه‌موشی و کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا به‌عنوان گیاه کشت دوم اراضی شالیزاری در منطقه رشت

ابراهیم کرمان^۱ - مریم نواییان^۲ - محمد حسن بیگلویی^{۳*} - محمد ربیعی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱

چکیده

به‌منظور بررسی اثر سامانه زهکشی لانه‌موشی و مدیریت کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ به‌مرحله اجرا گذاشته شد. کرت‌های اصلی تیمار زهکشی شامل: بدون زهکشی (D_0 ، شاهد)، زهکشی لانه‌موشی بدون گراول (D_1) و زهکشی لانه‌موشی با گراول (D_2) و کرت‌های فرعی تیمار کود نیتروژن از منبع اوره شامل: ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار (N_1) و ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار (N_2) بودند. گیاه کلزا (*Brassica napus*) رقم دلگان به‌عنوان گیاه کشت دوم بعد از برداشت برنج انتخاب شد. نتایج تجزیه آماری داده‌ها نشان داد که اثر تیمار زهکشی بر وزن دانه در شاخه فرعی و درصد پروتئین ($P \leq 0.05$) و بر وزن دانه در شاخه اصلی، وزن دانه در بوته و عملکرد دانه ($P \leq 0.01$)، و اثر تیمار کود بر تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی و تعداد دانه در هر غلاف ($P \leq 0.05$) و اثر متقابل آن‌ها بر وزن دانه در شاخه اصلی، وزن دانه در بوته و عملکرد دانه ($P \leq 0.05$) معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد دانه با ۳۵۷۹/۴۸ کیلوگرم بر هکتار در تیمار D_1N_2 بدست آمد که در مقایسه با تیمار بدون زهکشی و زهکشی با گراول با همان سطح کود نیتروژن به‌ترتیب ۱۳/۶۳ و ۲/۳۱ درصد بیشتر بود. از آنجا که گیاه کلزا از نظر عملکرد و درصد روغن اهمیت دارد و بین تیمارهای زهکشی و کود نیتروژن از نظر میانگین درصد روغن اختلاف معنی‌داری وجود نداشت، بنابراین می‌توان از دیدگاه عملکرد گیاه، تیمار زهکشی لانه‌موشی بدون گراول با سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار را به‌عنوان گزینه مناسب برای کشت گیاه کلزا بعد از برداشت برنج معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: تعداد دانه در غلاف، درصد پروتئین، درصد روغن، رقم دلگان، وزن دانه

مقدمه

افزایش انگیزه کشاورزان به ماندن در روستا می‌تواند بسیار مؤثر باشد. مطالعات تناسب اراضی با هدف انتخاب مناسب‌ترین محصول پس از کشت برنج در استان گیلان نشان داد که گیاهان اسفناج، لوبیا، تربچه، سیر، شاهی، شبدر، کاهو، کلزا در درجه سازگاری S2 و گیاهان گندم، هویج، جو، تربتی‌کاله در کلاس S3 بیشترین سازگاری را برای کشت دارند (Soltani et al., 2013). افزایش جمعیت و بهبود سطح تغذیه و جایگزینی مصرف روغن گیاهی به جای روغن‌های حیوانی روز به روز بر نقش و اهمیت محصولات روغنی و تلاش برای دستیابی به منابع جدید روغن و دانه‌های روغنی می‌افزاید (Mohajer, 2004). کلزا

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت و افزایش تقاضا برای غذا (Ecker & Breisinger, 2012) نگرانی‌ها را در مورد امنیت غذایی افزایش داده است. اما کمبود منابع آب شیرین امکان توسعه زمین‌های کشاورزی فاریاب را در چنین شرایطی محدود می‌کند (Karandish et al., 2020). استفاده بهینه از منابع موجود آب و خاک، حفظ سطح زیرکشت برنج، جلوگیری از تغییر کاربری آن‌ها و بهبود معیشت کشاورزان، از دلایل مهم توجه به کشت دوم بعد از برداشت برنج است. بعلاوه، توسعه کشت دوم در آماده‌سازی بستر شالیزار برای برداشت مکانیزه برنج و

۱ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران و عضو وابسته پژوهشی گروه مهندسی آب و محیط زیست، پژوهشکده حوضه آبی دریای خزر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: biglou@guilan.ac.ir)

۴- پژوهشگر مؤسسه تحقیقات برنج کشور، رشت، ایران

عبارتی تنش غرقابی و آب‌ماندگی یکی از مشکلات کشت کلزا در مناطق پرباران است (Shirani Rad et al., 2022). بنابراین بهبود زهکشی یک امر مهم برای توسعه کشت کلزا در استان گیلان محسوب می‌شود.

اراضی شالیزاری شمال کشور در پاییز و زمستان به دلیل بارندگی فراوان و همچنین عدم کارایی زهکش‌های موجود، اغلب دچار آب ماندگی بوده و بدون کشت باقی می‌ماند. عدم کشت اراضی شالیزاری در نیمه دوم سال منجر به پایین آمدن سطح درآمد کشاورزان و در نتیجه دلسردی آن‌ها و تغییر کاربری اراضی شده است. در صورتی که اراضی شالیزاری به‌طور طبیعی زهکش نداشته باشند، استفاده از روش‌های مختلف زهکشی مصنوعی الزامی می‌باشد. زهکشی در کشت دوم اراضی شالیزاری با سه هدف ۱- خشک کردن زمین و آماده کردن آن برای کشت دوم، ۲- تخلیه و دفع آب اضافی در طول دوره رشد گیاه و ۳- کنترل وضعیت حاصلخیزی خاک انجام می‌شود (Pazira, 2017). دو نوع متداول زهکشی در اراضی شالیزاری شامل زهکش سطحی و زیرزمینی یا لوله‌ای است. زهکشی زیرزمینی لانه‌موشی^۱ در بسیاری از کشورها به‌عنوان یک روش مؤثر و نسبتاً کم هزینه برای تخلیه آب از خاک با نفوذپذیری کم استفاده می‌شود (King et al., 2014). زهکش‌های لانه‌موشی در خاک‌های رسی، ارگانیک و با چسبندگی بالا و یا در مناطقی که سطح آب زیرزمینی بالا بوده و یا خاک از نقطه نظر شوری نیاز به اصلاح دارند، از عملکرد بسیار مطلوبی برخوردار است (Polat & Bilgili, 2023). زهکش‌های لانه‌موشی، تونل‌های افقی زیرزمینی دایره‌ای شکل هستند که مانند زهکش‌های لوله‌ای عمل می‌کنند و در تخلیه آب‌های اضافی ناشی از بارندگی، آبیاری و آبشویی بسیار مؤثر بوده (Alizadeh, 2013) و در خاک‌های رسی به‌ویژه در مناطق معتدل کاربرد دارد. اگرچه هزینه ایجاد این زهکش‌ها نسبت به زهکش‌های زیرزمینی لوله‌ای کم است ولی عمر مفید آن‌ها سه تا هفت سال گزارش شده است (Singh et al., 2022). تجهیز اراضی شالیزاری به زهکش‌های زیرزمینی علاوه بر اثراتی که بر افزایش عملکرد برنج دارد (Darzi-Naftchali et al., 2012) باعث ایجاد شرایط مناسب برای کشت دوم در اراضی شالیزاری می‌شود.

دوستی پاشاکالایی و همکاران (Dosti Pashakalai et al., 2017) با مطالعه اثر زهکش زیرزمینی بر عملکرد کلزا در اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری نشان دادند که تعداد بوته و تعداد غلاف در تیمارهای دارای زهکشی زیرزمینی به‌طور معنی‌داری بیشتر از تیمار شاهد بود، و عنوان کردند که با وجود بارندگی زیاد در مرحله جوانه‌زنی زهکش‌ها خوب عمل کرده و استقرار سطح ایستابی در عمق پایین‌تر از ۳۰ سانتی‌متر باعث جوانه‌زنی بیشتر و در نتیجه تعداد بوته بیشتر در واحد سطح شد.

(*Brassica napus* L.) یکی از گیاهان روغنی است که دانه کلزا دارای ۴۵ - ۴۲ درصد روغن و کنجاله آن دارای ۴۰ - ۳۶ درصد پروتئین است (Shirani Rad et al., 2022) و در تغذیه انسان و خوراک دام و طیور نقش مهمی دارد (Fatahinjad et al., 2012). روغن کلزا به دلیل ترکیب مناسب اسیدهای چرب غیراشباع و درصد محتوای اسیدهای چرب اشباع پایین آن، مانند روغن زیتون جزء با کیفیت‌ترین روغن‌های خوراکی است (Dosti Pashakalai et al., 2017). همچنین در سال‌های اخیر گسترش رژیم‌های غذایی گیاه‌خواری و استفاده از پروتئین‌های گیاهی به جای گوشت، دانه‌های روغنی اهمیت روزافزونی پیدا کرده‌اند (Valipourdestanai et al., 2018). از آنجا که بیش از نود درصد مصرف داخلی روغن خوراکی کشور از طریق واردات تأمین می‌شود و نزدیک به چهار میلیارد دلار سالانه ارز برای واردات دانه‌های روغنی از کشور خارج می‌شود (Shirani Rad et al., 2022) و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که مصرف سرانه آن در سال‌های آینده افزایش خواهد یافت، بنابراین اقداماتی برای گسترش کشت دانه های روغنی ضروری است. فراهم آوردن شرایط مطلوب برای توسعه‌ی کشت دوم در اراضی شالیزاری در مناطق شمالی کشور می‌تواند راهکار منطقی جهت افزایش تولید و کاهش واردات دانه‌های روغنی محسوب شود (Shahsavari et al., 2019; Karbasi et al., 2018). برداشت محصول کلزا در ایران در اراضی دیم، ۴۰۲۰۸ تن و در اراضی آبی ۲۹۳۵۷۰ تن است میزان تولید و عملکرد در هکتار محصول کلزا در ایران در اراضی آبی و دیم به‌ترتیب ۲۵۳۱۰۶٫۹۷ و ۳۷۷۳۲٫۷۹ تن و ۱۹۵۸٫۴۰ و ۱۵۵۲٫۰۰ کیلوگرم در هکتار است همچنین میزان تولید و عملکرد در هکتار محصول کلزا در استان گیلان در اراضی آبی و دیم به‌ترتیب ۳۲ و ۳۹ تن و ۱۱۴۷ و ۵۹۴ کیلوگرم در هکتار است (Agricultural statistics, 2023). با توجه به اینکه کشت کلزا در مناطق شمالی کشور علاوه بر تأمین بخشی از روغن مصرفی کشور و ایجاد درآمد برای کشاورزان به‌صورت دیم نیز قابل کشت است، لزوم توجه جدی‌تر مسئولین اجرایی و محققین علوم کشاورزی به کشت این گیاه استراتژیک را طلب می‌کند. از آنجایی که کلزا، گیاهی مدیریت‌پذیر است و پاسخ مناسبی به مدیریت بهینه زراعی نشان می‌دهد، شناخت محدودیت‌ها و مدیریت مناسب آن‌ها می‌تواند به تولید نزدیک به پتانسیل عملکرد کمک کند. بنابراین برای توسعه سطح زیرکشت کلزا و افزایش عملکرد آن نیاز به تعیین سطوح بهینه فاکتورهای مهم به‌زراعی با رویکرد اقتصادی آن می‌باشد. علی‌رغم تناسب کشت کلزا در اراضی شالیزاری استان گیلان، به دلیل بارندگی فراوان در نیمه دوم سال و عدم کفایت زهکشی خاک، امکان کشت کلزا با چالش مواجه است. غرقابی یکی از مشکلات عمده در زمان کاشت کلزا است، که باعث کاهش سبز شدن و خسارت به گیاهچه در مزرعه می‌شود و به

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر زهکشی زیر زمینی لانه‌موشی و کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا به‌عنوان گیاه کشت دوم در اراضی شالیزاری، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت فاکتوریل با سه سطح زهکشی (D0 (بدون زهکشی)، D1 (زهکشی لانه موشی بدون گراول)، D2 (زهکشی لانه موشی با گراول)) و دو سطح کود نیتروژن از منبع اوره (N1 (۱۸۰ کیلوگرم در هکتار) و N2 (۲۴۰ کیلوگرم در هکتار)) در سه تکرار در مزرعه تحقیقاتی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ به‌مرحله اجرا گذاشته شد. مزرعه تحقیقاتی دانشکده علوم کشاورزی دانشگاه گیلان از نظر موقعیت جغرافیایی واقع در عرض ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه شمالی و طول ۴۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و با ارتفاع ۲۵ متر از سطح دریای آزاد در شهرستان رشت واقع شده است. استان گیلان با اعتدال هوا و بارندگی فراوان جزء مناطق معتدل و مرطوب کشور است و آب و هوای آن از نوع آب و هوای مدیترانه‌ای با رطوبتی بیشتر است. براساس داده‌های هواشناسی ایستگاه تحقیقاتی هواشناسی کشاورزی رشت که در یک کیلومتری محل اجرای طرح واقع شده مقدار بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، تبخیر از تشتک و رطوبت نسبی در جدول ۱ آورده شده است.

به‌منظور اجرای آزمایش، زمین مورد نظر پس از بلوک و کرت بندی، تونل‌های افقی دایره‌ای شکل به قطر ۱۰ سانتی‌متر به‌عنوان زهکش زیر زمینی لانه‌موشی با تیغه مخصوص (Tuohy et al., 2016; Polat & Bilgili, 2023) با فاصله‌های ۳ متر و در عمق ۴۰ سانتی‌متری خاک در امتداد عرض کرت‌های مورد نظر ایجاد شدند. در تیمار زهکشی لانه موشی با گراول تونل‌ها با ماسه شکسته ۰۶ که به ماسه شسته ۰۶ نیز مرسوم است به وسیله بکت شن‌ریزی که روی تیغه مخصوص آن تعبیه شده بود، پر شدند. برای تخلیه زه‌آب زهکش‌های لانه‌موشی بدون گراول و با گراول، لوله پلیکایی به قطر ۹ و طول ۵۰ سانتی‌متر در انتهای هر تونل لانه‌موشی کارگذاری شد، سپس لوله‌های مذکور به لوله فرعی (جمع‌کننده زه‌آب) و لوله فرعی هر کرت به لوله اصلی آن که هر دو به قطر ۲/۵۴ سانتی‌متر بود بوسیله رابط و اتصالات مربوطه به هم متصل و در نهایت به زهکش روباز منتهی شد (شکل ۱) و در طول دوره رشد گیاه زهکش‌ها بطور دائم باز بودند. این آزمایش در ۱۸ کرت هر یک به ابعاد ۶×۹ متر اجرا شد. فاصله بین کرت‌ها ۱/۵ متر، بین تکرارها دو متر و فاصله بین بوته‌ها ۵ و بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر بود. عملیات کاشت در ۹ آبان ماه به‌صورت دستی انجام شد. پس از رسیدن بوته‌ها به دو-سه برگی عملیات تنک کردن صورت گرفت و تراکم بوته ۲۷ بوته در هر متر مربع (فاصله بین بوته‌ها حدوداً ۱۵ و بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر) در نظر گرفته شد. برای جلوگیری از اثر پذیری تیمارهای زهکشی از تیمارهای بدون زهکشی،

همچنین نتیجه گرفتند که عملکرد دانه در تیمارهای زهکشی با عمق ۰/۹۰ متر × فاصله ۳۰ متر، زهکشی دو عمقی (۰/۶۵ و ۰/۹۰ متر × فاصله ۳۰ متر)، زهکشی با عمق ۰/۶۵ متر × فاصله ۳۰ متر و زهکشی با عمق ۰/۶۵ متر × فاصله ۱۵ متر به‌ترتیب ۵۵، ۳۵، ۲۹ و ۲۲ درصد بیشتر از عملکرد دانه در تیمار زهکشی سطحی به‌دست آمد. سینگ و همکاران (Singh et al., 2022) اثر زهکشی لانه موشی را در کشت سویا و گندم در کشور هند در خاک‌های ورتیسول در شرایط بارندگی نرمال و بیش از نرمال مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که زهکشی لانه موشی عملکرد سویا و گندم را به‌ترتیب ۵۱ و ۱۲ درصد افزایش داد. همچنین کیچوف و همکاران (Kirchhof et al., 2000) اثر زهکشی زیرزمینی را در کشت گندم، تربیتکاله و کلزا در روش‌های مختلف مدیریت خاک مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که زهکشی با کاهش مؤثر سطح ایستابی و فراهمی هوادهی بهتر به ناحیه ریشه موجب افزایش فعالیت آن برای جذب آب و کود بیشتر شده (Darzi-Naftchali & Shahnazari, 2014) که عملکرد محصول‌ها را بین ۲ تا ۴ تن در هکتار افزایش داد.

نیتروژن نقش و اهمیتی در فرآیندهای حیاتی گیاهان دارد و عنصری است که کمبود آن بیش از سایر عناصر دیگر، تولید گیاهان کشاورزی را محدود می‌کند. مصرف نیتروژن در ابتدای مرحله گلدهی باعث تحریک رشد رویشی گیاه، طولانی شدن دوره گلدهی و افزایش میزان جذب در دسترس جوانه‌های جانبی با افزایش فتوسنتز می‌شود. این عامل باعث تحریک رشد جوانه‌های جانبی و ایجاد شاخه‌های جانبی بیشتر می‌شود (Daneshshahraki et al., 2017). همچنین مصرف نیتروژن باعث افزایش باروری گل‌ها و در نتیجه افزایش تعداد غلاف‌ها و وزن هزاران دانه و همچنین عملکرد دانه می‌شود (Ramee & Salimi, 2014). بررسی آزمایش‌های مختلف نشان داده است که افزایش کاربرد نیتروژن به‌دلیل افزایش تعداد غلاف در بوته و وزن هزار دانه موجب افزایش عملکرد دانه می‌شود (Ma & Herath, 2016). راهنما و جعفرنژادی (Rahnama & Jafar Nejadi, 2018) در یک آزمایش مزرعه‌ای طی سال‌های زراعی ۱۳۸۳-۱۳۸۴ و ۱۳۸۴-۱۳۸۵ به مطالعه اثرات مقادیر مختلف کود نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار) روی رقم هایولا ۴۰۱ کلزا پرداختند، نتایج این آزمایش حاکی از آن بود که کود نیتروژن در سطح ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بیشترین تعداد غلاف در بوته و عملکرد دانه را تولید کرد.

با توجه به لزوم زهکشی در توسعه تولید گیاهان کشت دوم در اراضی شالیزاری و اثرپذیری عملکرد گیاه کلزا از کود نیتروژن، هدف از این تحقیق بررسی اثر زهکشی لانه‌موشی و سطوح مختلف کود نیتروژن بر عملکرد و اجزاء عملکرد کلزا در اراضی شالیزاری در نظر گرفته شد.

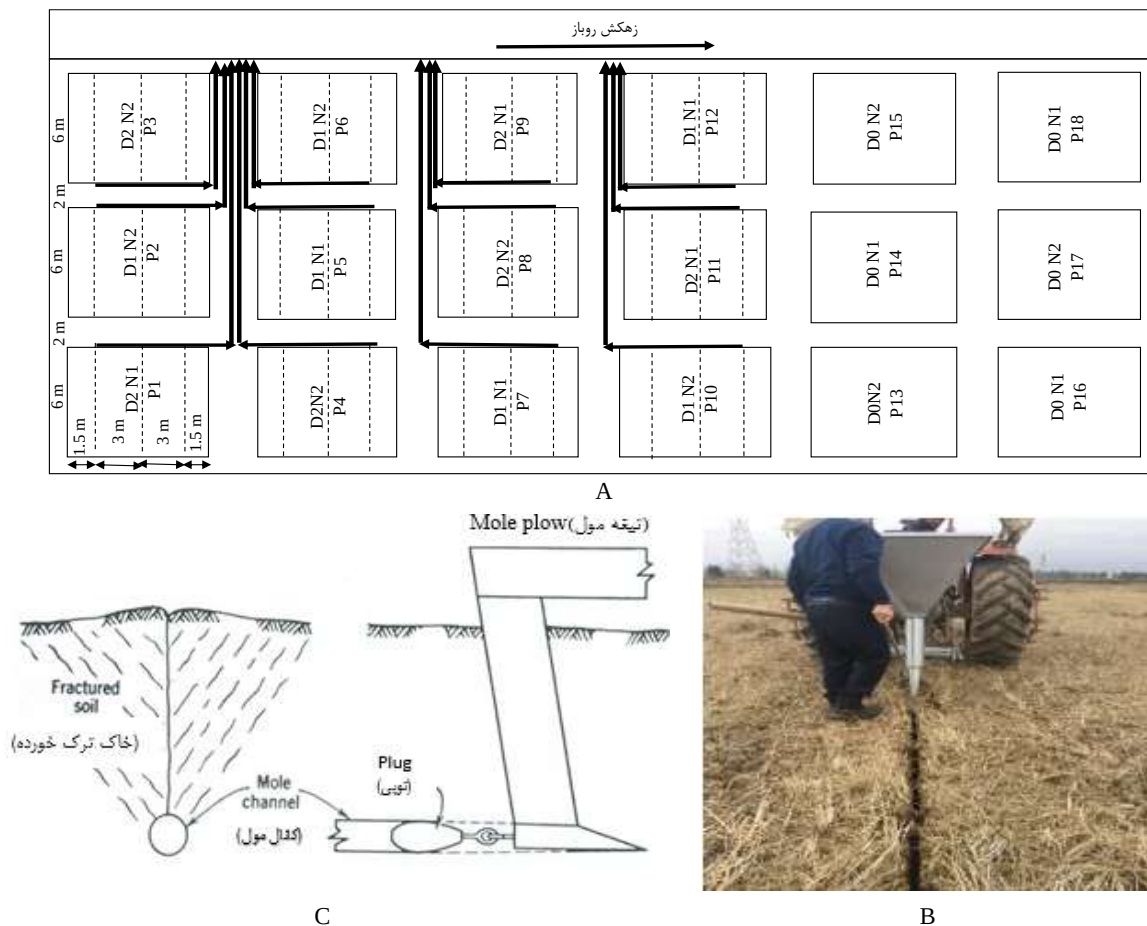
ماه در مرحله ۶ تا ۸ برگی (پس از خاتمه مرحله روزت) زمانی که دمای هوا هنوز پایین بود و بوته‌ها در آغاز خروج از خواب زمستانه بودند و مرحله سوم در تاریخ ۳۰ بهمن ماه در مرحله غنچه‌دهی و ساقه رفتن گیاه (پیش از مرحله گلدهی) در تمامی کرت‌ها به صورت دستی پخش شد.

برای تعیین بافت خاک، از روش هیدرومتری استفاده شد (Jafarzadeh et al., 2014). میزان توزیع فراوانی شن ۸/۹، سیلت ۴۴/۵ و رس ۴۶/۶ درصد به دست آمد و بافت خاک براساس مثلث بافت خاک، سیلتی رس تعیین شد. مقادیر برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل انجام آزمایش قبل از اجرای طرح در دو عمق مختلف به ترتیب در جداول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

کرت‌های بدون زهکشی در انتهای زمین در نظر گرفته شدند (شکل ۱).

گیاه کلزا (*Brassica napus*) رقم دلگان (Dalgan) به عنوان گیاه کشت دوم انتخاب شد. رقم دلگان به روش گزینش شجره‌ای تغییر شکل یافته از یک هیبرید خارجی به دست آمده که از مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر تهیه شد. قبل از کشت، کودهای شیمیایی پایه، ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاسیم از منبع سولفات پتاسیم و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار فسفر از منبع فسفات آمونیوم اعمال شد. با توجه به مقدار زیاد بارندگی در طول دوره رشد گیاه کشت در شرایط دیم بود. کود نیتروژن از منبع اوره در سطح ۱۸۰ (N₁) و ۲۴۰ (N₂) کیلوگرم در هکتار به مقدار مساوی در سه مرحله اعمال شد.

به طوری که مرحله اول در تاریخ ۹ آذر ماه در مرحله سبز شدن و جوانه زدن بذر (قبل از چند برگی شدن)، مرحله دوم در تاریخ ۱۴ دی



شکل ۱- طرح سیستم زهکشی لانه موشی (A)، نحوه ایجاد آن و ترک خوردن خاک (B) با تیغه مخصوص (C) و تجهیزات کنترل زه آب برای اندازه گیری پارامترهای مورد نظر در کرت‌ها با تیمارهای زهکشی و کود نیتروژن (D₀ (بدون زهکشی)، D₁ (زهکشی لانه موشی بدون گراول)، D₂ (زهکشی لانه موشی با گراول)، N₁ (۱۸۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار) و N₂ (۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار))

Figure 1- Design of the mole drainage system (A), how to create it (B) with a special blade (C) and drainage control equipment to measure the desired parameters in plots with drainage and nitrogen fertilizer treatments (D₀ (no drainage), D₁ (mole drainage without gravel), D₂ (mole drainage with gravel), N₁ (180 kg of nitrogen per hectare) and N₂ (240 kg of nitrogen per hectare))

جدول ۱- اطلاعات هواشناسی مربوط به دوره رشد کلزا (سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱)

Table 1- Meteorological information related to rapeseed growth period (crop year 2022-2023)

ماه Month	دمای حداکثر MaxTem (°C)	دمای حداقل MinTem (°C)	ساعات آفتابی SunHrs (hr)	رطوبت نسبی RH (%)	تخیر از تشت EPan (mm)	بارندگی Rain (mm)
مهر (October)	25.8	17.3	4.09	82.61	2.1	3.47
آبان (November)	19.7	10.4	2.93	85.63	1.1	3.91
آذر (December)	14.1	7.6	2.54	90.45	0.8	3.36
دی (January)	11.8	2.6	3.38	86.89	0.7	1.82
بهمن (February)	11.6	1.9	3.57	84.99	0.9	1.88
اسفند (March)	18.5	7.2	4.32	79.39	1.8	2.50
فروردین (April)	20.5	9.3	5.01	76.15	2.5	1.41
اردیبهشت (May)	23.0	13.3	4.73	80.87	2.3	3.36
خرداد (June)	30.4	18.6	8.82	72.98	4.5	0.00

جدول ۲- برخی خصوصیات فیزیکی خاک محل انجام پژوهش قبل از اجرای طرح

Table 2- Some physical characteristics of the soil in the research area before the implementation of the project

عمق خاک Soil depth (cm)	رطوبت اشباع Saturated moisture (%)	جرم مخصوص حقیقی ρ_s (gcm ⁻³)	جرم مخصوص ظاهری ρ_b (gcm ⁻³)	تخلخل Porosity (%)
0-15	50.60	2.61	1.67	42
15-30	50.34	2.62	1.69	35

جدول ۳- برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک محل انجام پژوهش قبل از اجرای طرح

Table 3- Some chemical characteristics of the soil of the research site before the implementation of the project

عمق خاک Soil depth (cm)	اسیدیته pH	هدایت الکتریکی عصاره اشباع ECe (dS cm ⁻¹)	کربن آلی خاک SOC (%)
0-15	7.6	1.475	3.03
15-30	7.5	1.467	2.20

Extraction Unit اندازه‌گیری شد. برای تعیین درصد پروتئین دانه مقداری دانه کلزا به‌طور تصادفی نمونه‌برداری و در آون تهویه‌دار در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد به‌مدت ۲۴ ساعت قرار داده و سپس آسیاب شد و با استفاده از دستگاه کج‌دال مدل PDU-500 پروتئین دانه اندازه‌گیری شد (Emami, 1996). تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS (نسخه ۹/۴) و مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

اجزاء عملکرد

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سامانه زهکشی لانه‌موشی بر وزن دانه در شاخه فرعی و اثر کود نیتروژن بر تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی و تعداد دانه در هر غلاف ($P \leq 0.05$) معنی‌دار بودند (جدول ۴).

در مرحله برداشت با در نظر گرفتن حاشیه‌ها در تاریخ ۲۹ اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۲، ده بوته به‌طور تصادفی برای تعیین صفات تعداد دانه در غلاف شاخه‌های فرعی، تعداد دانه در هر غلاف، وزن دانه در شاخه فرعی، وزن دانه در شاخه اصلی و وزن دانه در بوته انتخاب به‌صورت دستی و به روش کف بر برداشت شدند. همچنین برای تعیین عملکرد دانه از هر کرت به‌طور تصادفی از سطح یک متر مربع با در نظر گرفتن حاشیه‌ها انتخاب و گیاهان از ناحیه طوقه به‌صورت دستی کف بر شدند. پس از انتقال به سایت آزمایشگاه جهت خشک شدن کامل آن‌ها به مدت دو روز در هوای آزاد و در معرض آفتاب قرار داده شدند. میزان رطوبت دانه‌ها پس از نمونه‌برداری اندازه‌گیری و زمانی که به حد مطلوب رسید، دانه‌ها از غلاف جدا و محصول هر کرت به‌صورت جداگانه خرم‌کوبی شدند. سپس به‌وسیله ترازوی آزمایشگاهی با دقت یک هزارم گرم توزین و عملکرد دانه برحسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شد.

برای تعیین درصد روغن، چهار گرم دانه از هر تیمار آزمایشی نمونه‌برداری و به‌وسیله دستگاه SOXTEC SYSTEM HT 1043

داری نداشت و کمترین آن با ۰/۶۲ در تیمار بدون زهکشی (D_0) بود که با تیمار زهکشی لانه‌موشی بدون گراول اختلاف معنی‌داری نداشت (جدول ۵). بنابراین زهکشی لانه‌موشی بر وزن دانه در شاخه فرعی تأثیر مثبتی داشت به‌طوری‌که وزن دانه در شاخه فرعی در زهکشی لانه‌موشی با گراول در مقایسه با شرایط بدون زهکشی ۱۱/۴۳ درصد بیشتر بود. بنابر این می‌توان چنین استنباط کرد که در شرایط زهکشی بهبود وضعیت هوازی خاک باعث توسعه ریشه‌ها شده که گیاه با جذب مواد غذایی مورد نیاز خود توانسته وزن دانه در شاخه فرعی را افزایش دهد (Darzi-Naftchali & Shahnazari, 2014). ولی شرایط غرقابی از طریق تأثیر بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیک خاک، رشد ریشه و سرانجام رشد گیاه را محدود ساخته است.

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سامانه زهکشی، سطح کود نیتروژن و اثر متقابل آن‌ها بر درصد روغن معنی‌دار نبود. ولی اثر سامانه زهکشی بر درصد پروتئین دانه ($P \leq 0.05$)، بر وزن دانه در شاخه اصلی، وزن دانه در بوته و عملکرد ($P \leq 0.01$)، و اثر متقابل آن‌ها بر وزن دانه در شاخه اصلی و وزن دانه در بوته ($P \leq 0.05$) و بر عملکرد دانه ($P \leq 0.01$) معنی‌دار بود (جدول ۶).

هر چند اثر سامانه زهکشی، سطح کود نیتروژن و اثر متقابل آن‌ها بر درصد روغن معنی‌دار نبود. ولی مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که وجود سامانه زهکشی لانه‌موشی بدون گراول بر درصد روغن تأثیر مثبتی داشت. همچنین مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که افزایش سطح نیتروژن درصد روغن را کاهش داد (جدول ۷).

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین تعداد دانه در غلاف‌های شاخه فرعی و تعداد دانه در هر غلاف به‌ترتیب با ۲۵/۷۹۱ و ۲۵/۰۲۲ در سطح کود نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم (N_2) بر هکتار و کمترین آن‌ها به‌ترتیب با ۲۳/۶۱۵ و ۲۳/۶۱۳ در سطح کود ۱۸۰ کیلوگرم بر هکتار (N_1) مشاهده شد (جدول ۵). بنابراین با افزایش سطح کود از ۱۸۰ به ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار تعداد دانه در غلاف‌های شاخه فرعی و تعداد دانه در هر غلاف به‌ترتیب ۸/۴۳ و ۵/۶۳ درصد افزایش یافت. انطباق افزایش تعداد دانه در غلاف با افزایش سطح کود نیتروژن را می‌توان به در دسترس بودن نیتروژن به مقدار لازم و استفاده صحیح از این مقدار توسط گیاه و کاهش تلفات نیتروژن از طریق آبشویی در تیمار بدون زهکشی نسبت داد (جدول ۵). نتایج این پژوهش مبنی بر اینکه افزایش تعداد دانه در غلاف با افزایش کود نیتروژن همراه بوده با نتایج پژوهش ربیعی (Rabiei, 2011) مطابقت دارد. نورانی (Nouriani, 2012) بیشترین میزان تعداد دانه در غلاف را در تیمار کود نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار با میانگین ۲۳/۵ گزارش کرده که کم‌تر از میزان به‌دست آمده در این پژوهش است. شواهد نشان می‌دهد که در مناطق با بارندگی بالا اگر حالت غرقابی ایجاد نشود با عملیات زراعی مناسب، عملکرد محصولات می‌تواند از نواحی با بارندگی کم بیشتر باشد (Blott & Knight, 2006).

همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن دانه در شاخه فرعی با ۰/۷۰ گرم در تیمار زهکشی لانه‌موشی با گراول (D_2) که با تیمار زهکشی لانه‌موشی بدون گراول (D_1) اختلاف معنی

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی، تعداد دانه در هر غلاف و وزن دانه در شاخه فرعی در تیمارهای مختلف زهکشی لانه‌موشی و سطوح کود نیتروژن

Table 4- The results of variance analysis of the number of seed in the sub branch pod, the number of seed in each pod and the seed weight in the sub branch in different treatments of mole drainage and nitrogen fertilizer levels

منابع تغییرات (S.O.V.)	درجه آزادی (df)	مربعات (MS)		
		تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی Number of seeds in the pod of the submain branch	تعداد دانه در هر غلاف Number of seeds in each pod	وزن دانه در شاخه فرعی Weight of seeds in the submain branch
تکرار Replication	2	94353 ^{ns}	4624.5 ^{ns}	0.00043889 ^{ns}
سامانه زهکشی لانه موشی (D) Mole drainage system	2	5.3333 ^{ns}	1.51256 ^{ns}	0.009872*
کود نیتروژن (N) Nitrogen fertilizer	1	127.8356*	53.6233*	0.00347222 ^{ns}
D×N	2	4.5215 ^{ns}	2.98516 ^{ns}	0.0034722 ^{ns}
خطا Error	10	3795.21	62457.10	0.00189889
ضریب تغییرات (CV%)	-	1.27357	0.9120385	6.563785

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

جدول ۵- نتایج مقایسه میانگین تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی، تعداد دانه در هر غلاف و وزن دانه در شاخه فرعی کلزا در تیمارهای مختلف زهکشی لانه‌موشی و سطوح کود نیتروژن

Table 5- The comparison results of average number of seed per subbranch pod, number of grain per pod and seed weight per sub branch in different mole drainage treatments and nitrogen fertilizer levels

تیمار Treatment	تعداد دانه در غلاف شاخه فرعی Number of seeds in the pod of the submain branch	تعداد دانه در هر غلاف Number of seeds in each pod	وزن دانه در شاخه فرعی Weight of seeds in the submain branch
سامانه زهکشی لانه‌موشی Mole drainage system			
بدون زهکشی (D0)	25.147 ^a	24.485 ^a	0.620 ^b
Without drainage			
زهکشی بدون گراول (D1)	24.481 ^a	24.379 ^a	0.672 ^{ab}
Drainage without gravel			
زهکشی با گراول (D2)	24.481 ^a	24.088 ^a	0.700 ^a
Drainage with gravel			
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer			
۱۸۰ کیلوگرم در هکتار (N1)	23.615 ^b	23.613 ^b	0.650 ^a
180 (kg ha ⁻¹)			
۲۴۰ کیلوگرم در هکتار (N2)	25.791 ^a	25.220 ^a	0.678 ^a
240 (kg ha ⁻¹)			

میانگین‌هایی که دارای یک حرف مشترک می‌باشند در سطح احتمال ۵ درصد آزمون توکی تفاوت معنی‌داری ندارند.

Averages that have a common letter are not significantly different at the 5% probability level of Tukey's test.

جدول ۶- نتایج تجزیه واریانس وزن دانه در شاخه اصلی، وزن دانه در بوته، درصد روغن و عملکرد دانه در تیمارهای مختلف زهکشی لانه‌موشی و سطوح کود نیتروژن در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 6- The results of variance analysis of seed weight in the main branch, seed weight per plant, oil percentage and seed yield in different treatments of mole drainage and nitrogen fertilizer levels in the crop year 2022-2023

میانگین مربعات (MS)						
منابع تغییرات (S.O.V.)	درجه آزادی (df)	وزن دانه در شاخه اصلی Weight of seeds in the main branch	وزن دانه در بوته Weight of seeds in the plant	درصد روغن Oil percentage	درصد پروتئین Protein percentage	عملکرد دانه Seed yield
تکرار (Replication)	2	0.001906 ^{ns}	0.0037 ^{ns}	46.886172 ^{ns}	0.202 ^{ns}	7417.9559 ^{ns}
سامانه زهکشی لانه‌موشی (D)	2	0.00936 ^{**}	0.04 ^{**}	35.390872 ^{ns}	5.43 [*]	74411.0236 ^{**}
Mole drainage system						
کود نیتروژن (N)	1	0.00125 ^{ns}	0.0006 ^{ns}	1.227222 ^{ns}	0.008 ^{ns}	1102.222236 ^{ns}
Nitrogen fertilizer						
D×N	2	0.00207 [*]	0.011 [*]	21.45093889 ^{ns}	0.155 ^{ns}	20909.1559 [*]
خطا (Error)	10	0.00121	0.0039	17.0828656	0.745	7788.3036
ضریب تغییرات (CV%)	-	4.97992	0.0039	11.98862	4.914	14.269827

^{ns}، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

چه مصرف نیتروژن افزایش یابد، میزان روغن دانه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش نوریانی (Nouriani, 2012)، احمد و همکاران (Ahmad et al., 2007) و امان‌الله و همکاران (Amanulla et al., 2002) مبنی بر این که با افزایش مصرف نیتروژن، درصد روغن دانه کاهش پیدا می‌کند، مطابقت دارد. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش سلحشوردلیوند و همکاران (Selahshor Delivand et al., 2016) مبنی بر اینکه تأثیر زهکشی سطحی بر

سیمور و همکاران (Seymour et al., 2016) در طی پژوهشی گزارش کردند که بین مقدار روغن و مقدار نیتروژن مصرفی همبستگی منفی وجود دارد و هر چه نیتروژن بیشتری مصرف شود مقدار روغن کاهش می‌یابد. ربیعی (Rabiei, 2011) در مطالعه‌ای تأثیر سطوح کود نیتروژن بر میزان روغن دانه و پروتئین دانه در اراضی شالیزاری استان گیلان را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که میزان روغن دانه و پروتئین دانه تحت تأثیر میزان مصرف نیتروژن بوده، به‌طوری که هر

درصد روغن معنی‌دار نشده، مطابقت دارد. شریعت‌احمدی و همکاران (Shariat Ahmadi, 2013) و فرزام‌صفت (Farzam Saft, 2013) طی پژوهشی مشاهده کردند که هر چه مدت زمان غرقاب ماندن زمین بیشتر باشد درصد روغن به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین درصد پروتئین با ۱۸/۶۱ درصد در تیمار بدون زهکشی (D_0) که با تیمار زهکشی لانه موشی با گراول (D_2) اختلاف معنی‌داری نداشت، و کمترین آن با ۱۶/۷۶ درصد در تیمار زهکشی لانه موشی بدون گراول (D_1) بدست آمد. نتایج حاصله حاکی از آن است که زهکشی از نظر درصد پروتئین دانه بر عکس عملکرد دانه بوده، بطوری‌که تیمارهای زهکشی لانه موشی بدون گراول و با گراول نسبت به تیمار بدون زهکشی به ترتیب ۹/۹۴ و ۷/۲۰ درصد میزان درصد پروتئین را کاهش دادند. چنین استنباط می‌شود که، پروتئین دانه بیشتر تحت تأثیر محیط قرار می‌گیرد (Tester, 1997)، به‌طوری‌که دریس و مرعشی (Drees & Marashi, 2018) در تحقیق خود که روی گندم انجام دادند نتیجه گرفتند که درصد پروتئین دانه گندم در مزرعه زهکشی نشده بیشتر از زهکشی شده بود که نتایج تحقیق حاضرگویای آن است.

نتایج میانگین داده‌های اثر متقابل نشان داد که بیشترین وزن دانه در شاخه اصلی با ۰/۷۳۳ گرم در تیمار زهکشی لانه موشی با گراول با سطح کود نیتروژن ۱۸۰ کیلوگرم بر هکتار ($D_2 \times N_1$) بدست آمد که به

غیر از تیمار $D_0 \times N_2$ با بقیه تیمارها اختلاف معنی‌داری نداشت، و کمترین آن با ۰/۶۲۷ گرم در تیمار بدون زهکشی با سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار ($D_0 \times N_2$) بدست آمد که با تیمارهای $D_0 \times N_1$ ، $D_1 \times N_1$ و $D_2 \times N_2$ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۲). در کل نتایج حاصله حاکی از آن است که سامانه زهکشی بر وزن دانه در شاخه اصلی تأثیر مثبتی داشت و تیمارهای اثر متقابل زهکشی با سطح کود نیتروژن ۱۸۰ کیلوگرم بر هکتار، برخلاف تیمارهای اثر متقابل زهکشی با سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار یک روند مشخص فزاینده‌ای داشت، به‌طوری‌که در یک سطح کود یکسان ۱۸۰ کیلوگرم بر هکتار سامانه زهکشی لانه‌موشی بدون گراول و با گراول در مقایسه با شرایط بدون زهکشی به‌ترتیب ۴/۲۴ و ۸/۱۹ درصد وزن دانه در شاخه اصلی را افزایش داده است. بنابر این می‌توان چنین استنباط کرد که میزان بارندگی در طول دوره رشد گیاه به مراتب بیشتر از نیاز آبی گیاه بوده که در شرایط بدون زهکشی به‌دلیل رطوبت زیاد خاک و حتی گاهی ماندابی شدن سطح خاک وزن دانه در شاخه اصلی کاهش یافت. درزی نفت چالی و شاهنظری (Darzi-Naftchali & Shahnazari, 2014) گزارش کرده‌اند که در اراضی شالیزاری، به‌دلیل شرایط غرقابی، کشت کلزا بعد از برداشت برنج به‌عنوان کشت دوم در کرت‌های بدون زهکشی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

جدول ۷- نتایج مقایسه میانگین وزن دانه در شاخه اصلی، وزن دانه در بوته، درصد روغن و عملکرد دانه در تیمارهای مختلف زهکشی لانه موشی و سطوح کود نیتروژن در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱

Table 7- Comparison results of average seed weight in the main branch, seed weight per plant, oil percentage and seed yield in different treatments of mole drainage and nitrogen fertilizer levels in the crop year 2022-2023

تیمار Treatment	وزن دانه در شاخه اصلی Weight of seeds in the main branch (g)	وزن دانه در بوته Weight of seeds in the plant (g)	روغن Oil (%)	پروتئین Protein (%)	عملکرد دانه Seed yield (kg ha ⁻¹)
سامانه زهکشی لانه موشی Mole drainage system					
بدون زهکشی (D_0) Without drainage	0.6517 ^b	1.272 ^b	32.992 ^a	18.61 ^a	3153.723 ^b
زهکشی بدون گراول (D_1) Drainage without gravel	0.7183 ^a	1.390 ^a	37.278 ^a	16.76 ^b	3447.2 ^a
زهکشی با گراول (D_2) Drainage with gravel	0.7217 ^a	1.422 ^a	33.157 ^a	17.27 ^a	3525.723 ^a
کود نیتروژن Nitrogen fertilizer					
۱۸۰ کیلوگرم در هکتار (N_1) 180 (kg ha ⁻¹)	0.706 ^a	1.356 ^a	34.737 ^a	17.568 ^a	3361.764 ^a
۲۴۰ کیلوگرم در هکتار (N_2) 240 (kg ha ⁻¹)	0.689 ^a	1.367 ^a	34.214 ^a	17.525 ^a	3389.323 ^a

میانگین‌هایی که دارای یک حرف مشترک می‌باشند در سطح احتمال ۵ درصد آزمون توکی تفاوت معنی‌داری ندارند.

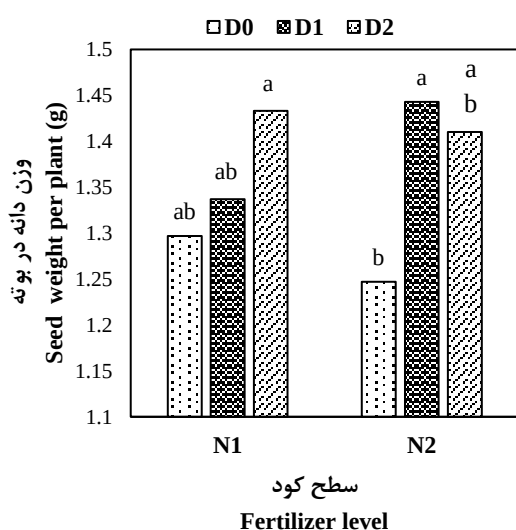
Averages that have a common letter are not significantly different at the 5% probability level of Tukey's test.

زهکشی زیرزمینی در افزایش وزن خشک برگ و شاخص سطح برگ بسیار مؤثر بوده است. همچنین صوفی‌احمدی و همکاران (Sufi Ahmadi et al., 2021) تحقیقی که انجام دادند نتیجه گرفتند که زهکشی زیرزمینی در افزایش تعداد برگ و ارتفاع ساقه گیاه ذرت بسیار مؤثر بوده است.

عملکرد دانه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که اثر سطح کود نیتروژن بر عملکرد دانه معنی‌دار نبود ولی سامانه زهکشی ($P \leq 0.01$) و اثر متقابل سامانه زهکشی $\times$ سطح کود نیتروژن ($P \leq 0.05$) معنی‌دار بود (جدول ۴).

بررسی مقایسه میانگین داده‌های اثر متقابل سامانه زهکشی و کود نیتروژن بر عملکرد دانه نشان داد که بیشترین عملکرد دانه با ۳۵۷۹/۴۷۷ کیلوگرم در هکتار در تیمار سامانه زهکشی لانه‌موشی بدون گراول با سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار ($D1 \times N2$) و کمترین آن با ۳۰۹۱/۷۲۳ کیلوگرم در هکتار در تیمار بدون زهکشی و سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار ($D0 \times N2$) مشاهده شد (شکل ۴).



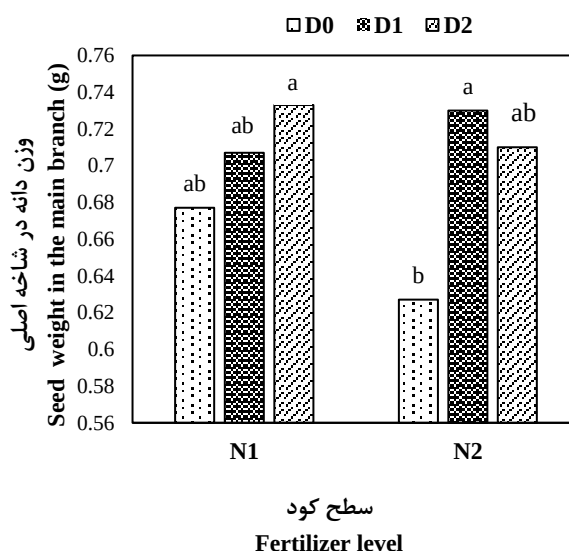
شکل ۳- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه سیستم زهکشی لانه موشی در دو سطح کود نیتروژن بر وزن دانه در بوته

Figure 3- Comparison of the average interaction effects of three mole drainage systems at two levels of nitrogen fertilizer on seed weight per plant

اختلاف بین حروف نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها در سطح ۵٪ است.

The difference between the letters indicates the existence of a significant difference between the data at the 5% level

نتایج مقایسه میانگین داده‌های اثر متقابل نشان داد که بیشترین وزن دانه در بوته با ۱/۴۴۳ گرم در تیمار زهکشی لانه موشی بدون گراول با سطح کود نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار ($D1 \times N2$) بدست آمد که به غیر از تیمار $D0 \times N2$ با بقیه تیمارها اختلاف معنی‌داری نداشت، و کمترین آن با ۱/۲۴۷ گرم در تیمار بدون زهکشی با سطح کود ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار ($D0 \times N2$) بدست آمد که با تیمارهای $D1 \times N1$ ، $D0 \times N1$ و $D2 \times N2$ اختلاف معنی‌داری نداشت (شکل ۳). نتایج حاصله حاکی از آن است که روند تغییرات وزن دانه در بوته براساس تیمارهای اثر متقابل زهکشی و کود نیتروژن همانند وزن دانه در شاخه اصلی بود، به‌طوری‌که در یک سطح کود یکسان ۲۴۰ کیلوگرم بر هکتار، سامانه زهکشی لانه موشی بدون گراول و با گراول در مقایسه با تیمار بدون زهکشی به‌ترتیب موجب افزایش ۱۳/۵۸ و ۱۱/۵۶ درصد وزن دانه در بوته شد. بنابراین می‌توان چنین استنباط کرد که مدیریت زهکشی لانه‌موشی همانند مدیریت آبیاری می‌تواند در افزایش میزان کارایی مصرف کود از نظر وزن دانه در بوته در گیاه کلزا به‌عنوان گیاه کشت دوم بعد از برداشت برنج مؤثر باشد، به‌طوری‌که عسگری و همکاران (Asgari et al., 2018) تحقیقی که با کشت گیاه کلزا در مزرعه شالیزاری بعد از برداشت برنج انجام دادند نتیجه گرفتند که



شکل ۲- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه تیمار زهکشی در دو سطح کود نیتروژن بر وزن دانه در شاخه اصلی

Figure 2- Comparison of the average interaction effects of three drainage treatments at two levels of nitrogen fertilizer on seed weight in the main branch

اختلاف بین حروف نشان‌دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها در سطح ۵٪ است.

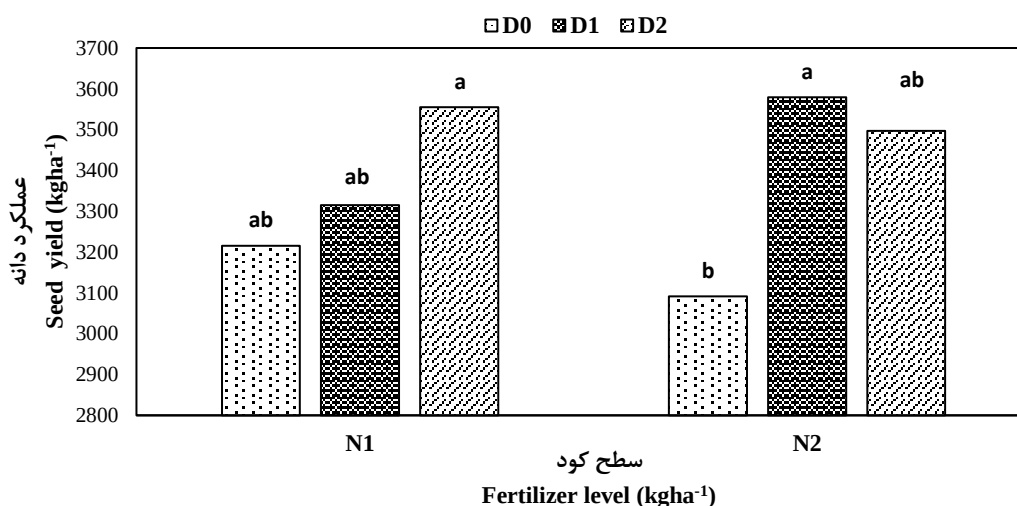
The difference between the letters indicates the existence of a significant difference between the data at the 5% level

عملکرد محصول کلزا افزایش یافت.

بنابراین از نتایج حاصله می‌توان چنین استنباط کرد که افزایش عملکرد دانه در هر دو شرایط، عمدتاً به دلیل افزایش تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در هر غلاف بود. مضافاً اینکه، عملکرد دانه گیاه کلزا به تعداد غلاف‌های موجود در گیاه بستگی دارد، زیرا پس از مرحله گلدهی، با کاهش سطح برگ گیاه، غلاف‌ها نقش مهمی در فتوسنتز دارند. همبستگی بالای بین تعداد غلاف و عملکرد دانه توسط بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) نیز گزارش شده است. افزایش عملکرد دانه که از طریق افزایش تعداد غلاف در واحد سطح و تعداد دانه در غلاف بود، موجب افزایش میزان روغن در واحد سطح و در نتیجه باعث افزایش کل عملکرد روغن گردید. نتایج این پژوهش مبنی بر اینکه عملکرد دانه از نظر زهکشی معنی‌دار شده با نتایج سلحشوردلیوند و همکاران (Selahshor Delivand et al., 2016) مطابقت دارد. همچنین نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیق جانستون و اسکات (Johnston & Scott, 1998) و صوفی‌احمدی و همکاران (Sufi Ahmadi et al., 2021) مبنی بر اینکه زهکش زیرزمینی به ترتیب موجب افزایش عملکرد دانه گیاه کلزا و ذرت می‌شود، و همچنین تایشیم و همکاران (Tuyishime et al., 2020) در تحقیقی مبنی بر اینکه شدت زهکشی زیر زمینی موجب افزایش عملکرد دانه و افزایش کارایی مصرف کود نیتروژن در مزارعه شالیزاری می‌شود، مطابقت دارد.

بنابراین زهکشی لانه‌موشی بدون گراول در سطح کود نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار موجب افزایش ۱۳/۶۳ درصد عملکرد کلزا در مقایسه با شرایط بدون زهکشی در مزرعه شالیزاری بعد از برداشت برنج شد. کارایی سطح کود بستگی به مقدار مناسب رطوبت خاک دارد که در تحقیق حاضر به دلیل بارندگی در طول دوره رشد گیاه و مناسب بودن رطوبت خاک با افزایش میزان کود از ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار به ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار کارایی آن افزایش پیدا کرده است. درزی نفتچالی و شاهنظری (Darzi-Naftchali & Shahnazari, 2014) در تحقیق خود نتیجه گرفته‌اند که زهکشی زیرسطحی در مقایسه با زهکشی سطحی از نظر رطوبت خاک شرایط بهتری را برای کشت کلزا بعد از برداشت برنج فراهم می‌کند.

از آنجا که افزایش نیتروژن در شرایط مطلوب تا حد مشخصی موجب افزایش میزان پروتئین می‌گردد. با افزایش پروتئین‌ها، گیاه به توسعه سطح برگ، تعداد شاخه‌های فرعی، ارتفاع و قطر ساقه می‌پردازد که افزایش این صفات، افزایش مواد فتوسنتزی را به دنبال دارد و با افزایش مواد فتوسنتزی، میزان ماده گیاهی افزایش می‌یابد (Rahmani et al., 2011). در تحقیقی با افزایش سطح نیتروژن از ۱۵۰ به ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر وزن تر گیاه نعنای سبز (*Mentha spicata* L.) افزایش یافت (Chrysargyris et al., 2017). همچنین علی و همکاران (Ali et al., 1990) در تحقیقی نتیجه گرفتند که با افزایش سطح کود



شکل ۴- مقایسه میانگین اثرات متقابل سه سیستم زهکشی لانه موشی در دو سطح کود نیتروژن بر عملکرد دانه

Figure 4- Comparison of the average interaction effects of three mole drainage systems at two levels of nitrogen fertilizer on seed yield

اختلاف بین حروف نشان دهنده وجود اختلاف معنی‌دار بین داده‌ها در سطح ۵٪ است.

The difference between the letters indicates the existence of a significant difference between the data at the 5% level.

نیتروژن در هکتار بیشترین عملکرد دانه را داشت. زهکشی لانه‌موشی بدون گراول در سطح کود نیتروژن ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار موجب افزایش ۱۳/۶۳ درصد عملکرد کلزا در مقایسه با شرایط بدون زهکشی در همان سطح کود نیتروژن شد. با توجه به این که توسعه سطح زیرکشت گیاهان کشت دوم در اراضی شالیزاری به‌دلیل بارندگی فراوان و همچنین عدم کارایی زهکش‌های موجود، دارای محدودیت است، استفاده از زهکش زیرزمینی لانه‌موشی و مصرف کود ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار می‌تواند این نقیصه را جبران و به توسعه سطح زیر کشت کلزا در اراضی شالیزاری کمک نماید. کشت کلزا در اراضی شالیزاری بعد از برداشت برنج می‌تواند به‌عنوان یک راهکار اساسی در راستای افزایش تولید دانه‌های روغنی و تأمین بخشی از روغن مصرفی کشور توصیه شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از شرکت سامان آبراه به‌دلیل تقبل هزینه‌های مادی و حمایت‌های معنوی در انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

در این راستا خلیلی‌واودره و همکاران (Khalili Vaudreh et al., 2016) مطالعه‌ای که در خصوص اولویت‌بندی مکانی زهکشی زیرزمینی در محدوده پروژه آبیاری و زهکشی البرز انجام دادند، به تأثیر سامانه زهکشی در بهبود عملکرد برنج در مزارعه شالیزاری تأکید و اجرای سامانه‌های زهکشی را در اولویت دانستند. بنابراین از نتایج حاصله می‌توان چنین استنباط کرد که سامانه زهکشی لانه‌موشی در عین حال که در مزارعه شالیزاری برای بهبود عملکرد برنج مؤثر است می‌تواند برای افزایش عملکرد دانه گیاهان کشت دوم از جمله کلزا بعد از برداشت برنج نیز مؤثر باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که زهکشی لانه‌موشی با بهبود شرایط تهویه‌ی خاک و جلوگیری از ماندابی شدن اراضی شالیزاری موجب افزایش عملکرد دانه کلزا به‌عنوان گیاه کشت دوم بعد برداشت برنج شد. نتایج همچنین نشان داد که مصرف تیمار کود ۲۴۰ کیلوگرم

References

1. Agricultural statistics. (2023). Ministry of Agricultural Jihad, Vice President of Economic and International Planning Affairs. *Bureau of Statistics and Information Technology*. (In Persian)
2. Ahmad, G., Jan, A., Arif, M., Jan, M.T., & Khattak, R.A. (2007). Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (*Brassica napus* L.) under rainfed conditions. *Journal of Zhejiang University Science B*, 8(10), 731-737. <https://doi.org/10.1631/jzus.2007.B0731>
3. Ali, M.H., Rahman, A.M.M.D., & Ullah, M.J. (1990). Effect of plant population and nitrogen on yield and oil content of rapeseed (*B. napus*). *Indian Journal Agriculture Sciences*, 60(5), 347-349.
4. Alizadeh, A. (2013). *Principles of planning and designing new land drainage systems*. Publications of Imam Reza University. p. 161. (In Persian)
5. Amanulla, J., Noorullah, K., Naeem, W., & Baharullah, K. (2002). Chemical composition of canola as affected by nitrogen and sulphur. *Asian Journal of Plant Sciences*, 56(7), 98-105. <https://doi.org/10.3923/ajps.2002.519.521>
6. Asgari, A., Darzi Naftchali, A., Nadi, M. & Saber Ali, S.F. (2018). Investigating the effect of surface and underground drainage on the surface of rapeseed leaves and presenting the governing mathematical equations. *Iranian Irrigation and Drainage Journal* 1(6), 1733-1742. (In Persian)
7. Bayat, M.A.H.D.I., Rabiei, B., Rabiee, M., & Moumeni, A. (2008). Assessment of relationship between grain yield and important agronomic traits of rapeseed as second culture in paddy fields. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 12(45), 475-486. <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1387.12.45.39.6>
8. Blott, K.M., & Knight, A.J.P. (2006, January). Soil Moisture and canola yield in an alley farming system. In *Proceedings of the Australian Agronomy Conference*, Australian Society of Agronomy. Accessed (Vol. 5).
9. Chrysargyris, A., Nikolaidou, E., Stamatakis, A., & Tzortzakis, N. (2017). Vegetative, physiological, nutritional and antioxidant behavior of spearmint (*Mentha spicata* L.) in response to different nitrogen supply in hydroponics. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, 6, 52-61. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2017.01.006>
10. Daneshshahraki, A., Kashani, A., Masgarbashi, M., Nabipour, M., & Kohi Dehkordi, M. (2017). The effect of density and nitrogen consumption on some agricultural characteristics of rapeseed. *Journal of Research and Construction*, 21(2), 10-17. (In Persian)
11. Darzi-Naftchali, A., & Shahnazari, A. (2014). Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields. *European Journal of Agronomy*, 56, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.02.003>
12. Darzi-Naftchali, A., Mir Latifi, S.M., Shahnazari, A., Ajajali, F., & Mahdian, M.H. (2012). The effect of surface and underground drainage on phosphorus losses from paddy fields during the rice growing season. *Iran Irrigation and Drainage Journal*, 6(3), 215-225. (In Persian)

13. Dosti Pashakalai, S., Shahnazari, A., & Jafari Taluklai, M. (2017). Investigating the performance of rapeseed as a second crop in paddy fields with underground drainage. *Journal of Water and Soil Protection Research*, 24(1), 237-249. (In Persian)
14. Drees, H., & Marashi, S.K. (2018). Investigating the effect of salicylic acid application methods on quantitative, qualitative and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) in lands with and without drainage. *Environmental Stresses in Agricultural Sciences*, 12(2), 571-561. (In Persian)
15. Ecker & Breisinger. (2012). The food Security System. Washington, D.D.:International Food Policy. 1-25.
16. Emami, A. (1996). Methods of plant analysis. Technical Journal No. 982, Soil and Water Research Institute, Tehran University Press, Tehran, Iran 367 pp. (In Persian)
17. Farzam Saft, A. (2013). Investigating the effect of depth and duration of water cut on the growth stage of rapeseed as a second crop in Gilan rice fields. Master thesis in Aburihan complex education. Pakdasht Faculty of Agriculture, Tehran University. Tehran. (In Persian with English abstract)
18. Fatahinjad, A., Siadat, A., Esfandiari, M., Moghdisi, R., & Moazi, A. (2012). The effect of phosphorus fertilizer on Yield, oil and protein of rapeseed in rainfed agriculture in different soil phosphorus fertility groups. *Journal of Crop Physiology*, 5(18), 83-100.
19. Jafarzadeh, A.A., Farajzadeh, D., & Nishaburi, M.R. (2014). Comparison of soil texture and texture class determined by hydrometer method with different number of readings. The 9th Congress of Soil Sciences of Iran. 2 pages. (In Persian)
20. Johnston, T.H., & Scott, G.C. (1998). Gravel and conventional mole drainage for dryland cropping in SE Australia. *The Australian Society of Agronomy*. Available on the Url: <http://www.regional.org.au/au/asa/1998/7/179johnston.htm>
21. Karandish, F., Hoekstra, A.Y., & Hogeboom, R.J. (2020). Reducing food waste and changing cropping patterns to reduce water consumption and pollution in cereal production in Iran. *Journal of Hydrology*, 586, 124881. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124881>
22. Karbasi, H., Mohammadzadeh, S.H., & Handizadeh, H. (2018). Analysis of factors affecting the increase in rapeseed cultivation area in rural areas, case: villages of Razavi Khorasan Province. *Space Economy and Rural Development Quarterly*, 8(3), 187-201. (In Persian)
23. Khalili Vaudreh, S., Shahnazari, A., Zia-Tabar Ahmadi, M.Kh., & Cheraghizadeh, M. (2016). Prioritizing the location of underground drainage within the scope of the Alborz irrigation and drainage project. *Watershed Management Research Paper*, 8(15), 180-190. (In Persian)
24. King, K.W., Fausey, N.R., & Williams, M.R. (2014). Effect of subsurface drainage on streamflow in an agricultural headwater watershed. *Journal of Hydrology*, 519, 438-445. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.035>
25. Ma, B.L., & Herath, A.W. (2016). Timing and rates of nitrogen fertiliser application on seed yield, quality and nitrogen-use efficiency of canola. *Crop and Pasture Science*, 67(2), 167-180. <https://doi.org/10.1071/CP15069>
26. Mohajer, A.R. (2004). Iran will be selfsufficient in edible oil production in next 12 years. *Journal of Livestock, Cultivation and Industry*, 54, 120-126.
27. Nouriani, H. (2012). Investigating the effect of different levels of nitrogen on yield, yield components and some quality characteristics of two varieties of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Production and Processing of Agricultural and Horticultural Products*, 233-240. (In Persian)
28. Pazira, A. (2017). Surface drainage in paddy fields. The fifth technical workshop on drainage and environment of Iran's National Irrigation and Drainage Committee. p. 27. (In Persian)
29. Polat, M.Y., & Bilgili M.E. (2023) A brief overview to give a new perspective on mole drainage. *International Journal Agriculture Science Food Technology*, 9(2), 016-020.
30. Ahmadi, M.R., & Javadfar, F. (2017). *The role of oilseed rape*. Translation. Tehran: Oilseeds Cultivation and Development Joint Stock Company Publications, 194 pages.
31. Rabiei, M. (2011). The effect of planting distance and amount of nitrogen fertilizer on seed yield and agronomic characteristics of rapeseed cultivar Hayola 308 as a second crop in the paddy fields of Gilan. *Seedling and Seed Horticulture Magazine*, 27(4), 399-415. (In Persian). <https://doi.org/10.17352/2455-815X.000185>
32. Rahmani, N., Jalali-Yekta, A., Taherkhani, T., & Daneshian, J. (2011). The effect of different levels of plant density and nitrogen on the performance of marigold medicinal plant essential oil. *Scientific Research Quarterly of Crop Plants Ecophysiology*, 2-4. (In Persian)
33. Rahnema, A.A., & Jafar Nejadi, A. (2018). Determining the most appropriate level of nitrogen fertilizer in different dates of rapeseed planting in Khuzestan. *Plant Products*, 32(1), 53-63. (In Persian)
34. Ramee, V.A., & Salimi, M.B. (2014). The effect of different amounts of nitrogen on phenology, plant height, yield components and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Oil Plant Production Journal*, 2(1), 1-12. (In Persian)
35. Selahshor Delivand, F., Hosseinzadeh Delir, A., Fakherifard, A., Kaousi, M., Yazdani, M., & Devatgar, N. (2016). The effect of surface drainage and different levels of nitrogen fertilizer on the percentage of oil, protein and rapeseed yield. *Engineering Research of Irrigation and Drainage Structures*, 8(2), 119-134. (In Persian)
36. Seymour, M., Sprigg, S., French, B., Bucat, J., Malik, R., & Harries, M. (2016). Nitrogen responses of canola in low

- to medium rainfall environments of Western Australia. *Crop and Pasture Science*, 67(4), 450-466.
37. Shahsavari, F., Karandish, F., & Haghighatjou, P. (2019). Potentials for expanding dry-land agriculture under global warming in water-stressed regions: a quantitative assessment based on drought indices. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1555-1567. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2689-9>
38. Shariat Ahmadi, J. (2013). Effects of depth and duration of water cut in different stages of growth for canola after rice harvest. Masters Thesis in Faculty of Agriculture, Isfahan University, Isfahan. (In Persian)
39. Singh, R., Rao, K.V., Singh, R.K., Singh, K.P., & Singh, S.K. (2022). Drainage technologies for enhancing productivity of temporary waterlogged vertisols. *Journal of Agricultural Engineering*, 59(3), 279-292. <https://doi.org/10.52151/jae2022593.1782>
40. Shirani Rad, A.H., Alizadeh, B., Jabbari, H., Amiri Oghan, H., Rahmanpour, S., Sadeghi Garmaroudi, H., Safavifard, N., Kihanian, A.A., Nurqalipour, F., Mostofi Sarkari, M.K., Ivani, A., Rezaei, H., Azizi Zahan, A.A., & Razavi, R. (2022). New aspects of rapeseed cultivation in the country. Research institute for improvement and preparation of seedlings and seeds, Publication of agricultural education P. 216. (In Persian)
41. Soltani, S.M., Hanafi, M.M., Karbalaei, M.T., & Khayambashi, B. (2013). Qualitative land suitability evaluation for the growth of rice and off-seasons crops as rice based cropping system on paddy fields of Central Guilan, Iran. *Indian Journal of Science and Technology*, 6(10), 5395-5403. <https://doi.org/10.17485/ijst/2013/v6i10.15>
42. Sufi Ahmadi, V., Ghobadnia, M., Naseri, A.A., Nouri Imamzadei, M.H., & Mottaghian, H.R. (2021). The effect of controlled drainage on changes in iron concentration in the effluent and its absorption in corn plants. *Iranian Water Research Journal*, 15(3), 1-14. (In Persian)
43. Tester, R.F. (1997). Influence of growth conditions on barley starch properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 21(1-2), 37-45. [https://doi.org/10.1016/S0141-8130\(97\)00039-1](https://doi.org/10.1016/S0141-8130(97)00039-1)
44. Tuohy, P., Humphreys, J., Holden, N.M., & Fenton, O. (2016). Runoff and subsurface drain response from mole and gravel mole drainage across episodic rainfall events. *Agriculture Water Management*, 169, 129-139.
45. Tuyishime, O., Joel, A., Messing, I., Naramabuye, F., Sankaranarayanan, M., & Wesström, I. (2020). Effects of drainage intensity on water and nitrogen use efficiency and rice grain yield in a semi-arid marshland in Rwanda. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 70(7), 578-593. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1817539>
46. Valipourdestanai, M., Sheniranirad, A.H., Voladabadi, A.R., Sanizadeh, S., & Zakrin, H.R. (2018). The effect of winter planting date and zinc foliar application on some quality traits in oil fatty acids and yield of spring rapeseed cultivars (*Brassica napus* L.) in Karaj region. *Crop Ecophysiology Journal*, 4(52), 589-604. (In Persian)



The Effect of Shrub Cover on Some Soil Properties in a Semi-arid Climate

Z. Sohrabzadeh¹, Y. Kooch^{2*}

1 and 2- M.Sc. Student and Associate Professor, Department of Range Management, Faculty of Natural Resources, Tarbiat Modares University, Noor, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: yahya.kooch@modares.ac.ir)

Received: 18-12-2023
Revised: 02-03-2024
Accepted: 05-03-2024
Available Online: 05-03-2024

How to cite this article:

Sohrabzadeh, Z., & Kooch, Y. (2024). The effect of shrub cover on some soil properties in a semi-arid climate. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 223-237. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85947.1364>

Introduction

Shrub covers play a pivotal role in pasture ecosystems, exerting considerable influence on various biochemical processes that occur within the habitat and surface layers of the soil. Despite their significance, there is a scarcity of research exploring the impact of different types of shrubs covers on soil properties within pasture ecosystems. Consequently, this present study was undertaken to address this gap in knowledge and investigate the effects of shrub cover on soil characteristics specifically within a semi-arid climate, which is known for its delicate and vulnerable habitats.

Materials and Methods

The implementation of this research involved the consideration of the mountainous region of Kiakola, Nowshahr city. The current investigation focused on assessing the impact of various shrubs, namely *Carpinus orientalis* Miller, *Crataegus microphylla* C. Koch, *Berberis integerrima* Bunge, *Prunus spinosa* L., and *Rhamnus pallasii* Fisch. and C. A. Mey, on specific soil properties within the mountainous area of Kiakla, Nowshahr city. To carry out this research, 15 sites were selected for each of the aforementioned shrub species. Soil samples were collected from under the canopy of these species, specifically at a depth of 0-10 cm and a surface area of 30 cm × 30 cm. A total of 75 soil samples were then taken to the laboratory for analysis. The samples were divided into two parts: one part underwent physical and chemical tests after air-drying and passing through a 2 mm sieve, while the other part was stored at 4 degrees Celsius for biological tests. The presence or absence of significant differences in soil properties related to the type of shrub cover under investigation was determined using a one-way analysis of variance test. Principal component analysis (PCA) was utilized to establish the relationship between different soil characteristics within the studied shrub covers.

Results and Discussion

According to the findings of this investigation, alterations in the shrub species present in the examined pasture habitat resulted in modifications to the majority of soil quality properties. Nevertheless, no statistically significant disparity was observed in the quantity of soil organic matter. However, it is worth noting that the quantity of organic matter in the subsoil of *Carpinus* species exceeded that of the other examined shrubs. *Carpinus* and *Crataegus* shrubs were associated with the lowest values of bulk density, while the shrubs under investigation had no significant impact on soil particle density. Furthermore, the subsoil of the *Carpinus* shrub cover exhibited the highest values of soil porosity. In the studied area, the most stable soil aggregates were observed beneath the *Carpinus* and *Rhamnus* shrubs. The subsoil of *Rhamnus* and *Carpinus* shrubs exhibited the highest and lowest quantities of sand, respectively. Similarly, the subsoil of *Carpinus* and *Rhamnus* displayed the highest and lowest quantities of clay, respectively. The soil under *Rhamnus* displayed the highest ratio of CR and MCR indices,



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.85947.1364>

whereas the subsoil of *Carpinus* exhibited the lowest values of these indices. Fulvic and humic acids demonstrated the greatest values beneath the *Carpinus*, *Crataegus*, *Berberis*, *Prunus*, and *Rhamnus* shrubs, respectively, following a comparable pattern. Additionally, the subsoil of *Carpinus* exhibited the greatest quantity of microbial ratio, while the soil under *Rhamnus* displayed the lowest quantity of this characteristic. The outcomes of the principal component analysis (PCA) revealed that the quantity of organic matter, clay content, fulvic and humic acids, porosity, and stability of soil aggregate in the soil beneath *Carpinus* played a significant role in enhancing the soil microbial ratio of this shrub in comparison to the other shrubs.

Conclusion

The findings of this investigation validate the capability of *Carpinus* foliage to ensure the conservation of soil quality indicators on the hilly grasslands of northern Iran. Therefore, it is proposed that restoration efforts be conducted in the designated region and other areas with similar ecological conditions. Additionally, it is recommended that special attention be given to the implementation of *Carpinus* and other indigenous shrub species to protect soil integrity.

Keywords: *Carpinus orientalis*, Microbial ratio, Organic acids, Organic matter, Shrub land

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۲۳-۲۳۷

تأثیر پوشش‌های درختچه‌ای بر برخی ویژگی‌های خاک در یک اقلیم نیمه‌خشک

زینب سهراب‌زاده^۱ - یحیی کوچ^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

چکیده

درختچه‌ها از مهم‌ترین اجزای اکوسیستم‌های مرتعی به شمار می‌آیند. با این حال مطالعات اندکی در خصوص تأثیر نوع پوشش‌های درختچه‌ای بر ویژگی‌های خاک اکوسیستم‌های مرتعی انجام شده است. در پژوهش حاضر، اثر پوشش درختچه‌ای لور (*Carpinus orientalis* Miller)، سرخه‌ولیک (*Crataegus microphylla* C. Koch)، زرشک (*Berberis integerrima* Bunge)، آلوچه وحشی (*Prunus spinosa* L.) و سیاه تنگرس (*Rhamnus pallasii* Fisch. and C. A. Mey) بر برخی ویژگی‌های خاک در بخش کوهستانی کیاکلا شهرستان نوشهر مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌منظور انجام این پژوهش، تعداد ۱۵ پایه از هر یک از گونه‌های درختچه‌ای اشاره شده انتخاب شد. در زیر تاج پوشش این گونه‌ها، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و در یک سطح 30×30 سانتی‌متر برداشت و به آزمایشگاه انتقال داده شد. مطابق با یافته‌های این پژوهش، بیشترین مقادیر ویژگی‌های تخلخل، پایداری خاکدانه، محتوی رس، اسیدهای فولویک و هیومیک و سهم میکروبی در خاک زیر پوشش درختچه‌ای لور مشاهده شد. در حالی که کم‌ترین مقادیر جرم مخصوص ظاهری، محتوی شن، شاخص‌های نسبت رس و نسبت رس اصلاح شده، نسبت شن به سیلت و نسبت سیلت به رس به خاک تحت تاج پوشش این گونه درختچه‌ای اختصاص داشت. ویژگی‌های ماده آلی، جرم مخصوص حقیقی و محتوی سیلت خاک تفاوت آماری معنی‌داری در بین پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه نشان ندادند. نتایج این پژوهش مؤید آن است که وجود پوشش درختچه‌ای لور می‌تواند منجر به بهبود وضعیت ویژگی‌های کیفیت خاک در مراتع کوهستانی شمال کشور گردد. در همین راستا پیشنهاد می‌شود برای احیاء اراضی تخریب‌یافته مرتعی در منطقه مورد مطالعه و همچنین مناطقی با شرایط اکولوژیکی مشابه، در کنار سایر گونه‌های درختچه‌ای بومی منطقه، توجه ویژه به استفاده از گونه لور برای حفاظت خاک گردد.

واژه‌های کلیدی: اسیدهای آلی، سهم میکروبی، لور، ماده آلی، مرتع مشجر

مقدمه

مراتع، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اشکال پوشش گیاهی، سطح گسترده‌ای از اراضی جهان را پوشانده است (Sircely et al., 2019). بیش از نیمی از سطح اراضی ایران را نیز اکوسیستم‌های مرتعی پوشش داده‌اند که جزء مهم‌ترین منابع تجدید شونده بشمار می‌آیند (Khatoony & Kolahy, 2021). مراتع از نظر اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند و در صورتی که به‌طور صحیح مدیریت و بهره‌برداری شوند می‌توانند نقش مهمی در شکوفایی اقتصادی هر کشور ایفا کنند (Sala et al., 2017). پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین عوامل در پیدایش خاک است و ویژگی‌های فیزیکی،

شیمیایی و زیستی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Soltani Toolarood et al., 2019). پژوهش‌های متعددی در مورد اثر گونه های گیاهی بر روی ویژگی‌های خاک صورت گرفته است (Zhang et al., 2019; Weidlich et al., 2020; Moscatelli et al., 2022). این اثرات می‌تواند به تنوع گونه‌های گیاهی بستگی داشته باشد که شامل کیفیت و سرعت تجزیه لایه آلی، مواد غذایی خاک، تنفس ریشه و جذب مواد مغذی و نیز تأثیر بر جوامع میکروبی و جانوری خاک می‌باشد (Qu et al., 2016; Liu et al., 2018). رویشگاه‌های مرتعی با توجه به ساختار چشم‌انداز از گونه‌های گیاهی با فرم‌های رویشی علفی، درختچه‌ای و درختی تشکیل شده‌اند. پوشش‌های درختچه‌ای، از مهم

۱ و ۲- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مرتعداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران

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

میکروبی تفسیر می‌شود (Yang et al., 2010). مقادیر بالای سهم میکروبی نشان‌دهنده نرخ بیشتر معدنی‌شدن است که باعث افزایش مصرف مواد مغذی خاک می‌گردد، همچنین نشان می‌دهد که نگهداری همان مقدار میکروارگانیزم به انرژی کمتری نیاز دارد که بیانگر عملکرد بالاتر خاک برای رشد میکروب‌های خاک است (Wen et al., 2014). مرور منابع حاکی از آن است که مطالعه و ارزیابی در خصوص بررسی تأثیر پوشش‌های درختچه‌ای بر ویژگی‌های خاک در یک اقلیم نیمه خشک (که دارای رویشگاه‌هایی با شرایط حساس و شکننده می‌باشند) کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو تحقیق حاضر با هدف بررسی تأثیر پوشش‌های درختچه‌ای بر ویژگی‌های خاک در یک اقلیم نیمه-خشک، به مطالعه اثر پوشش درختچه‌ای لور (*Carpinus orientalis* Miller)، سرخه‌ولیک (*Crataegus microphylla* C. Koch.)، زرشک (*Berberis integerrima* Bunge.)، آلوچه وحشی (*Prunus spinosa* L.) و سیاه تنگرس (*Rhamnus pallasii* Fisch. and C. A. Mey) بر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک در بخش کوهستانی کیاکلا شهرستان نوشهر پرداخته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

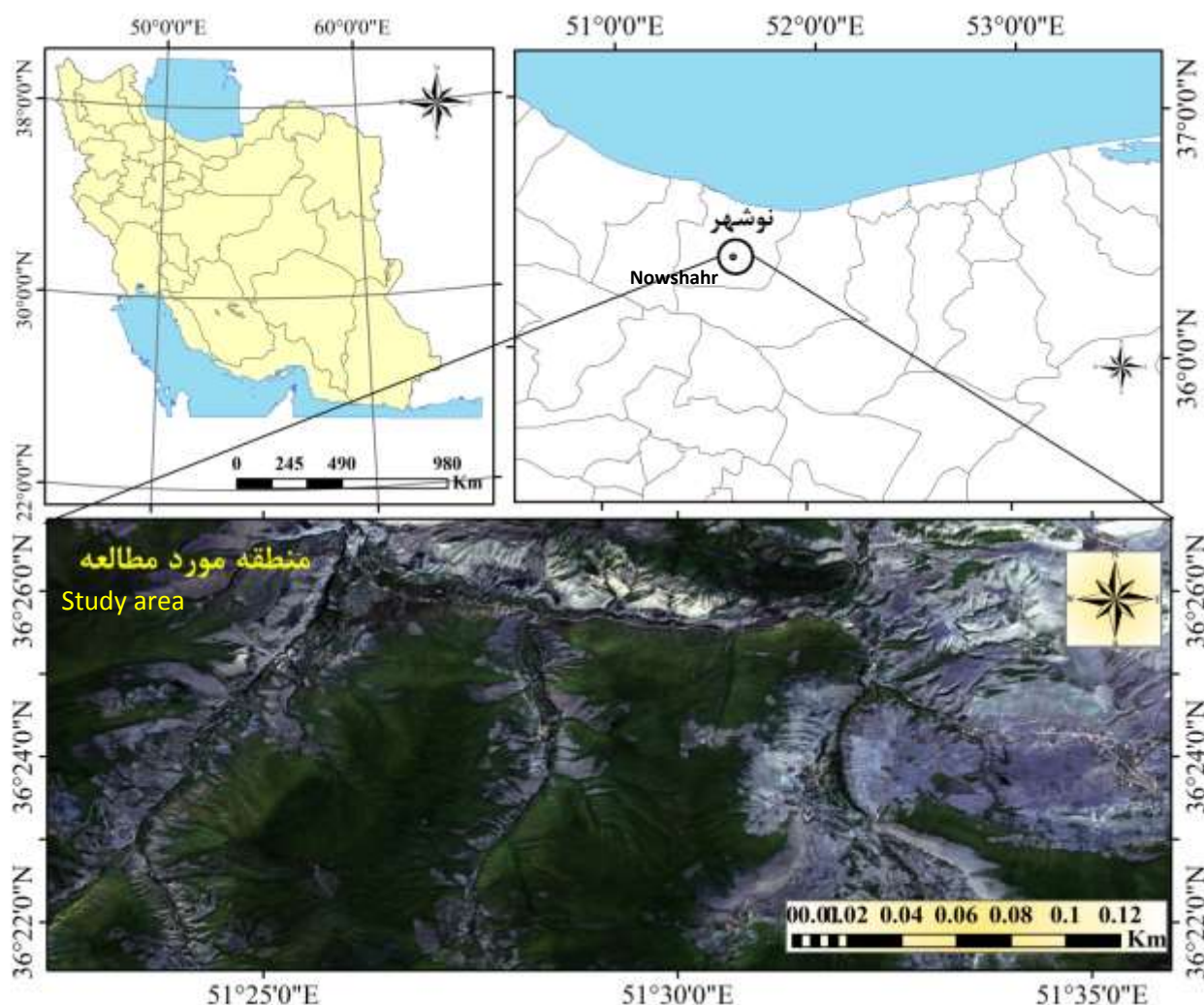
به‌منظور اجرای این پژوهش، بخش کوهستانی کیاکلا شهرستان نوشهر (شکل ۱)، که به‌صورت پیوسته با هم بوده و دارای حداقل اختلاف ارتفاع از سطح دریا، حداقل تغییر درصد و جهت شیب می‌باشند، مورد توجه قرار گرفت. متوسط ارتفاع از سطح دریا ۱۵۰۰ متر و شیب عمومی منطقه شرقی- غربی بوده که بطور متوسط حدود ۱۰ درصد می‌باشد. براساس اطلاعات ۳۰ ساله نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی، ایستگاه کليما تولوژی نوشهر، میزان بارندگی متوسط سالیانه در این منطقه ۳۶۵ میلی‌متر و پتانسیل تبخیر سالیانه آن برابر با ۱۳۰۰ میلی‌متر است. حداقل دما ۶ درجه سانتی‌گراد در بهمن‌ماه و حداکثر دما ۲۱ درجه سانتی‌گراد در مردادماه می‌باشد. میزان بارندگی سالیانه در این محدوده ۳۶۵ میلی‌متر بوده که حداقل آن در تیر و حداکثر آن در مهرماه می‌باشد. گرم‌ترین ماه سال، تیر و مرداد با میانگین دمای ۲۹/۲ درجه سانتی‌گراد و سردترین ماه سال، بهمن با میانگین دمای ۲/۶ درجه سانتی‌گراد است. از نظر شرایط آب و هوایی، براساس طبقه‌بندی اقلیمی آمبرژه، این منطقه در اقلیم نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود. منطقه مورد مطالعه توسط پوشش‌های درختچه‌ای از گونه‌های مختلف پوشیده شده است. در پژوهش حاضر، گونه‌های درختچه‌ای غالب منطقه شامل لور،

ترین اجزای اکوسیستم‌های مرتعی هستند و اثرات آن بر برخی از فرایندهای بیوشیمیایی بستر رویشگاه و لایه‌های سطحی خاک شناخته شده است (Kooch & Noghre, 2020). بنابراین نوع گونه‌های درختچه‌ای اثر قابل توجهی بر کیفیت خاک رویشگاه دارد (Soltani Toolarood et al., 2019). در همین راستا، کیفیت خاک را می‌توان با ادغام ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک ارزیابی کرد (Kooch et al., 2020).

محتوی ماده آلی خاک، شاخص کلیدی کیفیت و حاصلخیزی خاک محسوب می‌شود. مواد آلی از طریق فراهم‌سازی انرژی، فعالیت‌های زیستی خاک را تقویت و به شکل مستقیم ویژگی‌های خاک را اصلاح و از آلودگی و تخریب خاک جلوگیری می‌کنند (Qu et al., 2016). این ترکیبات نسبت به فعالیت‌های انسانی مانند شیوه‌های مدیریت زمین آسیب‌پذیر هستند و با توجه به مقادیر متفاوت مواد آلی در پوشش‌های مختلف اراضی، شناخت اثرات گونه‌های گیاهی مختلف بر مواد آلی خاک ضرورت دارد. درختچه‌های مختلف با تحریک تغییرپذیری ویژگی‌های خاک، کیفیت و کمیت مواد آلی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Liu et al., 2018). از نظر اکولوژیکی، خواص فیزیکی خاک دارای اهمیت زیادی می‌باشند، بطوری که ویژگی‌های زیستی و شیمیایی خاک از ویژگی‌های فیزیکی آن تأثیر می‌پذیرد. حضور پوشش‌های گیاهی از گونه‌های مختلف در عرصه‌های مرتعی نقش بسیار مهمی در تغییرپذیری ویژگی‌های فیزیکی خاک دارند. ویژگی‌های فیزیکی خاک تحت شرایط طبیعی با تأثیر پوشش‌های گیاهی در یک دوره طولانی توسعه پیدا می‌کند (Osman, 2013). محتوی کل مواد آلی شامل ترکیبات هیومیکی و غیرهیومیکی است. اجزای هیومیکی نسبت به ساختارهای غیرهیومیکی مواد آلی ترکیبات پایدارتری هستند که نقش مؤثری در جریان مواد مغذی نظام‌های بوم‌شناختی دارند و بخش قابل توجهی از کل کربن و نیتروژن آلی خاک را تشکیل می‌دهند (Guimarães et al., 2013). ترکیبات هیومیکی ظرفیت بافری خاک را بهبود می‌بخشند، ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک را افزایش می‌دهند، موجب دسترسی گیاه به ریز مغذی‌ها شده و از طریق ایجاد پیوند با فلزات، موجب کاهش سمیت فلزات سنگین در خاک می‌شوند. این ترکیبات ۴۰-۶۰ درصد از مواد آلی خاک را تشکیل داده و شامل سه بخش کلی ترکیبات هیومین (ذرات نامحلول هیومیکی)، هیومیک اسید (ذرات محلول در شرایط قلیایی) و فولویک اسید (ذرات محلول در شرایط اسیدی و قلیایی) می‌باشند (Lopez et al., 2008).

سهم میکروبی، شاخص مناسبی از وضعیت توزیع کربن فعال خاک بین بخش زنده و غیرزنده بوده و کیفیت کربن خاک را بیان می‌کند. سهم میکروبی بیانگر یک رابطه متقابل بین زی‌توده میکروبی کربن و معدنی‌شدن کربن آلی خاک است. به‌عبارت دیگر، این نسبت به‌عنوان پیش‌ماده در دسترس و بخشی از کربن کل تثبیت شده در سلول‌های

سرخه‌ولیک^۱، زرشک^۲، آلوچه وحشی^۳ و سیاه تنگرس^۴ مورد توجه است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران، شمال ایران
Figure 1- Location of the studied area in Mazandaran province, North of Iran

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی

به‌منظور انجام این پژوهش، ابتدا تعداد ۱۵ پایه از هر یک از گونه‌های درختچه‌ای اشاره شده انتخاب شد. برای برداشت نمونه‌های خاک ابتدا شعاع تاج درختچه‌های مورد مطالعه با متر نواری مشخص شدند و سپس در فاصله $\frac{1}{2}$ (نصف) شعاع تاج، نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۱۰ سانتی‌متری و در یک سطح 30×30 سانتی‌متر در چهار جهت (چهار نمونه) برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده در زیر تاج هر پایه با هم ادغام گردید، به‌طوری‌که در مجموع ۷۵ نمونه خاک برداشت و

به آزمایشگاه انتقال یافت. اندازه‌گیری کربن آلی به روش والکلی‌بلاک (Nelson & Sommers, 1996) و سپس مقدار ماده آلی با ضرب مقدار کربن آلی در ضریب^۵ $1/1.724$ (Alison, 1965; Tan, 2005) به‌دست آمد. پس از اندازه‌گیری جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه (Plaster, 1985) و جرم مخصوص حقیقی به روش پیکنومتر، تخلخل خاک با توجه به مقادیر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی محاسبه شد (Blake & Hartge, 1986). پایداری خاکدانه براساس روش الک تر (Yoder, 1936)، بافت خاک با استفاده از روش هیدرومتر (Gee &

4- *Rhamnus pallasii* Fisch. and C. A. Mey.

5- Van Bemmelen factor

1- *Crataegus microphylla* C. Koch.

2- *Berberis integerrima* Bunge.

3- *Prunus spinosa* L.

(Ort, 2002) اندازه‌گیری و سپس شاخص نسبت رس (CR) با رابطه (شن + سیلت / رس) (Bouyoucos, 1962) و شاخص اصلاح شده نسبت رس (MCR) با رابطه (شن + سیلت / رس + ماده آلی) (Kumar *et al.*, 1995) محاسبه شد. به منظور تعیین اسیدهای آلی خاک ابتدا نمونه‌های خاک تحت تیمار هیدروکلریک اسید ۰/۱ نرمال قرار گرفتند. سپس عصاره‌گیری خاک با ۵۰ میلی‌لیتر سدیم هیدروکسید ۰/۱ مولار در پیرو فسفات ۰/۱ مولار انجام شد. پس از سه بار تکرار عصاره‌گیری شده توسط هیدروکلریک اسید ۲ نرمال، تا pH ۲ اسیدی شد. مخلوط به‌دست آمده به خوبی هم‌زده شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق قرار گرفت. سپس با استفاده از سانتیفریوژ اسید فولویک از بخش جامد (ذرات اسید هیومیک) جدا شد. فرآیند ته‌نشینی و سانتیفریوژ تا خالص‌سازی نسبی بخش اسید هیومیک تکرار شد (Vorobeichik, 1997; Neher *et al.*, 2005). سهم میکروبی خاک، پس از اندازه‌گیری میزان زی‌توده میکروبی کربن به روش تدخین - استخراج (Brookes *et al.*, 1985) و تعیین کربن آلی، با استفاده از رابطه نسبت زی‌توده میکروبی کربن به کربن آلی محاسبه شد (Parkinson & Coleman, 1991).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در اولین مرحله، نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و همگن بودن واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. بدنبال حصول اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، به منظور مطالعه تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر مشخصه‌های مختلف خاک در ارتباط با نوع پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه از آزمون تجزیه واریانس یک‌طرفه استفاده شد. آزمون دانکن ($p < 0.05$) نیز جهت مقایسه چندگانه میانگین‌ها به کار گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۰ صورت پذیرفت. همچنین برای انجام آنالیز چند متغیره و تعیین ارتباط بین مشخصه‌های مختلف خاک در پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با ایجاد ماتریس حاصله در برنامه PC - ORD - Windows مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج شاخص‌های آماری توصیفی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک تحت پوشش‌های درختچه‌ای لور، سرخه‌ولیک، زرشک، آلوچه وحشی و سیاه‌تنگرس را در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از تجزیه واریانس ویژگی‌های خاک، حاکی از اثرات معنی‌دار نوع پوشش‌های گیاهی درختچه‌ای بر بسیاری از ویژگی‌های مورد مطالعه خاک می‌باشد (جدول ۲).

تغییرات ماده آلی خاک تحت پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه تفاوت آماری معنی‌داری را نشان نداد، در هر حال بیشترین مقادیر این ویژگی در خاک زیر تاج‌پوشش گونه لور اندازه‌گیری شد. در ارتباط با ماده آلی خاک، لی و همکاران (Lai *et al.*, 2016) بیان کردند که، گونه‌های مختلف درختچه‌ای می‌توانند اثرات متفاوتی بر میزان مواد آلی خاک داشته باشد. در همین راستا، اگرچه مطابق با پژوهش حاضر تفاوت آماری معنی‌داری در میزان ماده آلی خاک مشاهده نشد اما مقادیر ماده آلی در خاک زیر تاج گونه لور بیشتر از سایر درختچه‌های مورد مطالعه بوده است (جدول ۲ و ۳). مطابق با گزارش شه‌پیری (Shahpouri, 2022)، در مقایسه با غالب گونه‌های درختچه‌ای مراتع مشجر شمال ایران، گونه لور دارای ساختار تاجی گسترده‌تری بوده و میزان برگ‌ریزی بسیار زیادی دارد. همچنین، وی اشاره داشته است که لاشبرگ این گونه درختچه‌ای دارای کیفیت بالایی است که مورد پسند بسیاری از خرده‌ریزخواران و تجزیه‌کنندگان است. بر همین اساس مقادیر عددی ماده آلی خاک تحت پوشش درختچه‌ای لور بیشتر از سایر پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه بوده است. کمترین مقادیر مشخصه جرم مخصوص ظاهری در خاک زیر تاج‌پوشش درختچه لور و سرخه‌ولیک به ثبت رسید، در حالی که پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه اثر معنی‌داری بر جرم مخصوص حقیقی خاک نداشتند. بیشترین مقادیر تخلخل خاک نیز به خاک زیر تاج‌پوشش درختچه لور تعلق داشت، در حالی که کمترین مقادیر این مشخصه در خاک زیر تاج سیاه تنگرس و آلوچه وحشی مشاهده شدند (جدول ۲ و ۳). کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل خاک تحت پوشش درختچه‌ای لور می‌تواند در ارتباط با میزان ماده آلی خاک باشد. در واقع، تغییر میزان مواد آلی ورودی به خاک می‌تواند بسیاری از ویژگی‌های دیگر خاک را نیز تحت تأثیر قرار دهد. در همین راستا، تجمع بیشتر مواد آلی منجر به کاهش جرم مخصوص ظاهری (Wulanningtyas *et al.*, 2021) و همچنین افزایش تخلخل خاک (Schwendenmann *et al.*, 2003) می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، پایدارترین خاکدانه‌ها به ترتیب تحت پوشش درختچه‌ای لور و سرخه ولیک به ثبت رسید. پایداری خاکدانه‌ها غالباً متأثر از میزان رس و مواد آلی خاک می‌باشد (Boudjabi & Chenchouni, 2022). با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، به دلیل وجود مواد آلی و رس بیشتر در خاک زیر تاج‌پوشش درختچه لور، میزان پایداری خاکدانه‌ها نیز افزایش معنی‌داری داشته است. خاک زیر تاج‌پوشش درختچه سیاه تنگرس دارای بیشترین مقدار شن و خاک تحت گونه لور دارای کمترین مقدار این مشخصه خاک بوده است. محتوی سیلت خاک تفاوت آماری معنی‌داری را در بین پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه نشان ندادند، در حالی که حداکثر و حداقل مقدار رس به ترتیب متعلق به خاک زیر تاج‌پوشش درختچه‌های لور و سیاه تنگرس بود (جدول ۲ و ۳).

جدول ۱- آمار توصیفی ویژگی‌های مختلف خاک در منطقه مورد مطالعه
Table 1- Descriptive statistics of different soil properties in the study area

فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین								
ویژگی‌های خاک Soil properties	تعداد Number	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation	اشتباه معیار Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		حداقل Minimum	حداکثر Maximum
					کران پایین	کران بالا		
					Lower Bound	Upper Bound		
ماده آلی Organic matter (%)	75	7.38	3.07	0.35	6.67	8.09	3.68	16.84
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	75	1.29	0.15	0.02	1.25	1.32	1.01	1.65
جرم مخصوص حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	75	2.40	0.23	0.03	2.35	2.45	1.15	2.88
تخلخل Porosity (%)	75	0.46	0.10	0.01	0.43	0.48	0.15	0.62
پایداری خاکدانه Aggregate stability (%)	75	58.49	12.32	1.42	55.65	61.32	33.46	80.74
شن Sand (%)	75	26.80	6.86	0.79	25.22	28.38	17	41
سیلت Silt (%)	75	40.03	7.71	0.89	38.25	41.80	21	57
رس Clay (%)	75	33.17	6.68	0.77	31.64	34.71	19	48
شاخص CR CR Index	75	2.15	0.71	0.08	1.99	2.31	1.08	4.26
شاخص MCR MCR Index	75	1.75	0.54	0.06	1.62	1.87	0.91	3.51
شاخص شن / سیلت Sand/Silt Index	75	0.72	0.31	0.04	0.65	0.79	0.33	1.62
شاخص سیلت / رس Silt/Clay Index	75	1.29	0.47	0.05	1.18	1.40	0.47	2.75
سید فولویک Fulvic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	75	115.23	65.50	7.56	100.16	130.30	6	425
اسید هیومیک Humic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	75	61.08	58.49	6.75	47.62	74.54	3	303
سهم میکروبی Microbial ratio (MBC/Corg)	75	60.86	34.40	3.97	52.95	68.78	18.19	210.54

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های مختلف خاک تحت پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه
Table 2- Variance analysis of different soil properties under the studied shrub cover

ویژگی Properties	منبع تغییرات Source of Variation	مجموع مربعات Sum of square	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean square	مقدار F F value	معنی‌داری Significance
ماده آلی Organic matter (%)	بین گروه‌ها Between groups	19.06	4	4.76	0.491	0.742 ^{ns}
	درون گروه‌ها Within groups	679.42	70	9.70		
	کل Total	698.48	74			
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	بین گروه‌ها Between groups	0.69	4	0.17	13.754	0.000 ^{**}
	درون گروه‌ها Within groups	0.88	70	0.01		
	کل Total	1.57	74			
جرم مخصوص حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	بین گروه‌ها Between groups	0.03	4	0.01	0.013	1.000 ^{ns}
	درون گروه‌ها Within groups	4.03	70	0.05		
	کل Total	4.04	74			
تخلخل Porosity (%)	بین گروه‌ها Between groups	0.15	4	0.04	4.427	0.003 ^{**}
	درون گروه‌ها Within groups	0.62	70	0.09		
	کل Total	0.78	74			
پایداری خاکدانه Aggregate stability (%)	بین گروه‌ها Between groups	4135.90	4	1033.97	10.197	0.000 ^{**}
	درون گروه‌ها Within groups	7097.98	70	101.40		
	کل Total	11233.89	74			
شن Sand (%)	بین گروه‌ها Between groups	1740.26	4	435.06	17.445	0.000 ^{**}
	درون گروه‌ها Within groups	1745.73	70	24.93		
	کل Total	3486.00	74			
سیلت Silt (%)	بین گروه‌ها Between groups	107.81	4	26.95	0.439	0.780 ^{ns}
	درون گروه‌ها Within groups	4296.13	70	61.37		
	کل Total	4403.94	74			
رس Clay (%)	بین گروه‌ها Between groups	1928.08	4	482.02	24.545	0.000 ^{**}
	درون گروه‌ها Within groups	1374.66	70	19.63		

	کل	3302.74	74			
	Total					
شاخص CR	بین گروه‌ها	21.67	4	5.41	24.737	0.000**
CR Index	Between groups					
	درون گروه‌ها	15.33	70	0.21		
	Within groups					
	کل	37.01	74			
	Total					
شاخص MCR	بین گروه‌ها	12.15	4	3.04	27.702	0.000**
MCR Index	Between groups					
	درون گروه‌ها	9.37	70	0.13		
	Within groups					
	کل	21.53	74			
	Total					
شاخص شن / سیلت	بین گروه‌ها	1.24	4	0.31	3.972	0.009**
Sand/Silt Index	Between groups					
	درون گروه‌ها	5.94	70	0.08		
	Within groups					
	کل	7.19	74			
	Total					
شاخص سیلت / رس	بین گروه‌ها	3.96	4	0.99	5.492	0.001**
Silt/Clay Index	Between groups					
	درون گروه‌ها	12.62	70	0.18		
	Within groups					
	کل	16.58	74			
	Total					
اسید فولویک	بین گروه‌ها	149785.28	4	37446.32	15.635	0.000**
Fulvic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	Between groups					
	درون گروه‌ها	167653.86	70	2395.05		
	Within groups					
	کل	317439.14	74			
	Total					
اسید هیومیک	بین گروه‌ها	129701.38	4	32425.34	18.391	0.000**
Humic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	Between groups					
	درون گروه‌ها	123420.13	70	1763.14		
	Within groups					
	کل	253121.52	74			
	Total					
سهم میکروبی	بین گروه‌ها	20151.83	4	5037.95	5.230	0.001**
Microbial ratio (MBC/Corg)	Between groups					
	درون گروه‌ها	67428.16	70	963.36		
	Within groups					
	کل	87579.99	74			
	Total					

ns، ** و * به ترتیب عدم معنی‌داری، معنی‌داری در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد.

ns، ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

تفاوت‌های آماری معنی‌داری در بین اجزای شن و رس خاک مشاهده شد (جدول ۲). در همین راستا نتایج مطالعات مختلف (Augusto et al., 2002; Levula et al., 2003; al., 2002) نشان می‌دهد پوشش‌های گیاهی مختلف با تفاوت در مواد آلی ورودی و تأثیر بر فعالیت موجودات خاکزی می‌توانند در بلند مدت باعث تغییرات در بافت خاک شوند. به‌طوری‌که

بافت خاک یکی از ویژگی‌های ثابت خاک بوده و تغییر آن در اثر نوع پوشش‌های گیاهی و در کوتاه‌مدت امکان‌پذیر نمی‌باشد، در هر حال تغییر نوع پوشش گیاهی می‌تواند در یک دوره بلندمدت بر تغییرات اجزای بافت خاک مؤثر واقع گردند (Woloszczyk et al., 2020). در پژوهش حاضر نیز با توجه به متفاوت بودن نوع گونه‌های درختچه‌ای،

اسید فولویک نسبت به دیگر ترکیبات هیومیکی بیان کردند. همچنین همبستگی منفی جرم مخصوص ظاهری و اسیدهای آلی مذکور (مطابق نتایج PCA) بیانگر حفاظت فیزیکی بقایا توسط ذرات خاک است که منجر به کاهش دسترسی جوامع میکروبی به مواد آلی و افزایش اسید فولویک و هیومیک خاک می‌شود (Sigurdsson & Gudleifsson, 2013). در این دسته از مواد آلی، هوموس شامل ترکیبات غیرهیومیکی و ناپایدار است درحالی‌که افزایش ترکیبات هیومیکی در خاک نیازمند جریان ورودی دائم و ماندگاری بالای بقایای آلی است و هرچه میزان تخریب و تجزیه ماده آلی تشدید شود تشکیل هوموس در فرم پایدار کاهش می‌یابد (Kooch et al., 2016).

خاک زیر تاج‌پوشش لور دارای بیشترین مقدار سهم میکروبی و خاک زیر تاج‌پوشش سیاه تنگرس دارای کمترین مقدار این ویژگی بوده است (جدول ۲ و ۳). در مقابل افزایش مقدار ماده آلی، محتوی رس، اسیدهای فولویک و هیومیک، تخلخل و پایداری در خاک تحت گونه لور نقش مؤثری در افزایش سهم میکروبی خاک این گونه درختچه‌ای در مقایسه با سایر درختچه‌ها داشته است (شکل ۲). سهم فعالیت‌های میکروبی خاک در بیشتر رویشگاه‌ها بسیار برجسته بوده و تغییرات کوچک در زی‌توده‌های میکروبی و کربن آلی، می‌تواند تأثیر عمده‌ای بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی عناصر غذایی داشته باشد (Yang et al., 2010). سهم میکروبی خاک، نشان‌دهنده تعادل در اکوسیستم خاک است. همچنین شاخص معدنی‌شدن مواد آلی به‌وسیله میکروب‌های خاک می‌باشد. مقادیر بالای این نسبت نشان‌دهنده نرخ بالای معدنی‌شدن است و می‌تواند نرخ مصرف مواد غذایی خاک را تحریک کند. علاوه بر این، میزان بالای این نسبت بیانگر این است که نگهداری همان مقدار از میکروارگانیسم‌ها به انرژی کمتری نیاز دارد که حاکی از کیفیت بالای خاک برای رشد میکروارگانیسم‌های خاک است (Wen et al., 2014). اثرات منفی میزان شن بر روی سهم میکروبی کربن در خاک‌های مختلف گزارش شده است (Muhammad et al., 2008). این در حالی است که محتوی رس بالا در داخل خاک می‌تواند سهم میکروبی خاک را افزایش دهد (Yang et al., 2010). همچنین، موساتلی و همکاران (Moscatelli et al., 2007) گزارش نمودند که در خاک رویشگاه‌های مختلف بین اسیدهای آلی و سهم میکروبی خاک همبستگی مثبت وجود دارد. مرور منابع (Muhammad et al., 2008; Yang et al., 2010; Wen et al., 2014; Yang et al., 2010) بیانگر اثرگذاری مشخصه‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی خاک بر تغییرات سهم‌های میکروبی خاک در رویشگاه‌ها با گونه‌های گیاهی متفاوت می‌باشد. سهم‌های میکروبی خاک شاخص‌های مفیدی برای ارزیابی تغییرات حاصل‌خیزی خاک به شمار می‌روند (Wang et al., 2011)، که می‌توانند در ارزیابی وضعیت رویشگاه‌ها مورد توجه قرار گیرند.

نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) در ارتباط با پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه و ویژگی‌های مورد بررسی خاک نشان می‌دهد که محورهای اول و دوم در مجموع ۶۱/۱۱ درصد از تغییرات واریانس

افزایش مواد آلی خاک در زیر تاج‌پوشش لور با افزایش میزان چسبندگی ذرات خاک و افزایش پایداری خاکدانه‌ها (Carpenter & Chong, 2010) مانع از شستشوی خاک و از دست رفتن ذرات ریز مثل رس می‌شود. به‌علاوه تجمع بیشتر رس در زیر تاج‌پوشش درختچه‌های لور احتمالاً به خاطر وجود تاج‌پوشش بسته‌تر این گونه می‌باشد، در حالی که خاک زیر تاج‌پوشش سایر گونه‌های درختچه‌ای مورد مطالعه به‌دلیل باز بودن قسمت‌های فوقانی، بیشتر تحت تأثیر بارش‌های سالیانه قرار گرفته و منجر به آبشویی ذرات رس از لایه‌های بالایی خاک و تجمع آنها در لایه‌های پایینی (فرآیند آبشویی رس) می‌شوند (Beuschel et al., 2020).

بیشترین نسبت شاخص‌های CR و MCR به خاک زیر تاج‌پوشش سیاه تنگرس تعلق داشت، در حالی‌که خاک لور دارای کمترین مقدار این شاخص‌ها بوده‌اند. خاک گونه سیاه‌تنگرس دارای بالاترین نسبت شن به سیلت بوده و سایر گونه‌های درختچه‌ای تفاوت آماری معنی‌داری را از نظر این شاخص خاک نداشته‌اند. بالاترین مقدار نسبت سیلت به رس خاک در زیر پوشش درختچه‌ای سیاه‌تنگرس بوده و کمترین آن در زیر پوشش‌های درختچه‌ای لور و سرخه ولیک بوده‌اند (جدول ۲ و ۳). مقادیر بالاتر شاخص‌های CR و MCR (و همچنین نسبت‌های بزرگتر شن به سیلت و سیلت به رس) حاکی از مستعد بودن بیشتر خاک به فرسایش می‌باشد (Olaniya et al., 2020). مقادیر بالای شاخص‌های فرسایش‌پذیری در خاک زیر تاج‌پوشش درختچه سیاه تنگرس می‌تواند بیانگر مستعد بودن خاک زیر تاج‌پوشش این گونه درختچه‌ای به فرسایش باشد. این موضوع از جنبه مدیریتی بسیار حائز اهمیت است بطوری‌که برای جلوگیری از فرسایش خاک می‌توان از سایر گونه‌های دیگر (به‌ویژه گونه درختچه‌ای لور) برای احیای اراضی تخریب‌یافته و یا تقویت رویشگاه‌ها برای حفاظت از خاک استفاده نمود.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که ترکیبات هیومیکی در نتیجه اثر پوشش‌های درختچه‌ای مختلف تفاوت آماری معنی‌داری داشته‌اند (جدول ۲). به‌طوری‌که اسیدهای فولویک و هیومیک با روندی مشابه به‌ترتیب تحت پوشش درختچه‌ای لور، سرخه‌ولیک، زرشک، آلوچه وحشی و سیاه تنگرس بیشترین مقادیر را نشان داده‌اند (جدول ۳). روند یکسان تغییر اسید فولویک و هیومیک با توجه به اینکه ابتدا اسید فولویک و سپس در طول تجزیه به‌دنبال فعالیت‌های میکروبی اسید هیومیک تولید می‌شود طبیعی است (Sigurdsson & Gudleifsson, 2013). صیقلانی و همکاران (Seyghalani et al., 2015) در بررسی اثر پوشش‌های گیاهی مختلف بر برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک، افزایش اسید فولویک و اسید هیومیک را مرتبط با محتوی بیشتر بقایای آلی بیان کردند که مشابه نتایج بررسی حاضر است. بنابراین افزایش ترکیبات اسید فولویک و اسید هیومیک تحت پوشش درختچه‌ای لور نتیجه حجم بیشتر مواد آلی است. کوتزه و همکاران (Kotzé et al., 2016) افزایش محتوی اسید فولویک خاک را نتیجه نرخ بیشتر بازگشت

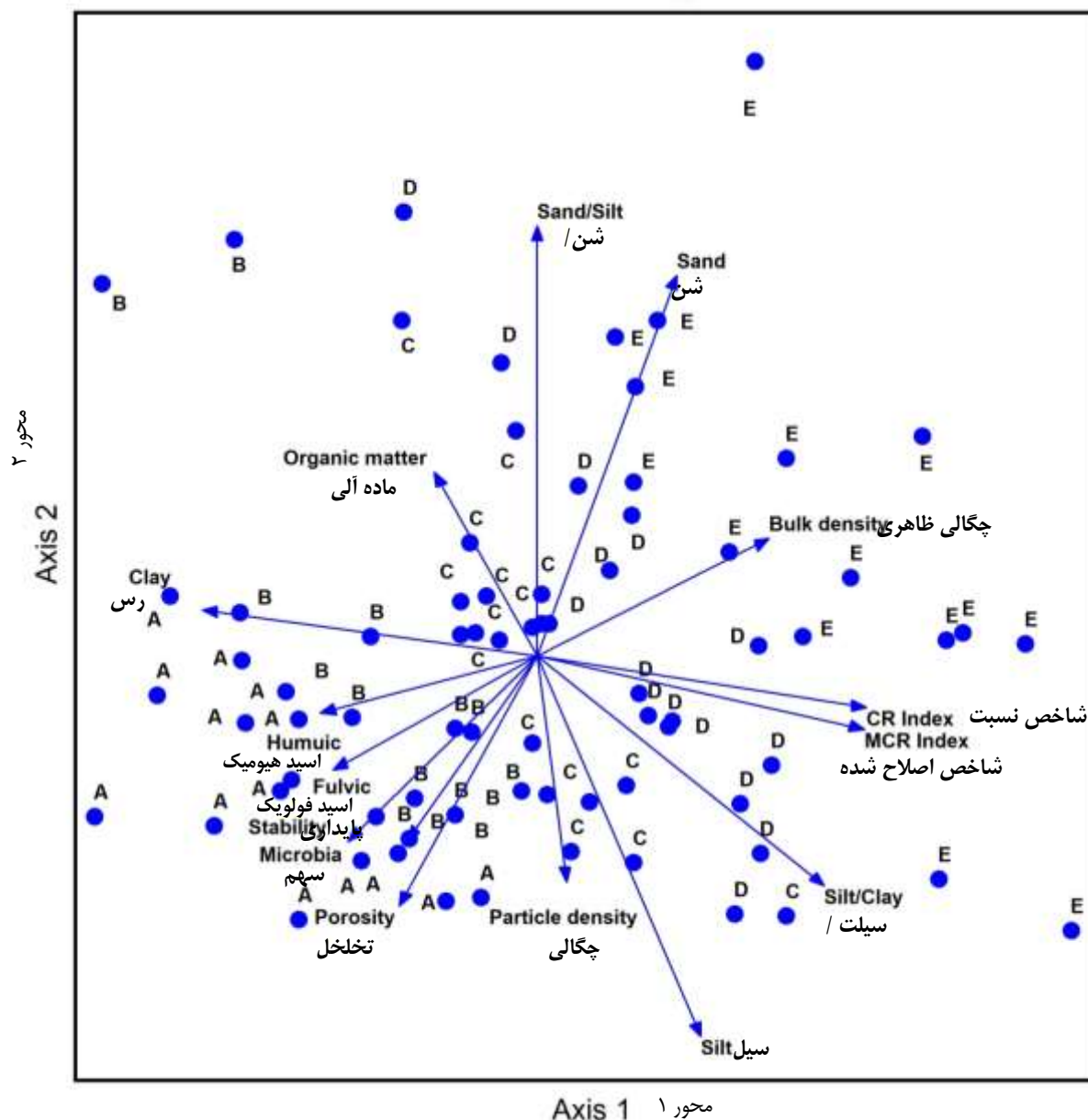
است. درحالی‌که میزان شن، جرم مخصوص ظاهری و شاخص‌های فرسایش‌پذیری خاک رابطه منفی با مقدار سهم میکروبی نشان داد. به‌طوری‌که پوشش‌های درختچه‌ای سرخه‌ولیک، زرشک، آلوچه وحشی و سیاه‌تنگرس به‌ترتیب با افزایش میزان شن، جرم مخصوص ظاهری و شاخص‌های فرسایش‌پذیری خاک، موجب کاهش مقدار سهم میکروبی و حاصلخیزی خاک شده‌اند (شکل ۲).

کل را توجیح می‌کند (شکل ۲)، به‌طوری‌که پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه و ویژگی‌های مورد بررسی خاک پراکنش متفاوتی را نشان می‌دهد. همسو با نتایج تحلیل واریانس، نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز نشان می‌دهد، مقادیر تخلخل، پایداری، درصد رس، اسیدهای هیومیک و فولویک و میزان ماده آلی خاک رابطه مثبتی با مقدار سهم میکروبی خاک به‌عنوان شاخص حاصلخیزی خاک دارد به طوری که افزایش ویژگی‌های مذکور در خاک زیر تاج‌پوشش درختچه‌ها موجب افزایش میزان سهم میکروبی و بهبود حاصلخیزی خاک شده

جدول ۳- میانگین ($\pm$ اشتباه معیار) ویژگی‌های خاک در ارتباط با پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه
Table 3- Mean ($\pm$ standard error) of soil properties in relation to the studied shrub covers

پوشش درختچه‌ای Shrub cover	لور <i>Carpinus orientalis</i>		سرخه ولیک <i>Crataegus microphylla</i>		زرشک <i>Berberis integerrima</i>		آلوچه وحشی <i>Prunus spinosa</i>		سیاه تنگرس <i>Rhamnus pallasii</i>	
ویژگی خاک Soil properties	میانگین Mean	اشتباه معیار ±SE	میانگین Mean	اشتباه معیار ±SE	میانگین Mean	اشتباه معیار ±SE	میانگین Mean	اشتباه معیار ±SE	میانگین Mean	اشتباه معیار ±SE
ماده آلی Organic matter (%)	8.09	0.79	7.85	0.88	7.04	0.86	7.12	0.58	6.78	0.84
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g cm ⁻³)	1.13 b	0.03	1.21 b	0.02	1.31 a	0.02	1.38 a	0.02	1.37 a	0.02
جرم مخصوص حقیقی Particle density (g cm ⁻³)	2.39	0.03	2.40	0.03	2.40	0.04	2.40	0.04	2.39	0.10
تخلخل Porosity (%)	52.20 a	0.01	49.47 ab	0.01	44.67 bc	0.01	42.13 c	0.01	39.73 c	0.04
پایداری خاکدانه Aggregate stability (%)	68.64 a	2.24	64.11 ab	3.09	58.49 bc	2.12	53.44 cd	2.47	47.73 d	2.92
شن Sand (%)	21.73 d	1.09	23.20 cd	1.23	25.73 bc	1.25	27.86 b	1.37	35.46 a	1.45
سیلت Silt (%)	38.46	1.99	39.86	1.75	40.66	2.02	41.91	2.06	39.20	2.24
رس Clay (%)	39.80 a	1.41	36.93 a	1.00	33.60 b	0.97	30.20 c	1.01	25.33 d	1.25
شاخص CR CR Index	1.56 d	0.10	1.73 cd	0.06	2.01 c	0.10	2.35 b	0.10	3.08 a	0.19
شاخص MCR MCR Index	1.29 d	0.07	1.43 cd	0.05	1.66 bc	0.07	1.91 b	0.08	2.43a	0.15
شاخص شن / سیلت Sand/Silt Index	0.61	0.07	0.62 b	0.07	0.67 b	0.06	0.71 b	0.07	0.96 a	0.07
شاخص سیلت / رس Silt/Clay Index	1.00 c	0.08	1.10 c	0.06	1.25 bc	0.010	1.43 ab	0.10	1.64 a	0.15
اسید فولویک Fulvic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	189.60 a	22.57	141.46 b	9.29	97.46 c	9.68	76.80 c	6.70	70.80 c	6.59
اسید هیومیک Humic acid (mg 100 g ⁻¹ soil)	136.06 a	16.52	73.46 b	9.78	43.73 bc	3.56	33.73 c	4.32	18.40 c	2.57
سهم میکروبی Microbial ratio (MBC/Corg)	83.82 a	3.31	65.35 ab	4.85	67.83 ab	5.70	52.45 bc	4.02	34.84 c	3.12

حروف انگلیسی متفاوت بیانگر وجود تفاوت آماری معنی‌دار در بین پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه می‌باشد.
Different English letters indicate significant differences between the studied shrub covers.



شکل ۲- ارتباط پوشش‌های درختچه‌ای مورد مطالعه و ویژگی‌های خاک در آنالیز PCA (فاکتور اول: مقدار ویژه = ۵/۶۰، درصد واریانس = ۳۷/۳۸، درصد واریانس تجمعی = ۳۷/۳۸ و فاکتور دوم: مقدار ویژه = ۳/۵۵، درصد واریانس = ۲۳/۷۲، درصد واریانس تجمعی = ۶۱/۱۱). A: پوشش درختچه‌ای لور، B: پوشش درختچه‌ای سرخه‌ولیک، C: پوشش درختچه‌ای زرشک، D: پوشش درختچه‌ای آلوده وحشی و E: پوشش درختچه‌ای سیاه تنگرس.

Figure 2- Relationship between the studied shrub cover and soil properties in principal component analysis (PC1; Eigenvalue= 5.60, Percentage of Variance= 37.38, Cumulative Percentage of Variance= 37.38 and PC2; Eigenvalue= 3.55, Percentage of Variance= 23.72, Cumulative Percentage of Variance= 61.11). A; *Carpinus orientalis* Miller., B; *Crataegus microphylla* C. Koch., C; *Berberis integerrima* Bunge., D; *Prunus spinosa* L. and E; *Rhamnus pallasii* Fisch.

نتیجه‌گیری

نوشهر باعث ایجاد تغییرات معنی‌داری در ویژگی‌های مورد بررسی خاک شد. مطابق با یافته‌های این پژوهش، درختچه لور با ایجاد شرایط مناسب، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را در مقایسه با سایر گونه‌های درختچه‌ای در منطقه مورد مطالعه بهبود بخشیده است.

به‌طور کلی نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تغییر نوع گونه‌های درختچه‌ای در رویشگاه مرتعی بخش کوهستانی کیاکلا شهرستان

بررسی خاک داشته است. نتایج این پژوهش مؤید آن است که وجود پوشش درختچه‌ای لور می‌تواند منجر به حفظ ویژگی‌های کیفیت خاک در مراتع کوهستانی شمال کشور گردد. در همین راستا پیشنهاد می‌شود برای احیاء اراضی تخریب‌یافته مرتعی در منطقه مورد مطالعه و همچنین مناطقی با شرایط اکولوژیکی مشابه، در کنار سایر گونه‌های درختچه‌ای بومی منطقه، توجه ویژه به استفاده از گونه لور برای حفاظت خاک گردد.

به‌طوری‌که بیشترین مقادیر تخلخل، پایداری خاکدانه، محتوی رس، اسیدهای فولویک و هیومیک و سهم میکروبی در خاک زیر تاج‌پوشش درختچه لور مشاهده شد. این درحالی است که درختچه لور، میزان جرم مخصوص ظاهری، محتوی شن و شاخص‌های فرسایش‌پذیری خاک را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است. براساس نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی، به‌ترتیب، گونه‌های درختچه‌ای لور، سرخه‌ولیک، زرشک، آلوچه وحشی و سیاه‌تنگرس، قابلیت بیشتری در بهبود ویژگی‌های مورد

References

- Allison, L.E. (1965). Organic carbon. *Methods of soil analysis/Madison, Wisc*, 1367-1376.
- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., & Rothe, A. (2002). Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Annals of Forest Science*, 59(3), 233-253. <https://doi.org/10.1051/forest:2002020>
- Beuschel, R., Piepho, H.P., Joergensen, R.G., & Wachendorf, C. (2020). Impact of willow-based grassland alley cropping in relation to its plant species diversity on soil ecology of former arable land. *Applied Soil Ecology*, 147, 103373. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103373>
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). Particle density. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 377-382. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c14>
- Boudjabi, S., & Chenchouni, H. (2022). Soil fertility indicators and soil stoichiometry in semi-arid steppe rangelands. *Catena*, 210, 105910. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105910>
- Bouyoucos, G.J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy journal*, 54(5), 464-465. <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. (1985). Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6), 837-842.
- Cambardella, C.A., Gajda, A.M., Doran, J.W., Wienhold, B.J., Kettler, T.A., & Lal, R. (2001). Estimation of particulate and total organic matter by weight loss-on-ignition. *Assessment Methods for Soil Carbon*, 349-359.
- Carpenter, D.R., & Chong, G.W. (2010). Patterns in the aggregate stability of Mancos Shale derived soils. *Catena*, 80(1), 65-73.
- Chen, Y., Wei, T., Sha, G., Zhu, Q., Liu, Z., Ren, K., & Yang, C. (2022). Soil enzyme activities of typical plant communities after vegetation restoration on the Loess Plateau, China. *Applied Soil Ecology*, 170, 104292. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104292>
- Gee, G.W., & Orr, D. (2002). Particle-Size Analysis. 255-289. *Methods of soil analysis. Part, 4*.
- Guimarães, D.V., Gonzaga, M.I.S., da Silva, T.O., da Silva, T.L., da Silva Dias, N., & Matias, M.I.S. (2013). Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. *Soil and Tillage Research*, 126, 177-182. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.07.010>
- Jafari, M., & Sarmadian, F. (2003). *Fundamentals of Soil Science and Soil Classification*. University of Tehran Press. First Edition. (In Persian)
- Khatoony, N., & Kolahi, M. (2021). Investigation role and function of rangelands on water. *Journal of Water and Sustainable Development*, 8(2), 91-104. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v8i2.1004>
- Kooch, Y., & Noghre, N. (2020). Nutrient cycling and soil-related processes under different land covers of semi-arid rangeland ecosystems in northern Iran. *Catena*, 193, 104621. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104621>
- Kooch, Y., Mehr, M.A., & Hosseini, S.M. (2020). The effect of forest degradation intensity on soil function indicators in northern Iran. *Ecological Indicators*, 114, 106324. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106324>
- Kooch, Y., Rostayee, F., & Hosseini, S.M. (2016). Effects of tree species on topsoil properties and nitrogen cycling in natural forest and tree plantations of northern Iran. *Catena*, 144, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.002>
- Kotzé, E., Loke, P.F., Akhosi-Setaka, M.C., & Du Preez, C.C. (2016). Land use change affecting soil humic substances in three semi-arid agro-ecosystems in South Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 194-202. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.10.007>
- Kumar, K.A.U.S.H.A.L., Tripathi, S.K., & Bhatia, K.S. (1995). Erodibility characteristics of Rendhar watershed soils of Bundelkhand. *Indian Journal of Soil Conservation*, 23(3), 200-204.
- Lai, Z., Zhang, Y., Liu, J., Wu, B., Qin, S., & Fa, K. (2016). Fine-root distribution, production, decomposition, and effect on soil organic carbon of three revegetation shrub species in northwest China. *Forest Ecology and Management*, 359, 381-388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.025>
- Levula, J., Ilvesniemi, H., & Westman, C.J. (2003). Relation between soil properties and tree species composition

- in a Scots pine-Norway spruce stand in southern Finland. *Silva Fennica*, 37(2), 205-218.
22. Li, Y., Zhou, W., Jing, M., Wang, S., Huang, Y., Geng, B., & Cao, Y. (2022). Changes in reconstructed soil physicochemical properties in an opencast mine dump in the Loess Plateau Area of China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(2), 706. <https://doi.org/10.3390/ijerph19020706>
23. Liu, D., Huang, Y., An, S., Sun, H., Bhople, P., & Chen, Z. (2018). Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients. *Catena*, 162, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.028>
24. López, R., Gondar, D., Iglesias, A., Fiol, S., Antelo, J., & Arce, F. (2008). Acid properties of fulvic and humic acids isolated from two acid forest soils under different vegetation cover and soil depth. *European Journal of Soil Science*, 59(5), 892-899. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01048.x>
25. Mojtahedi, M.R., & Nik Nahad Qormakher, H. (2013). The effect of changing pasture land use on some physical and chemical properties of soil. First National Conference on Natural Resources Management, 16 pages. (In Persian)
26. Moscatelli, M.C., Di Tizio, A., Marinari, S., & Grego, S. (2007). Microbial indicators related to soil carbon in Mediterranean land use systems. *Soil and Tillage Research*, 97(1), 51-59. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.007>
27. Moscatelli, M.C., Marabottini, R., Massaccesi, L., & Marinari, S. (2022). Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional*, 29, e00500. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00500>
28. Muhammad, S., Müller, T., & Joergensen, R.G. (2008). Relationships between soil biological and other soil properties in saline and alkaline arable soils from the Pakistani Punjab. *Journal of Arid Environments*, 72(4), 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.06.016>
29. Neher, D.A., Wu, J., Barbercheck, M.E., & Anas, O. (2005). Ecosystem type affects interpretation of soil nematode community measures. *Applied Soil Ecology*, 30(1), 47-64. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2005.01.002>
30. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
31. Olaniya, M., Bora, P.K., Das, S., & Chanu, P.H. (2020). Soil erodibility indices under different land uses in Ri-Bhoi district of Meghalaya (India). *Scientific Reports*, 10(1), 14986. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72070-y>
32. Osman, K.T., & Osman, K.T. (2013). Physical properties of forest soils. *Forest Soils: Properties and Management*, 19-44.
33. Parkinson, D., & Coleman, D.C. (1991). Microbial communities, activity and biomass. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34(1-4), 3-33. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(91\)90090-K](https://doi.org/10.1016/0167-8809(91)90090-K)
34. Plaster, E.J. (1985). *Soil science and management*. Delmar Publishers Inc., Albany, p 124.
35. Qu, L., Huang, Y., Ma, K., Zhang, Y., & Biere, A. (2016). Effects of plant cover on properties of rhizosphere and inter-plant soil in a semiarid valley, SW China. *Soil Biology and Biochemistry*, 94, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.004>
36. Sala, O.E., Yahdjian, L., Havstad, K., & Aguiar, M.R. (2017). Rangeland ecosystem services: Nature's supply and humans' demand. *Rangeland systems: Processes, Management and Challenges*, 467-489. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-46709-2>
37. Schwendenmann, L., Veldkamp, E., Brenes, T., O'brien, J.J., & Mackensen, J. (2003). Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth Neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. *Biogeochemistry*, 64, 111-128. <https://doi.org/10.1023/A:1024941614919>
38. Seyghalani, S., Ramezanpour, H., & Kahneh, E. (2015). Effect of *Populus caspica*, *Alnus glutinosa* and *Taxodium distichum* on some soil chemical properties in Forestlands of Astaneh Ashrafieh. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(2), 233-241. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2015.102217>
39. Shahpiri, A. (2022). *Analysis of the variability of detritivores and decomposer organisms in relation to the stoichiometry of plant and soil quality characteristics*. Master's thesis on rangeland, Tarbiat Modares University, 180 pages. (In Persian with English abstract)
40. Sigurðsson, B.D., & Guðleifsson, B.E. (2013). Impact of afforestation on earthworm populations in Iceland.
41. Sircely, J., Conant, R.T., & Boone, R.B. (2019). Simulating rangeland ecosystems with G-Range: model description and evaluation at global and site scales. *Rangeland Ecology & Management*, 72(5), 846-857. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.03.002>
42. Soltani Toolarood, A.A., Einazi Nai, M., Shahab, H., Ghavidel, A., & Ghasemi, S. (2019). Determination of the most important microbial indicators as soil health index in Cadmium and Lead contaminated soils. *Journal of Environmental Science Studies*, 4(1), 1142-1150. (In Persian with English abstract)
43. Tan, K.H. (2005). *Soil Sampling, Preparation, and Analysis* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482274769>
44. Vorobeichik, E.L. (1997). On the methods for measuring forest litter thickness to diagnose the technogenic disturbances of ecosystems. *Russian Journal of Ecology*, 28(4), 230-234.
45. Wang, B., Liu, G.B., Xue, S., & Zhu, B. (2011). Changes in soil physico-chemical and microbiological properties during natural succession on abandoned farmland in the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 62, 915-925.

- <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0577-4>
46. Weidlich, E.W., Flórido, F.G., Sorrini, T.B., & Brancalion, P.H. (2020). Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology*, 57(9), 1806-1817. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13656>
47. Wen, L., Lei, P., Xiang, W., Yan, W., & Liu, S. (2014). Soil microbial biomass carbon and nitrogen in pure and mixed stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* differing in stand age. *Forest Ecology and Management*, 328, 150-158. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.037>
48. Woloszczyk, P., Fiencke, C., Elsner, D.C., Cordsen, E., & Pfeiffer, E.M. (2020). Spatial and temporal patterns in soil organic carbon, microbial biomass and activity under different land-use types in a long-term soil-monitoring network. *Pedobiologia*, 80, 150642. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150642>
49. Wulanningtyas, H.S., Gong, Y., Li, P., Sakagami, N., Nishiwaki, J., & Komatsuzaki, M. (2021). A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic matter in soybean cultivation. *Soil and Tillage Research*, 205, 104749. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104749>
50. Yang, K., Zhu, J., Zhang, M., Yan, Q., & Sun, O.J. (2010). Soil microbial biomass carbon and nitrogen in forest ecosystems of Northeast China: a comparison between natural secondary forest and larch plantation. *Journal of Plant Ecology*, 3(3), 175-182. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq022>
51. Yoder, R.E. (1936). Direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of the American Society of Agronomy*, 28(5).
52. Zhang, Y., Xu, X., Li, Z., Liu, M., Xu, C., Zhang, R., & Luo, W. (2019). Effects of vegetation restoration on soil quality in degraded karst landscapes of southwest China. *Science of the Total Environment*, 650, 2657-2665. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.372>

Research Article

Vol. 38, No. 2, May-June 2024, p. 239-252

Effects of Different Ratios of Urea:Nitrate in Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture

S. Naseri¹, Sh. Kiani^{2*}, H.R. Motaghian²

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

(* - Corresponding Author Email: shkiani2002@yahoo.com)

Received: 15-01-2024
Revised: 18-02-2024
Accepted: 06-03-2024
Available Online: 06-03-2024

How to cite this article:

Naseri, S., Kiani, Sh., & Motaghian, H.R. (2024). Effects of different ratios of urea:nitrate in nutrient solution on the growth and nitrate accumulation of red French lettuce in soilless culture. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 239-252. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86415.1372>

Introduction

Urea is one of the nitrogen chemical fertilizers for vegetable production in soil. But it is seldom used in soilless cultures. Leafy vegetables such as Lettuce (*Lactuca sativa* L.) contain high levels of nitrate and attempts have been made to reduce the nitrate concentration in this crop for human consumption. Using reduced forms of nitrogen, i.e. urea, is one of the applied strategies for reducing nitrate accumulation in lettuce. Little information is available concerning urea as a source of nitrogen for production of leafy vegetables such as lettuce in soilless culture. This experiment was conducted to investigate the effect of different ratios of urea:nitrate in nutrient solution on the growth indices, yield and nitrate accumulation of red French lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Lolla Rossa) in soilless culture.

Materials and Methods

A hydroponic experiment using completely randomized design was carried out with seven ratios of urea:nitrate in nutrient solution and four replications in the research greenhouse of Shahrekord University. Urea:nitrate ratios in nutrient solution were: 0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60, 50:50 and 60:40. Lettuce seedlings were grown in 2 L plastic pots (one plant per pot) containing mixture of cocopeat + perlite at the ratio of 2:1 (v/v) and were manually fertigated with nutrient solutions on a daily basis. Four weeks after transplanting, lettuce plants were harvested and fresh weights of shoot and root were determined. Plant growth indices including of plant height, plant diameter, leaf length, leaf width, leaf number, leaf greenness index and leaf brix level were measured. After measuring the growth indices, the leaves were grouped separately according to leaf numbers 1-10=outer leaves, >11= inner leaves. The samples were dried in an oven at 60 °C and were ground. Nitrate concentrations in samples were determined calorimetrically using a spectrophotometer at a wavelength of 410 nm. Analysis of variance was performed using SAS software version 9.4. Means comparison was conducted using least significant difference test at 0.05 probability level.

Results and Discussion

The results indicated that application of different ratios of urea to nitrate in nutrient solution had not significant effect on the lettuce growth indices including of plant diameter, leaf length, leaf width, leaf number, leaf greenness index and leaf brix level in comparison with 0:100 of urea:nitrate ratio. Also, root and shoot fresh weights were not affected by urea:nitrate ratio in nutrient solution. The greatest quantity of shoot fresh weight (141 g per plant) was obtained with a 50:50 urea:nitrate ratio. However, this was not significantly different from the shoot fresh weight (125



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86415.1372>

g per plant) observed when urea was not included in the nutrient solution. Shoot nitrogen concentration (except for plants nourished with a 50:50 urea:nitrate ratio) was not affected by increasing the urea:nitrate ratio in the nutrient solution. The results revealed that application of urea in nutrient solution effectively provided the nitrogen requirement of lettuce. This indicates that lettuce plants can efficiently hydrolyze urea and use it efficiently as a nitrogen source. Application of urea in the nutrient solution led to significant decrease in the nitrate concentration of lettuce root ($P < 0.05$). Moreover, increasing urea:nitrate ratio in nutrient solution resulted in significant decrease of the nitrate concentration of outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce ($P < 0.01$). The highest and lowest nitrate concentration in inner, outer and all leaves of lettuce were obtained in plants nourished with 0:100 and 50:50 urea:nitrate ratio in nutrient solution, respectively. Application of urea:nitrate ratio of 50:50 led to the meaningful decrease of nitrate concentration in root (43%), outer leaves (41%), inner leaves (44%) and all leaves (43%) of lettuce in comparison with 0:100 of urea:nitrate ratio. Urea had a repressive effect on nitrate influx and decreased its uptake by plants. Also, after urea uptake by plant root, it is first degraded by cytosolic ureases and then ammonium is incorporated via the GS-GOGAT (Glutamine Synthetase- Glutamine α -OxoGlutarate Amino Transferase) cycle. Therefore, application of urea in nutrient solution can lead to the reduction of nitrate accumulation in plants.

Conclusion

Based on the shoot fresh weight and nitrate concentration in lettuce leaves, replacing 50% of nitrate in nutrient solution with urea is recommended for red French lettuce production in hydroponic culture under the conditions of the present study. Compared to other nitrogen fertilizers, urea has a lower price and its application in nutrient solution is useful in reducing production costs.

Keywords: Hydroponic, Leafy vegetables, Methemoglobinemia, Nitrogen form

تأثیر نسبت‌های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی بر رشد و تجمع نیترات کاهوی فرانسوی قرمز در کشت بدون خاک

سحر ناصری^۱ - شهرام کیانی^{۲*} - حمیدرضا متقیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

چکیده

اوره یکی از کودهای شیمیایی نیتروژن برای تولید سبزی‌ها در خاک است که به ندرت در کشت‌های هیدروپونیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پژوهش به منظور بررسی اثر نسبت‌های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی و تجمع نیترات در کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا (*Lactuca sativa* L. cv. Lolla Rossa) انجام شد. این آزمایش به صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت نسبت اوره به نیترات محلول غذایی در چهار تکرار به صورت کشت بدون خاک در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد انجام شد. نسبت‌های اوره به نیترات محلول غذایی شامل صفر به ۱۰، ۱۰۰ به ۹۰، ۲۰ به ۸۰، ۳۰ به ۷۰، ۴۰ به ۶۰، ۵۰ به ۵۰ و ۶۰ به ۴۰ بودند. نتایج نشان داد کاربرد نسبت‌های مختلف اوره به نیترات در محلول غذایی تأثیر معنی‌داری بر شاخص‌های رشدی کاهو از قبیل قطر گیاه، طول برگ، عرض برگ، تعداد برگ، شاخص سبزی‌گی برگ و میزان بریکس برگ در مقایسه با نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات نداشت. همچنین وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو تحت تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی قرار نگرفت. بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو (۱۴۱ گرم بر گیاه) با کاربرد نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات حاصل شد که با عدم کاربرد اوره (۱۲۵ گرم بر گیاه) تفاوت معنی‌داری نداشت. نتایج نشان داد غلظت نیتروژن شاخساره (به استثنای گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات) تحت تأثیر افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی قرار نگرفت. با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، درونی و کل کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین و کمترین غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، درونی و کل کاهو به‌ترتیب در گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در محلول غذایی حاصل شد. نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد اوره در محلول غذایی منجر به تأمین نیتروژن کاهو شد. این نشان می‌دهد گیاهان کاهو به‌طور مؤثری اوره را هیدرولیز کرده و به‌صورت کارا از آن به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کرده‌اند. براساس وزن تازه شاخساره و غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، جایگزینی ۵۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک در شرایط این پژوهش توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سبزی‌های برگ‌ی، شکل نیتروژن، متهموگلوبینیمیا، هیدروپونیک

مقدمه

نیترات به صورت ترکیبی در محلول غذایی به کار برده شوند عملکرد گیاهان بهبود یافته و یا در برخی از موارد تفاوتی از نظر عملکرد بین گیاهان تغذیه شده با نیترات به تنهایی و کاربرد ترکیبی اوره و نیترات مشاهده نشده است. به‌عنوان مثال ژو و همکاران (Zhu et al., 1997) گزارش کردند جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره

به‌طور کلی برای تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاهان در کشت‌های بدون خاک عمدتاً از منبع نیترات استفاده می‌شود. اما در سال‌های اخیر استفاده از اوره برای تأمین بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه گسترش بیشتری یافته است. براساس پژوهش‌های انجام شده زمانی که اوره و

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

(Email: shkiani2002@yahoo.com)

(*)- نویسنده مسئول:

منجر به بهبود رشد پاک چوی^۱ شد. در همین زمینه باریوسف و همکاران (Bar-Yosef et al., 2009) گزارش کردند تغذیه گل‌های رز با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات برای عملکرد مفید بود زیرا منجر به کاهش غلظت آمونیوم در محلول و افزایش pH محلول غذایی شد. گونس و همکاران (Gunes et al., 1996) نشان دادند جایگزینی ۲۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره، اسید آمینه گلایسین و یا مخلوط اسیدهای آمینه اثری بر وزن تازه پیاز نداشته است. خان و همکاران (Khan et al., 1999) در کشت هیدروپونیک اسفناج نشان دادند که جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی با اوره تأثیر معنی‌داری بر حداکثر طول برگ و تعداد برگ گیاه در مقایسه با عدم کاربرد اوره (مصرف نیتروژن به صورت نیترات و آمونیوم) نداشت. آن‌ها پیشنهاد کردند اوره می‌تواند به عنوان منبع احتمالی نیتروژن در کشت‌های هیدروپونیک به کار برده شود. طباطبایی (Tabatabaei, 2009) گزارش کرد که وزن تازه برگ و درصد ماده خشک خیار تحت تأثیر نوع تغذیه نیتروژن با اوره و یا نیترات به تنهایی قرار نگرفت. خوشگفتارمنش و بهمن زیاری (Khoshgoftarmanesh & Bahmanziari, 2012) گزارش کردند در صورت تأمین نیکل کافی، می‌توان از اوره به عنوان منبع تأمین نیتروژن برای خیار (رقم نگین) در محیط‌های کشت بدون خاک استفاده کرد. سیلوا و همکاران (Silva et al., 2013) گزارش کردند کاربرد نیتروژن به صورت نیترات و یا اوره تأثیری بر درصد ماده خشک غده در سه رقم سیب‌زمینی در کشت هیدروپونیک نداشت. آن‌ها کاربرد ترکیبی نیتروژن از منبع اوره و نیترات را برای پرورش سیب‌زمینی در شرایط هیدروپونیک توصیه کردند. با این وجود در برخی از موارد نیز کاربرد اوره در محلول غذایی منجر به کاهش عملکرد گیاه شده است (Luo et al., 1993). به عنوان مثال ژو و همکاران (Zhu et al., 2018) عنوان کردند جایگزینی ۲۰ درصد از نیترات محلول غذایی با اوره و اسید آمینه گلایسین در کلم‌پیچ چینی منجر به کاهش قابل توجه زیست‌توده این گیاه شد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به صورت طرح کاملاً تصادفی با هفت تیمار شامل نسبت‌های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی در چهار تکرار در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه شهرکرد روی کاهوی فرانسوی قرمز رقم لولا رزا به صورت هیدروپونیک انجام شد. نسبت‌های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی شامل صفر به ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰ و ۸۰ بودند. به منظور اجرای آزمایش، بذره‌های کاهو پس از ضدعفونی توسط محلول هیپوکلریت سدیم ۱٪ در سینی کشت نشا حاوی کوکوپیت و پرلیت (با نسبت ۲ به ۱ حجمی/حجمی) کاشته شده و روزانه توسط آب مقطر آبیاری شدند. پس از ظهور دو برگ اولیه، کودآبیاری نشاها با یک چهارم غلظت محلول غذایی دمینگوس و همکاران (Domingues et al., 2012) انجام گرفت. به تدریج و با افزایش رشد نشاهای کاهو از محلول‌های غذایی

منجر به بهبود رشد پاک چوی^۱ شد. در همین زمینه باریوسف و همکاران (Bar-Yosef et al., 2009) گزارش کردند تغذیه گل‌های رز با محلول غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات برای عملکرد مفید بود زیرا منجر به کاهش غلظت آمونیوم در محلول و افزایش pH محلول غذایی شد. گونس و همکاران (Gunes et al., 1996) نشان دادند جایگزینی ۲۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره، اسید آمینه گلایسین و یا مخلوط اسیدهای آمینه اثری بر وزن تازه پیاز نداشته است. خان و همکاران (Khan et al., 1999) در کشت هیدروپونیک اسفناج نشان دادند که جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی با اوره تأثیر معنی‌داری بر حداکثر طول برگ و تعداد برگ گیاه در مقایسه با عدم کاربرد اوره (مصرف نیتروژن به صورت نیترات و آمونیوم) نداشت. آن‌ها پیشنهاد کردند اوره می‌تواند به عنوان منبع احتمالی نیتروژن در کشت‌های هیدروپونیک به کار برده شود. طباطبایی (Tabatabaei, 2009) گزارش کرد که وزن تازه برگ و درصد ماده خشک خیار تحت تأثیر نوع تغذیه نیتروژن با اوره و یا نیترات به تنهایی قرار نگرفت. خوشگفتارمنش و بهمن زیاری (Khoshgoftarmanesh & Bahmanziari, 2012) گزارش کردند در صورت تأمین نیکل کافی، می‌توان از اوره به عنوان منبع تأمین نیتروژن برای خیار (رقم نگین) در محیط‌های کشت بدون خاک استفاده کرد. سیلوا و همکاران (Silva et al., 2013) گزارش کردند کاربرد نیتروژن به صورت نیترات و یا اوره تأثیری بر درصد ماده خشک غده در سه رقم سیب‌زمینی در کشت هیدروپونیک نداشت. آن‌ها کاربرد ترکیبی نیتروژن از منبع اوره و نیترات را برای پرورش سیب‌زمینی در شرایط هیدروپونیک توصیه کردند. با این وجود در برخی از موارد نیز کاربرد اوره در محلول غذایی منجر به کاهش عملکرد گیاه شده است (Luo et al., 1993). به عنوان مثال ژو و همکاران (Zhu et al., 2018) عنوان کردند جایگزینی ۲۰ درصد از نیترات محلول غذایی با اوره و اسید آمینه گلایسین در کلم‌پیچ چینی منجر به کاهش قابل توجه زیست‌توده این گیاه شد.

بسیاری از سبزی‌های برگی از قبیل کاهو تجمع‌دهنده نیترات هستند. نیترات در بدن انسان به وسیله باکتری‌ها به نیتريت تبدیل و پس از جذب باعث ایجاد عارضه متهموگلوبینیمیا^۲ می‌شود که این امر می‌تواند در نوزادان باعث ایجاد سندروم نوزاد کبود شود. از طرف دیگر نیتريت با ترکیبات نیتروساتابل^۳ از قبیل آمیدها و آمین‌ها در معده انسان واکنش داده و منجر به تولید ترکیبات ان- نیتروزو می‌شود (Santamaria, 2006) که برخی از ترکیبات آن مثل نیتروزآمین سرطان‌زای قوی در گونه‌های حیوانی بوده و بنابراین می‌توانند منجر به سرطان در انسان شوند (Risch et al., 1985). نتایج تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که کاربرد اوره و نیترات به صورت ترکیبی در

3- Nitrosatable

1- Pak-choi (*Brassica chinensis* L.)

2- Methemoglobinemia

غلظت تیمارهای آزمایشی استفاده شد. محلول غذایی روزانه و به صورت دستی به گیاهان داده شد. نوع سامانه هیدروپونیک مورد استفاده از نوع باز بود و کسر آبشویی بسته به مرحله رشد گیاه بین ۵ تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شد تا از تجمع نمک‌ها در بستر جلوگیری شود. سپس مراقبت‌های زراعی معمول در حین دوره داشت در گلخانه تا زمان برداشت در ۲۲ دیماه ۱۴۰۰ صورت گرفت. در طول دوره آزمایش گیاهان مورد بازبینی روزانه قرار گرفتند تا در صورت وجود علائم ناشی از سمیت اوره به صورت کلروز و نکروز حاشیه برگ‌ها (Khoshgoftarmanesh et al., 2011) ثبت شوند.

پس از گذشت ۴ هفته، بوته‌ها (شامل شاخساره و ریشه) برداشت شده و وزن تازه نمونه‌ها توسط ترازوی رقمی اندازه‌گیری شد. پس از برداشت، یک بوته برای اندازه‌گیری خصوصیات ظاهری گیاه شامل ارتفاع گیاه، قطر گیاه، حداکثر طول و عرض برگ، تعداد برگ، شاخص سبزیگی برگ و غلظت نیترات اختصاص داده شد. برای اندازه‌گیری ارتفاع، خط‌کش از محل برش بوته تا کنار بلندترین برگ در هر بوته قرار داده شده و ارتفاع اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری قطر بوته نیز ابتدا محیط بوته در قسمت بالایی آن با استفاده از متر اندازه‌گیری شده و سپس قطر بوته محاسبه شد. حداکثر طول و عرض برگ نیز با استفاده از خط‌کش اندازه‌گیری شد. سبزیگی برگ با استفاده از دستگاه کلروفیل سنج Hansatech مدل CL-01 اندازه‌گیری شد. بدین منظور برای هر واحد آزمایشی ۱۰ قرائت از برگ‌های مختلف انجام شد و سپس میانگین آن‌ها به عنوان شاخص سبزیگی برگ آن واحد در نظر گرفته شد. نمونه‌های شاخساره کاهو به مدت ۷۲ ساعت در آون فن‌دار در دمای ۷۰ درجه سلسیوس خشک شده و پس از آسیاب کردن، غلظت نیتروژن آنها با استفاده از روش کلدال اندازه‌گیری شد (Karla, 1998). به منظور اندازه‌گیری غلظت نیترات یکی از گیاهان به دو بخش برگ‌های بیرونی (پیرتر، برگ‌های شماره ۱ تا ۱۰) و برگ‌های درونی (جوان‌تر، برگ‌های شماره ۱۱ به بعد) تقسیم شد (Marsic & Osvold, 2002). سپس غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی به روش سولفوسالسیلیک اسید و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۱۰ نانومتر اندازه‌گیری شد (Cataldo et al., 1975).

با غلظت یک دوم و سه چهارم غلظت محلول استاندارد استفاده شد. چهار هفته پس از کشت بذور کاهو در ۲۲ آذرماه ۱۴۰۰ و در مرحله پنج تا شش برگی، نشاهای کاهو به گلدان‌های پلاستیکی ۲ لیتری حاوی کوکوپیت و پرلیت (با نسبت ۲ به ۱ حجمی/حجمی) منتقل شدند. برای هر واحد آزمایشی دو گلدان در نظر گرفته شد و در داخل هر گلدان یک بوته کشت شد (مجموعاً ۵۶ گلدان). گلدان‌های حاوی گیاهان آزمایشی در یک گلخانه با دمای 23 ± 3 درجه سلسیوس و رطوبت نسبی 60 ± 10 درصد بر روی سکو چیده شدند. برای تهیه محلول غذایی از آب شرب دانشگاه شهرکرد استفاده شد. بدین منظور ابتدا pH، قابلیت هدایت الکتریکی و غلظت سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، نیترات و کلر آن با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شد (Ali Ehyayi & Behbehani-zadeh, 1993). برای تهیه محلول غذایی از فرمولاسیون پیشنهادی دمنگوس و همکاران (Domingues et al., 2012) با کمی تغییرات استفاده شد. در این فرمولاسیون غلظت نیتروژن - نیترات، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم و گوگرد در محلول غذایی به ترتیب برابر با ۱۰/۵، ۰/۷، ۶/۲، ۳/۵، ۱/۴ و ۱/۴ میلی‌مولار و غلظت عناصر غذایی کم‌مصرف برای آهن، منگنز، روی، مس، مولیبدن و بور به ترتیب برابر ۶۲/۵، ۶/۳۶، ۰/۵۴، ۰/۲۲، ۰/۰۷ و ۳۲/۴ میکرومولار بود. از آنجایی که تأمین نیکل برای گیاهان تغذیه شده با اوره ضروری است بنابراین نیکل با غلظت ۰/۰۴ میکرومولار از منبع سولفات نیکل در تمام محلول‌های غذایی مورد استفاده قرار گرفت (Khoshgoftarmanesh et al., 2011). نیکل به عنوان کوفاکتور آنزیم اوره‌آز در هیدرولیز اوره و تبدیل آن به آمونیوم و دی اکسید کربن در گیاهان تغذیه شده با اوره نقش دارد (Marschner, 1995). با لحاظ کردن غلظت عناصر غذایی موجود در آب (جدول ۱)، محاسبات لازم برای حصول به غلظت‌های مورد نظر در محلول‌های غذایی مورد استفاده انجام شد. قابلیت هدایت الکتریکی محلول‌های غذایی تهیه شده بین ۱/۲ تا ۱/۴ دسی‌زیمنس بر متر بود. همچنین pH محلول‌های غذایی با استفاده از محلول یک مولار اسید سولفوریک حدود ۵/۴ تنظیم شد. پس از انتقال نشاهای کاهو به گلدان‌ها از محلول غذایی تمام

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی آب مورد استفاده برای تهیه محلول غذایی

Table 1- Some chemical properties of used water for preparation of nutrient solution

کلر	بی کربنات	نیتروژن نیترات	منیزیم	کلسیم	پتاسیم	سدیم	پ.هاش	قابلیت هدایت الکتریکی
Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	N-NO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH	EC
			(mmol L ⁻¹)					(dS m ⁻¹)
1.0	1.5	0.31	0.5	1.0	0.013	0.043	7.6	0.25

غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو با استفاده از میانگین وزنی غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و درونی محاسبه شد. برای اندازه‌گیری میزان بریکس برگ (میزان مواد جامد محلول) در یکی دیگر از گیاهان برداشت شده، تعداد ۳ برگ بیرونی (پیرتر) و ۳ برگ درونی (جوان‌تر) در هاونگ خرد شدند. سپس عصاره مخلوط خرد شده تهیه و میزان بریکس آن با دستگاه رفاکتومتر مدل Atago اندازه‌گیری شد. نتایج حاصله توسط نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹ تجزیه شده و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص‌های رشدی کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر ارتفاع کاهو در سطح پنج درصد آماری معنی‌دار شد. در حالی که اثر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر دیگر شاخص‌های رشدی از قبیل قطر بوته، طول و عرض برگ و تعداد کل برگ کاهو معنی‌دار نشد (جدول ۲). ارتفاع ساقه در کاهو که آن را می‌توان یکی از شاخص‌های قدرت گیاه در نظر گرفت بستگی به تغذیه، شرایط محیطی (دمای محیط و طول روز) و عادت رشد گیاه دارد (Alberici et al., 2008). نتایج این پژوهش نشان داد کاربرد اوره در محلول غذایی تا ۱۰ درصد کل نیتروژن مصرفی منجر به افزایش معنی‌دار ارتفاع کاهو در مقایسه با عدم کاربرد اوره در محلول غذایی (نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات) به میزان ۱۸ درصد شد. اما افزایش بیشتر درصد اوره در محلول غذایی تا ۳۰ درصد کل نیتروژن منجر به کاهش معنی‌دار ارتفاع کاهو در مقایسه با نسبت ۱۰ به ۹۰ اوره به نیترات شد. بیشترین ارتفاع کاهو (۱۲/۴ سانتی‌متر) در گیاهان تغذیه شده با نسبت ۱۰ به ۹۰ اوره به نیترات و کمترین آن (۹/۵ سانتی‌متر) در گیاهان تغذیه شده با نسبت

۲۰ به ۸۰ اوره به نیترات در محلول غذایی مشاهده شد (جدول ۳). نتایج نشان داد قطر بوته تحت تأثیر افزایش نسبت اوره به نیترات در محلول غذایی قرار نگرفت. بیشترین قطر بوته (۲۵/۲ سانتی‌متر) و کمترین قطر بوته (۲۳/۳ سانتی‌متر) به ترتیب در گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت‌های اوره به نیترات ۳۰ به ۷۰ و ۴۰ به ۶۰ مشاهده شد که البته تفاوت معنی‌داری با قطر گیاه در گیاهان تغذیه شده با نسبت اوره به نیترات صفر به ۱۰۰ نداشت (جدول ۳). نتایج نشان داد طول و عرض برگ کاهو تحت تأثیر افزایش نسبت اوره به نیترات در محلول غذایی قرار نگرفتند. بیشترین طول و عرض برگ به ترتیب در گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های ۵۰ به ۵۰ و ۴۰ به ۶۰ اوره به نیترات محلول غذایی مشاهده شد که تفاوت معنی‌داری با طول و عرض برگ در گیاهان تغذیه شده با نسبت اوره به نیترات صفر به ۱۰۰ نداشت (جدول ۳). تعداد برگ‌های تشکیل یافته در واحد زمان تحت تأثیر عوامل محیطی نظیر نور، دما، دسترسی به آب و عناصر غذایی است (Samarakoon et al., 2006). بر مبنای نتایج حاصله بیشترین تعداد برگ (۲۵ عدد) و کمترین تعداد برگ (۲۱ عدد) به ترتیب در گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت‌های اوره به نیترات ۴۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۴۰ مشاهده شد که البته تفاوت معنی‌داری با تعداد برگ در گیاهان تغذیه شده با نسبت اوره به نیترات صفر به ۱۰۰ نداشت (جدول ۳).

بر مبنای نتایج این پژوهش جایگزینی بخشی از نیترات محلول غذایی با اوره تأثیری بر هیچ کدام از شاخص‌های رشدی کاهو به غیر از ارتفاع آن نداشت. این مسئله نشان‌دهنده آن است که گیاهان کاهو تغذیه شده با اوره توانسته‌اند به‌طور مؤثری اوره را هیدرولیز کرده و به‌صورت کارا از آن به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند. ارتقای رشد گیاهان کاهوی تغذیه شده با اوره و نیکل با بهبود آسیمیلاسیون اوره مرتبط است. گیاهان تأمین شده با نیکل می‌توانند به‌طور مؤثر اوره را هیدرولیز کرده و به‌طور مؤثر از آن به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند (Khoshgoftarmanesh et al., 2011).

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر ارتفاع و قطر گیاه، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو
Table 2- Variance analysis (mean square) for the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

منابع تغییر	درجه آزادی	ارتفاع گیاه	قطر گیاه	طول برگ	عرض برگ	تعداد برگ
S.O.V.	df	Plant height	Plant diameter	Leaf length	Leaf width	Leaf number
نسبت اوره به نیترات	6	3.15*	1.91 ^{ns}	31.98 ^{ns}	1.79 ^{ns}	7.20 ^{ns}
Urea:nitrate ratio						
خطا	21	0.83	1.24	26.50	1.39	4.35
Error						
ضریب تغییرات		8.4	4.54	31.3	8.2	9.2
Coefficient of variation (%)						

^{ns} غیر معنی‌دار، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد
^{ns} Non significant, * significant at 5%

جدول ۳- مقایسه میانگین تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر ارتفاع و قطر بوته، طول و عرض برگ و تعداد برگ کاهو
Table 3- Mean comparisons of the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on height and diameter of the plant, length and width of the leaf and leaf number of lettuce

نسبت اوره به نیترات Urea:nitrate ratio	ارتفاع گیاه Plant height	قطر گیاه Plant diameter	طول برگ Leaf length	عرض برگ Leaf width	تعداد برگ Leaf number
(cm)					
0:100	10.5 ^{bc}	24.6 ^a	15.5 ^a	14.3 ^a	23.0 ^a
10:90	12.4 ^a	24.4 ^a	15.0 ^a	13.6 ^a	22.0 ^a
20:80	9.5 ^c	24.9 ^a	15.5 ^a	14.0 ^a	21.8 ^a
30:70	10.9 ^b	25.2 ^a	15.6 ^a	14.3 ^a	23.0 ^a
40:60	11.2 ^{ab}	23.3 ^a	15.4 ^a	15.3 ^a	25.0 ^a
50:50	11.2 ^{ab}	25.3 ^a	15.9 ^a	15.1 ^a	23.8 ^a
60:40	10.4 ^{bc}	24.3 ^a	15.3 ^a	13.6 ^a	21.0 ^a

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

بودند مشاهده نشد. طباطبایی (Tabatabaei, 2009) گزارش کرد که هیچ گونه علائم ناشی از سمیت اوره در خیار موقعی که منبع نیتروژن اوره بود مشاهده نشد. خوشگفتارمنش و همکاران (Khoshgoftarmanesh *et al.*, 2011) نشان دادند گیاهان کاهو به خوبی در محلول غذایی حاوی ۲۸۰ میلی‌گرم بر لیتر نیتروژن از منبع اوره به همراه نیکل رشد کردند بدون این که علائم سمیت اوره را نشان دهند. بنابراین به نظر می‌رسد سمیت اوره در گیاهان در کشت‌های هیدروپونیک در عدم حضور نیکل (Tan *et al.*, 2000) و استفاده از مقادیر زیاد اوره (Luo *et al.*, 1993) بروز کرده است. در بررسی منابع انجام شده اعداد مختلفی برای غلظت نیتروژن از منبع اوره در محلول غذایی برای بروز عوارض ناشی از سمیت آن در گیاهان کشت شده در شرایط هیدروپونیک ارائه شده است. به عنوان مثال ایکدا و تان (Ikeda & Tan, 1998) گزارش کردند گیاهان گوجه فرنگی تغذیه شده با اوره در غلظت‌های زیاد نیتروژن (۳۳۶ و ۵۰۴ میلی‌گرم بر لیتر) علائم سمیت اوره را نشان دادند. آن‌ها آستانه سمیت غلظت نیتروژن به شکل اوره را در گوجه فرنگی ۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر گزارش کردند. ساواس و همکاران (Savvas *et al.*, 2013) گزارش کردند محدوده تحمل گیاه به غلظت اوره در محلول غذایی نسبت به نیترات باریک‌تر بوده و بسته به نوع گونه گیاهی بین ۱۹۶ تا ۲۵۲ میلی‌گرم بر لیتر است. بنابراین از آنجایی که در این پژوهش حداکثر غلظت نیتروژن به شکل اوره در محلول غذایی (۸۸ میلی‌گرم بر لیتر) در مقایسه با کمترین آستانه سمیت ذکر برای اوره (۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر) در تحقیق ایکدا و تان (Ikeda & Tan, 1998) کمتر بود بنابراین علائم سمیت اوره در گیاهان کاهو مشاهده نشد.

تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی و میزان بریکس برگ کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی و میزان بریکس برگ کاهو معنی‌دار نبود

نتایج پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که جایگزینی بخشی از نیتروژن محلول غذایی از منبع نیترات و یا نیترات به همراه آمونیوم با اوره تأثیری بر برخی شاخص‌های رشدی گیاهان در کشت‌های هیدروپونیک نداشته است. براساس نتایج پژوهش یوتوتیرات و رامرونگسری (Uathitirat & Ruamrungsri, 2013) در کشت هیدروپونیک کاهو در سیستم لایه نازک محلول غذایی تفاوت معنی‌داری از نظر ارتفاع گیاه در گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی اوره در فاصله زمانی ۴۵ روز پس از کاشت در مقایسه با همان محلول غذایی اما فاقد اوره وجود نداشت. با این وجود گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد اوره ارتفاع و عرض بیشتری در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی اوره داشتند. همچنین نتایج تحقیقات خان و همکاران (Khan *et al.*, 1999) در کشت هیدروپونیک اسفناج نشان داد که جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی با اوره تأثیر معنی‌داری بر حداکثر طول برگ و تعداد برگ گیاه در مقایسه با عدم کاربرد اوره (مصرف نیتروژن به صورت نیترات و آمونیوم) نداشت که این امر در مطابقت با نتایج پژوهش حاضر است.

نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی هیچ گونه علائم ناشی از سمیت اوره به صورت کلروز و نکروز نوک و حاشیه برگ‌ها در گیاهان مورد آزمایش دیده نشد. در این پژوهش غلظت نیتروژن از منبع اوره حداکثر به ۸۸ میلی‌گرم بر لیتر در نسبت ۶۰ به ۴۰ اوره به نیترات رسید. اما این غلظت اوره منجر به بروز سمیت اوره در گیاهان کاهو نشد. به طور مشابه خان و همکاران (Khan *et al.*, 1999) گزارش کردند حتی گیاهان اسفناج تغذیه شده با اوره به میزان ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی (۱۱۲ میلی‌گرم بر لیتر نیتروژن) علائم سمیت اوره را نشان ندادند. تان و همکاران (Tan *et al.*, 2000) گزارش کردند هیچ گونه سمیت اوره در گیاهان گوجه فرنگی که ۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر نیتروژن به شکل اوره به همراه نیکل (با غلظت ۰/۱ یا یک میلی‌گرم بر لیتر) در محلول غذایی دریافت کرده

قندها تشکیل می‌دهند بنابراین این شاخص به‌عنوان معیاری برای تعیین میزان قندهای محلول در میوه‌ها و سبزی‌ها است. به‌طوری‌که افزایش این شاخص در بهبود کیفی کاهو مؤثر است. نتایج نشان داد میزان بریکس برگ کاهو تحت تأثیر افزایش نسبت اوره به نیترات در محلول غذایی قرار نگرفت. بیشترین و کمترین میزان بریکس برگ به‌ترتیب در گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های ۲۰ به ۸۰ و صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات محلول غذایی مشاهده شد (جدول ۵). تحقیقات اندکی در مورد تأثیر کاربرد اوره در محلول غذایی بر میزان بریکس انجام شده است. نتایج تحقیقات ژو و همکاران (Zhu et al., 2018) نشان داد جایگزینی ۲۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره منجر به افزایش معنی‌دار میزان قند محلول برگ و ساقه در مقایسه با تیمار نیترات به تنهایی شد. به‌طور عکس باریوسف و همکاران (Bar-Yosef et al., 2009) گزارش کردند جایگزینی آمونیوم محلول غذایی با اوره به‌طور قابل توجهی غلظت گلوکز و فروکتوز در برگ‌ها را کاهش داد که دلیل آن احتمالاً کاهش غلظت فسفر در برگ بود. به‌هرحال با توجه به عدم تأثیر معنی‌دار نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر میزان بریکس برگ کاهو نتایج این پژوهش با نتایج تحقیقات انجام شده در این زمینه مطابقت نداشت.

تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو معنی‌دار نشد (جدول ۴). بیشترین وزن تازه ریشه (۱۲/۳۵ گرم بر گیاه) و کمترین مقدار آن (۹/۹۲ گرم بر گیاه) به‌ترتیب در گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت‌های ۴۰ به ۶۰ و ۶۰ به ۴۰ اوره به نیترات در محلول غذایی مشاهده شد که البته تفاوت معنی‌داری با وزن تازه ریشه گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی فاقد اوره نداشت.

(جدول ۴). کاربرد نسبت ۴۰ به ۶۰ اوره به نیترات در محلول غذایی منجر به بیشترین شاخص سبزیگی در برگ‌های کاهو (۴/۰۰) شد اگرچه تفاوت معنی‌داری با مقادیر این شاخص در برگ‌های گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات نداشت (جدول ۵). شاخص سبزیگی برگ که نشان‌دهنده شدت رنگ سبز است یکی از شاخص‌های کیفی در کاهو می‌باشد. اندازه‌گیری شاخص سبزیگی برگ روشی غیرمخرب برای برآورد میزان کلروفیل برگ است. میزان کلروفیل از معیارهای مشخصی است که به‌عنوان شاخص فعالیت فتوسنتزی در کشاورزی به‌کار می‌رود. از آنجایی‌که نیتروژن جزو سازنده کلروفیل است بنابراین فراهمی و تأمین آن بر میزان کلروفیل گیاه اثر دارد (Marschner, 1995). از طرف دیگر کاربرد اوره در محلول غذایی با تأثیر بر غلظت سایر عناصر غذایی گیاه بر میزان کلروفیل مؤثر است (Tan et al., 2000). در این پژوهش، عدم تأثیر اوره بر شاخص سبزیگی برگ کاهو نشان‌دهنده آن است که گیاهان کاهو از اوره موجود در محلول غذایی به‌صورت مؤثری به‌عنوان منبع نیتروژن استفاده کرده و آن را در ساخت کلروفیل مورد استفاده قرار داده‌اند. در همین زمینه تان و همکاران (Tan et al., 2000) گزارش کردند بین شاخص سبزیگی برگ در گیاهان گوجه‌فرنگی تغذیه شده با اوره در حضور نیکل و گیاهان تغذیه شده با نیترات تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. آن‌ها بیان کردند این امر نشان‌دهنده آن است که اوره در شرایط مناسب می‌تواند به خوبی نیتروژن مورد نیاز گیاه را تأمین کند. چون نیتروژن یکی از مهمترین ترکیبات تشکیل دهنده کلروفیل در گیاهان است. از آنجایی که کاهو برای تهیه سالاد استفاده می‌شود شاخص سبزیگی برگ آن دارای اهمیت زیادی است. زیرا رنگ تیره‌تر کاهو توسط مصرف‌کنندگان ترجیح داده می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی، شاخص سبزیگی برگ تحت تأثیر قرار نگرفت که این مسئله از لحاظ بازاریابی کاهو بسیار مهم است.

میزان بریکس معیاری برای اندازه‌گیری مواد جامد محلول میوه‌ها و سبزی‌ها است. از آنجایی‌که اکثر ماده محلول موجود در آب میوه را

جدول ۴- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص سبزیگی برگ، میزان بریکس برگ، وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

Table 4- Variance analysis (mean square) for the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on leaf greenness index, leaf brix level, root and shoot fresh weights of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	شاخص سبزیگی برگ Leaf greenness index	میزان بریکس برگ Leaf brix level	وزن تازه ریشه Root fresh weigh	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weigh
نسبت اوره به نیترات Urea:nitrate ratio	6	0.19 ^{ns}	0.08 ^{ns}	2.86 ^{ns}	192.9 ^{ns}
خطا Error	21	0.14	0.16	4.42	108.0
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)		10.5	12.4	18.7	7.8

^{ns} غیر معنی‌دار

^{ns} Non significant

جدول ۵- مقایسه میانگین تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر شاخص سبزی‌نگی برگ، میزان بریکس برگ، وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو

Table 5- Mean comparisons of the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on leaf greenness index, leaf brix level, root and shoot fresh weights of lettuce

نسبت اوره به نیترات Urea:nitrate ratio	شاخص سبزی‌نگی برگ Leaf greenness index	میزان بریکس برگ Leaf brix level	وزن تازه ریشه Root fresh weigh (g plant ⁻¹)	وزن تازه شاخساره Shoot fresh weigh
0:100	3.49 ^a	2.90 ^a	11.37 ^a	125.0 ^a
10:90	3.42 ^a	3.25 ^a	12.03 ^a	139.7 ^a
20:80	3.40 ^a	3.35 ^a	11.55 ^a	124.1 ^a
30:70	3.72 ^a	3.17 ^a	10.75 ^a	136.1 ^a
40:60	4.00 ^a	3.30 ^a	12.35 ^a	135.4 ^a
50:50	3.72 ^a	3.20 ^a	10.65 ^a	141.3 ^a
60:40	3.73 ^a	3.27 ^a	9.92 ^a	128.8 ^a

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر غلظت نیتروژن شاخساره و غلظت نیترات ریشه و شاخساره کاهو

نتایج تجزیه واریانس نشان داد اثر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر غلظت نیترات ریشه کاهو در سطح پنج درصد آماری و بر غلظت نیتروژن شاخساره و غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی، درونی و همچنین کل برگ‌های کاهو در سطح یک درصد آماری معنی‌دار شد (جدول ۶). نتایج نشان داد تفاوت معنی‌داری بین غلظت نیتروژن شاخساره در گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت‌های مختلف اوره به نیترات محلول غذایی به استثنای گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در مقایسه با عدم کاربرد اوره در محلول غذایی (نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات) مشاهده نشد. بیشترین غلظت نیتروژن شاخساره (۴۴/۶ گرم بر کیلوگرم) و کمترین آن (۳۴/۹ گرم بر کیلوگرم) به ترتیب در گیاهان تغذیه شده با نسبت‌های ۲۰ به ۸۰ و ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات مشاهده شد (جدول ۷). بر مبنای نتایج حاصله، جایگزینی بخشی از نیترات محلول غذایی با اوره تأثیری بر وضعیت تغذیه نیتروژن کاهو (به استثنای گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات) نداشته است. این مسئله نشان‌دهنده آن است که اوره کاربردی در محلول غذایی توسط ریشه گیاه جذب شده و پس از آسیمیلاسیون مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که اوره مصرفی در محلول غذایی در کشت‌های هیدروپونیک توسط ریشه گیاه جذب شده و به صورت مولکول کامل در برخی محصولات از قبیل غلات (Merigout et al., 2008a) و گوجه‌فرنگی (Tan et al., 2000) در گیاه انتقال مجدد می‌یابد. در همین زمینه مریگوت و همکاران (Merigout et al., 2008b) در تحقیق خود در مورد جذب و آسیمیلاسیون اوره در گیاه آرابیدوپسیس در شرایط هیدروپونیک نشان دادند که اوره قبل از هیدرولیز در محلول غذایی،

همچنین بیشترین وزن تازه شاخساره (۱۴۱/۳ گرم بر گیاه) و کمترین آن (۱۲۴/۱ گرم بر گیاه) به ترتیب در گیاهان کاهوی تغذیه شده با محلول‌های غذایی دارای نسبت ۵۰ به ۵۰ و ۲۰ به ۸۰ اوره به نیترات محلول غذایی مشاهده شد (جدول ۵). بر مبنای نتایج این پژوهش جایگزینی تدریجی نیترات محلول غذایی با اوره تأثیری بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو نداشت. این مسئله نشان‌دهنده آن است که گیاهان کاهو تغذیه شده با اوره و نیترات توانسته‌اند به طور مؤثری اوره را هیدرولیز کرده و به صورت کارا از آن به عنوان منبع نیتروژن استفاده کنند. در همین زمینه ایکدا و تان (Ikeda & Tan, 1998) عنوان کردند موقعی که گیاهان گوجه‌فرنگی با محلول غذایی دارای ۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر نیتروژن تغذیه شدند وزن خشک گیاهانی که اوره و نیترات با نسبت ۵۰ به ۵۰ دریافت کرده بودند تقریباً مساوی گیاهانی بود که نیترات به تنهایی و یا نیترات + آمونیوم دریافت کرده بودند. همچنین بین وزن خشک برگ، ساقه، ریشه و کل گیاهانی که مقدار مساوی نیتروژن (۱۶۸ میلی‌گرم بر لیتر) از منبع نیترات به تنهایی و یا نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در محلول غذایی دریافت کرده بودند تفاوت معنی‌داری دیده نشد. آن‌ها عنوان کردند کاربرد ترکیبی اوره و نیترات برای رشد کافی گوجه‌فرنگی بدون کاهش در جذب کاتیون‌ها مفید است. از طرف دیگر اوره به دلیل ماهیت غیریونی به پایداری pH محلول غذایی نیز کمک می‌کند. به طور مشابه گونس و همکاران (Gunes et al., 1996) نشان دادند جایگزینی ۲۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره، اسید آمینه گلایسین و یا مخلوط اسیدهای آمینه اثری بر وزن تازه پیاز نداشته است. همچنین نتایج پژوهش یوتوتیرات و رامرونگسری (Uathitirat & Ruamrungsri, 2013) در کشت هیدروپونیک کاهو در سیستم لایه نازک محلول غذایی نشان داد تفاوت معنی‌داری در وزن خشک گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی اوره در فاصله زمانی ۴۵ روز پس از کاشت در مقایسه با همان محلول غذایی اما فاقد اوره وجود نداشت که این نتایج در مطابقت با نتایج پژوهش حاضر است.

مستقیماً توسط سلول‌های ریشه آرابیدوپسیس جذب شد. نتایج آزمایش‌های حاصله با استفاده از اوره دارای نیتروژن نشان‌دار (^{15}N) ثابت کرد اوره قادر است از غشای سیتوپلاسمایی سلول‌های ریشه به‌صورت مولکول کامل عبور کرده و این امر به وضعیت نیتروژن اولیه گیاه ارتباطی ندارد. بخشی از اوره در بافت ریشه، توسط اوره‌آز سیتوپلاسمی تجزیه شده و آمونیوم حاصل از آن از طریق چرخه GS-GOGAT¹ آسمیله شده است. آن‌ها همچنین عنوان کردند بخش قابل توجهی (۲۰ درصد) از اوره جذب شده توسط ریشه‌ها قبل از هیدرولیز توسط آنزیم اوره‌آز سیتوپلاسمی سلول‌های ریشه به قسمت‌های هوایی گیاه انتقال داده می‌شود. در مطابقت با نتایج این پژوهش حاضر خان و همکاران (Khan et al., 1999) در بررسی وضعیت نیتروژن شاخساره گیاه اسفناج تحت شرایط کشت هیدروپونیک نشان دادند با جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی با اوره تفاوت معنی‌داری بین غلظت نیتروژن شاخساره این گیاهان در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی حاوی نیتрат و آمونیوم (عدم کاربرد اوره) وجود نداشت. لازم به ذکر است کاهش معنی‌دار غلظت نیتروژن شاخساره کاهو در گیاهان کاهوی تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در مقایسه با سایر نسبت‌ها (جدول ۷) احتمالاً می‌تواند به دلیل اثر رقت باشد. چرا که گیاهان تغذیه شده با این نسبت بیشترین وزن تازه شاخساره کاهو را به خود اختصاص دادند (جدول ۵). نتایج نشان داد با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی غلظت نیترات ریشه به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. بیشترین غلظت نیترات ریشه (۲۱۴۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) و کمترین آن (۱۲۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) به‌ترتیب با کاربرد نسبت‌های صفر به ۱۰۰ و ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات محلول غذایی حاصل شد (جدول ۷). همچنین تغذیه گیاهان کاهو با نسبت‌های ۴۰ به ۶۰ و ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات منجر به کاهش غلظت نیترات ریشه کاهو در مقایسه با نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات به‌ترتیب به میزان ۳۱ و ۴۳ درصد شد. بر مبنای نتایج حاصله با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی (۱۸۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در محلول غذایی و بیشترین آن (۳۱۵۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات مشاهده شد. با کاربرد ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد کل نیتروژن به شکل اوره، غلظت نیترات برگ‌های بیرونی در مقایسه با عدم کاربرد اوره به‌ترتیب ۲۹، ۱۷، ۲۶، ۲۰، ۴۱ و ۴۰ درصد کاهش یافت (جدول ۷). به‌طور مشابه با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی غلظت نیترات در

برگ‌های درونی کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کمترین غلظت نیترات در برگ‌های درونی (۱۱۶۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در محلول غذایی و بیشترین آن (۲۰۸۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات مشاهده شد. با کاربرد ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد کل نیتروژن به شکل اوره، غلظت نیترات برگ‌های درونی در مقایسه با عدم کاربرد اوره به‌ترتیب ۱۴، ۴۰، ۳۳، ۳۵، ۴۴ و ۳۶ درصد کاهش یافت (جدول ۷). نتایج تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر غلظت نیترات کل برگ‌های کاهو نیز نشان داد با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. کمترین غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو (۱۶۲۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات در محلول غذایی و بیشترین آن (۲۸۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن تازه) با کاربرد نسبت صفر به ۱۰۰ اوره به نیترات مشاهده شد. با کاربرد ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ درصد کل نیتروژن به شکل اوره، غلظت نیترات کل برگ‌های کاهو در مقایسه با عدم کاربرد اوره به‌ترتیب ۲۸، ۱۹، ۳۰، ۲۵، ۴۳ و ۳۶ درصد کاهش یافت (جدول ۷).

کاهش غلظت نیترات در بخش‌های مختلف کاهو در نتیجه کاربرد اوره در محلول غذایی دلایل مختلفی دارد. از یک طرف اوره اثر بازدارنده بر جریان جذب نیترات داشته (Merigout et al., 2008b) و جذب آن توسط گیاه را کاهش می‌دهد. بنابراین کوددهی با اوره در ترکیب با کودهای حاوی نیترات و آمونیوم راهی برای کاهش غلظت نیترات در گیاهان است. در گیاهان یک سیستم انتقال تخصصی برای تعیین میزان جذب نیترات از محیط توسعه‌یافته است. ژن‌های دخیل در سیستم انتقال نیترات متعلق به ناقلین نیترات/پپتید (NPFs)، ناقل نیترات (NRT2) و ژن‌های مرتبط با آسیمیلایون نیترات (NAR2) هستند (Tsai et al., 2007). خانواده NRT2 بخشی از یک ابرخانواده تسهیل‌کننده اصلی جذب نیترات هستند (Gu et al., 2016). سیستم انتقال نیترات القاپذیر است و تحت تأثیر غلظت نیترات و سایر شکل‌های نیتروژن است (Tsai et al., 2007; Zanin et al., 2015). پیشنهاد شده است که دلیل ممانعت اوره از القای جذب نیترات، به‌واسطه فراوانی کمتر ناقلین ZmNRT2.1 و ZmNAR2.2 است (Zanin et al., 2015). نتایج پژوهش‌های قبلی نشان داد که افزودن اوره یا گلیسین به محلول غذایی حاوی نیترات به‌طور قابل توجهی نیترات را کاهش داد و منجر به کاهش ظرفیت جذب نیترات توسط کلم‌پیچ چینی شد (Song et al., 2016).

1- Glutamine Synthetase- Glutamine α -Oxoglutarate Amino Transferase

جدول ۶- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر غلظت نیتروژن شاخساره و غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 6- Variance analysis (mean square) for the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on shoot nitrogen concentration and nitrate concentration in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

منابع تغییر S.O.V.	درجه آزادی df	نیتروژن شاخساره Shoot nitrogen	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Total Nitrate of leaves
نسبت اوره به نیترات Urea:nitrate ratio	6	45.58**	420819*	751247**	439623**	625165**
خطا Error	21	9.78	140435	79064	74194	54024
ضریب تغییرات Coefficient of variation (%)		7.5	21.0	11.8	18.3	11.0

* معنی‌دار در سطح ۵ درصد، ** معنی‌دار در سطح ۱ درصد

* significant at 5%, ** significant at 1%

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر نسبت اوره به نیترات محلول غذایی بر غلظت نیتروژن شاخساره و غلظت نیترات در ریشه، برگ‌های بیرونی، برگ‌های درونی و کل برگ‌های کاهو

Table 7- Mean comparisons of the effect of urea:nitrate ratio in nutrient solution on shoot nitrogen concentration and nitrate concentration in root, outer leaves, inner leaves and all leaves of lettuce

نسبت اوره به نیترات Urea:nitrate ratio	نیتروژن شاخساره Shoot nitrogen	نیترات ریشه Root nitrate	نیترات برگ‌های بیرونی Outer leaves nitrate	نیترات برگ‌های درونی Inner leaves nitrate	نیترات کل برگ‌ها Nitrate of all leaves
0:100	44.1 ^a	2141 ^a	3156 ^a	2085 ^a	2852 ^a
10:90	41.0 ^a	1863 ^{ab}	2253 ^{bcd}	1798 ^a	2055 ^{bc}
20:80	44.6 ^a	2069 ^a	2629 ^b	1257 ^b	2314 ^b
30:70	40.6 ^a	1883 ^{ab}	2340 ^{bc}	1390 ^b	1993 ^{bc}
40:60	43.5 ^a	1480 ^{bc}	2526 ^b	1364 ^b	2130 ^{bc}
50:50	34.9 ^b	1225 ^c	1861 ^d	1161 ^b	1621 ^d
60:40	43.2 ^a	1822 ^{ab}	1986 ^{cd}	1343 ^b	1812 ^{cd}

میانگین‌ها در هر ستون با حروف مشابه بدون اختلاف معنی‌دار با استفاده از آزمون LSD در سطح ۵ درصد هستند.

Data in each column with the same letter are not statistically different at 0.05 probability level based on LSD Test.

محلول غذایی قرار نگرفته است. بنابراین به نظر نمی‌رسد مشکلی از لحاظ تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاهان کاهو با افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی وجود داشته باشد. نتایج تحقیقات انجام شده حاکی از آن است که جایگزینی اوره به جای نیترات می‌تواند از تجمع نیترات در سبزی‌های میوه‌ای نظیر گوجه فرنگی (Tan et al., 2000) و سبزی‌های برگ‌ی نظیر کاهو (Luo et al., 1993) جلوگیری کند. خان و همکاران (Khan et al., 1999) در کشت هیدروپونیک اسفناج گزارش کردند بیشترین غلظت نیترات شاخساره در تیمار عدم کاربرد اوره (مصرف نیتروژن به صورت نیترات و آمونیوم) و کمترین آن با کاربرد ۵۰ درصد کل نیتروژن محلول غذایی به صورت اوره دیده شد. نتایج نشان داد با افزایش درصد اوره در محلول غذایی غلظت نیترات شاخساره اسفناج کاهش یافت. تان و همکاران (Tan et al., 2000) گزارش کردند با کاربرد اوره در محلول غذایی با و بدون کاربرد نیکل، غلظت

از طرف دیگر اوره جذب شده توسط گیاه در سیتوپلاسم سلول‌های ریشه و برگ توسط آنزیم اوره‌آز سیتوپلاسمی هیدرولیز شده و آمونیوم حاصل از آن از طریق چرخه GS-GOGAT آسیمیله شده (Merigout et al., 2008b) و ضمن تأمین نیتروژن مورد نیاز گیاه در کاهش غلظت نیترات در بخش‌های مختلف گیاه مؤثر است. این مطلب نشان‌دهنده آنست که اوره می‌تواند به صورت کارا و به عنوان منبع نیتروژن مورد استفاده کاهو قرار گیرد. لازم به ذکر است کاهش غلظت نیترات محلول‌های غذایی مورد استفاده در این پژوهش با افزایش نسبت اوره به نیترات در تیمارهای آزمایشی و جایگزینی نیتروژن آن از منبع اوره نیز در کاهش غلظت نیترات در کاهو مؤثر بوده است. این در حالی است که بررسی وضعیت تغذیه نیتروژن شاخساره کاهو حاکی از آن است که غلظت نیتروژن شاخساره به استثنای گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات تحت تأثیر کاربرد اوره در

کاهش غلظت نیتрат در برگ‌های بیرونی و کل برگ‌های کاهو به زیر حد مجاز شد. این مطلب نشان‌دهنده آن است که حتی جایگزینی ۱۰ درصد نیتروژن محلول غذایی با اوره منجر به کاهش غلظت نیترات در شاخساره کاهو شده است. به‌هرحال این کاهش از لحاظ تغذیه‌ای دارای اهمیت زیادی بوده و مصرف این نوع کاهو خطری را برای سلامتی انسان به لحاظ غلظت نیترات ایجاد نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی تا نسبت ۶۰ به ۴۰ تأثیر معنی‌داری بر وزن تازه ریشه و شاخساره کاهو نداشت. همچنین هیچ گونه علائم ناشی از سمیت اوره به‌صورت کلروز و نکروز نوک و حاشیه برگ‌ها در گیاهان مورد آزمایش دیده نشد. از طرف دیگر هیچ کدام از شاخص‌های رشدی به استثنای ارتفاع گیاه تحت تأثیر افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی قرار نگرفتند. همچنین غلظت نیتروژن شاخساره (به استثنای گیاهان تغذیه شده با نسبت ۵۰ به ۵۰ اوره به نیترات) تحت تأثیر کاربرد اوره در محلول غذایی قرار نگرفت. این امر نشان‌دهنده آن است جایگزینی بخشی از نیترات محلول غذایی با اوره با تأمین نیتروژن مورد نیاز کاهو رشد آن را تضمین کرده است. احتمالاً کاربرد اوره با غلظت زیر حد آستانه سمیت اوره برای گیاهان (۱۶۸ میلی گرم بر لیتر) و استفاده از نشاهای یک ماهه کاهو که دارای سیستم ریشه‌ای کامل بودند در این امر مؤثر بود. با این حال افزایش نسبت اوره به نیترات محلول غذایی منجر به کاهش تجمع نیترات در ریشه و شاخساره کاهو شد که از لحاظ سلامتی مصرف‌کننده دارای اهمیت زیادی است. بر مبنای نتایج این پژوهش و بر اساس وزن تازه شاخساره و غلظت نیترات در کل برگ‌های کاهو، جایگزینی ۵۰ درصد نیترات محلول غذایی با اوره برای تولید کاهوی فرانسوی قرمز در کشت هیدروپونیک قابل توصیه است. این مسئله در مدیریت محلول‌های غذایی در کشت‌های هیدروپونیک از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا کود اوره از کودهای نیترات ارزان‌تر بوده و کاربرد آن در محلول‌های غذایی در کاهش هزینه‌های تولید مؤثر است.

نیترات در برگ‌های گوجه‌فرنگی در مقایسه با گیاهان تغذیه شده با نیترات به‌طور معنی‌داری کاهش یافت. حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2012) گزارش کردند غلظت نیترات شاخساره کاهو در بوته‌های رشد کرده در محلول غذایی حاوی اوره از بوته‌های تغذیه شده با نیترات آمونیوم کمتر بود. کاهش غلظت نیترات گیاه در نتیجه کاربرد اوره در محلول غذایی در کاهو (Hosseini et al., 2012)، اسفناج (Khan et al., 1999, 2000)، پیاز (Gunes et al., 1996)، خیار (Tabatabaei et al., 2009)، کلم‌پیچ چینی (Zhu et al., 2018) و گوجه‌فرنگی (Tan et al., 2000) نیز مشاهده شده است که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارد.

نتایج نشان داد غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی کاهو بیشتر از برگ‌های درونی کاهو بود (جدول ۷). بر اساس پژوهش‌های انجام شده بخش‌های مختلف گیاهان نیترات را به‌طور مساوی در خود تجمع نمی‌دهند. در کاهو برگ‌های بیرونی در مقایسه با برگ‌های درونی تا پنج برابر نیترات بیشتری داشتند (Abu-Rayyan et al., 2004). نیترات توسط ریشه جذب شده و از طریق آوندهای چوبی به بخش‌های هوایی گیاه منتقل می‌شود. از آنجایی که سرعت حرکت شیره خام در آوند چوب تابع میزان تعرق گیاه می‌باشد بنابراین بخش‌هایی که سطح بیشتری دارند تعرق بیشتری داشته و میزان بیشتری نیترات دریافت می‌کنند (Marschner, 1995). بنابراین از آنجایی که سطح برگ‌های بیرونی کاهو خیلی بیشتر از سطح برگ‌های درونی آن می‌باشد این مسئله منجر به غلظت بیشتر نیترات در برگ‌های بیرونی کاهو شده است. از طرف دیگر نیترات اغلب در قسمت‌های مسن گیاه مثل برگ‌های بیرونی تجمع می‌یابد زیرا در این قسمت‌ها برخلاف گیاهان نسبتاً جوان فعالیت آنزیم احیاکننده نیترات کمتر است (Biemond & Vos, 1992). در مورد غلظت استاندارد نیترات در سبزی‌های برگی اتحادیه اروپا مقدار ۲۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه را به‌عنوان حد مجاز معرفی کرده است (Santamaria, 2006). براساس نتایج جدول ۷ غلظت نیترات در برگ‌های بیرونی و کل برگ‌های گیاهان تغذیه شده با نسبت اوره به نیترات صفر به ۱۰۰ (فاقد اوره) بیشتر از ۲۵۰۰ میلی گرم بر کیلوگرم وزن تازه بود. اما کاربرد اوره در محلول غذایی به جای نیترات حتی در مقادیر کم (نسبت ۱۰ به ۹۰ اوره به نیترات) منجر به

References

1. Abu-Rayyan, A., Khraiweh, B., & Al-Ismael, K.M. (2004). Nitrate content in lettuce (*Lactuca sativa* L.) heads in relation to plant spacing, nitrogen form and irrigation level. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84(9), 931-936. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1733>
2. Alberici, A., Quattrini, E., Penati, M., Martinetti, L., Marino-Gallina, P., & Ferrante, A. (2008). Effect of the reduction of nutrient solution concentration on leafy vegetables quality grown in floating system. *Acta Horticulturae*, 801, 1167-1176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.801.142>
3. Ali Ehyayi, M., & Behbahanizadeh, A.A. (1993). *Methods of Soil Analysis*. Soil and Water Research Institute Press, Tehran. (In Persian)
4. Bar-Yosef, B., Mattson, N.S., & Lieth, H.J. (2009). Effects of $\text{NH}_4\text{:NO}_3$: urea ratio on cut roses yield, leaf nutrients content and proton efflux by roots in closed hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 122(4), 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.scientia.2009.06.011>

- doi.org/10.1016/j.scienta.2009.06.019
5. Biemond, H., & Vos, J. (1992). Effects of nitrogen on the development and growth of the potato plant. 2: The partitioning of dry matter, nitrogen and nitrate. *Annals of Botany*, 70(1), 37-45.
6. Cataldo, D., Maroon, M., Schrader, L.E., & Youngs, V.L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 6(1), 71-80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>
7. Domingues, D.S., Takahashi, H.W., Camara, C.A.P., & Nixdorf, S.L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and Electronics in Agriculture*, 84(1), 53-61. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.02.006>
8. Gu, C.S., Song, A.P., Zhang, X.X., Wang, H.B., Li, T., Chen, Y., Jiang, J.F., Chen, F.D., & Chen, S.M. (2016). Cloning of chrysanthemum high-affinity nitrate transporter family CmNRT2 and characterization of CmNRT2.1. *Scientific Reports*, 6, 23462. <https://doi.org/10.1038/srep23462>
9. Gunes, A., Inal, A., & Mehmet, A. (1996). Reducing nitrate content of NFT grown winter onion plants (*Allium cepa* L.) by partial replacement of NO_3^- with amino acid in nutrient solution. *Scientia Horticulturae*, 65(2-3), 203-208. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(95\)00864-0](https://doi.org/10.1016/0304-4238(95)00864-0)
10. Hosseini, F., Khoshgoftarmansh, A.H., & Afyuni, M. (2012). Influence of nickel nutrition and nitrogen source on growth and yield of lettuce in hydroponic culture. *Journal of Soil and Plant Interactions*, 3(1), 53-62. (In Persian with English abstract)
11. Ikeda, H., & Tan, X. (1998). Urea as an organic nitrogen source for hydroponically grown tomatoes in comparison with inorganic nitrogen sources. *Soil Science and Plant Nutrition*, 44(4), 609-615. <https://doi.org/10.1080/00380768.1998.10414484>
12. Karla, Y.P. (1998). *Handbook of Reference Methods for Plant Analysis*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London.
13. Khan, N.K., Watanabe, M., & Watanabe, Y. (1999). Effect of different concentrations of urea with or without nickel addition on spinach (*Spinacia oleracea* L.) growth under hydroponic culture. *Soil Science and Plant Nutrition*, 45(3), 569-575. <https://doi.org/10.1080/00380768.1999.10415820>
14. Khan, N.K., Watanabe, M., & Watanabe, Y. (2000). Effect of partial urea application on nutrient absorption by hydroponically grown spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Soil Science and Plant Nutrition*, 46(1), 199-208. <https://doi.org/10.1080/00380768.2000.10408775>
15. Khoshgoftarmansh, A.H., & Bahmanziari, H. (2012). Stimulating and toxicity effects of nickel on growth yield and fruit quality of cucumber supplied with different nitrogen sources. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(3), 474-481. <https://doi.org/10.1002/jpln.201100241>
16. Khoshgoftarmansh, A.H., Hosseini, F., & Afyuni, M. (2011). Nickel supplementation effect on the growth, urease activity and urea and nitrate concentrations in lettuce supplied with different nitrogen sources. *Scientia Horticulturae*, 130(2), 381-385. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.009>
17. Luo, J., Lian, Zh., & Yan, X. (1993). Urea transformation and the adaptability of three leafy vegetables to urea as a source of nitrogen in hydroponic culture. *Journal of Plant Nutrition*, 16(5), 797-812. <https://doi.org/10.1080/01904169309364575>
18. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.
19. Marsic, N.K., & Osvald, J. (2002). Effects of different nitrogen levels on lettuce growth and nitrate accumulation in iceberg lettuce (*Lactuca sativa* var. Capitata) grown hydroponically under greenhouse conditions. *Gartenbauwissenschaft*, 67(4), 128-134.
20. Merigout, P., Gaudon, V., Quiller, I., Briand, X., & Daniel-Vedele, F. (2008a). Urea use efficiency of hydroponically grown maize and wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 31(3), 427-443. <https://doi.org/10.1080/01904160801894970>
21. Merigout, P., Lelandais, M., Bitton, F., Renou, J.P., Briand, X., Meyer, C., & Daniel-Vedele, F. (2008b). Physiological and transcriptomic aspects of urea uptake and assimilation in arabidopsis plants. *Plant Physiology*, 147(3), 1225-1238. <https://doi.org/10.1104/pp.108.119339>
22. Risch, H.A., Jain, M., Choi, N.W., Fodor, J.G., Pfeiffer, C.J., Howe, G.R., Harrison, L.W., Craib, K.J.P., & Miller, A.B. (1985). Dietary factors and the incidence of cancer of the stomach. *American Journal of Epidemiology*, 122(6), 947-949. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a114199>
23. Samarakoon, U.C., Weerasighe, P.A., & Weerakodi, A.P. (2006). Effect of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on nutrient uptake, growth and yield of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) in stationary culture. *Tropical Agricultural Research*, 18(1), 13-21.
24. Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10-17. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2351>
25. Savvas, D., Gianquinto, G.P., Tüzel, Y., & Gruda, N. (2013). Soilless Culture. p. 303-354. In: Baudoin, W., Nono-Womdim, R., Lutaladio, N., Hodder, A., Castilla, N., Leonardi, C., De Pascale, S., Qaryouti, M. (eds.) Good Agricultural Practices for Greenhouse Vegetable Crops. Principles for Mediterranean Climate Areas. FAO. Rome.
26. Silva, J., França, M., Gomide, F., & Magalhaes, J. (2013). Different nitrogen sources affect biomass partitioning

- and quality of potato production in a hydroponic system. *American Journal of Potato Research*, 90(2), 179-185. <https://doi.org/10.1007/s12230-012-9297-5>
27. Song, S.W., Li, G., Sun, G.W., Liu, H.C., & Chen, R.Y. (2016). Uptake kinetics of different nitrogen forms by Chinese Kale. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 47(11), 1372-78. <https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1178279>
28. Tabatabaei, S.J. (2009). Supplements of nickel affect yield, quality, and nitrogen metabolism when urea or nitrate is the sole nitrogen source for cucumber. *Journal of Plant Nutrition*, 32(5), 713-724. <https://doi.org/10.1080/01904160902787834>
29. Tan, X.W., Ikeda, H., & Oda, M. (2000). Effects of nickel concentration in the nutrient solution on the nitrogen assimilation and growth of tomato seedlings in hydroponic culture supplied with urea or nitrate as the sole nitrogen source. *Scientia Horticulturae*, 84(3-4), 265-273. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00107-7)
30. Tsay, Y.F., Chiu, C.C., Tsai, C.B., Ho, C.H., & Hsu, P.K. (2007). Nitrate transporters and peptide transporters. *FEBS Letters*, 581(12), 2290-300. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.04.047>
31. Uathitirat, J., & Ruamrungsri, S. (2013). Effects of urea as a nitrogen source on growth of lettuce grown in hydroponic. P. 37-39. In International Graduate Research Conference. 20 December 2013. Chiang Mai University, Thailand.
32. Zanin, L., Zamboni, A., Monte, R., Tomasi, N., Varanini, Z., Cesco, S., & Pinton, R. (2015). Transcriptomic analysis highlights reciprocal interactions of urea and nitrate for nitrogen acquisition by maize roots. *Plant and Cell Physiology*, 56(3), 532-48. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcu202>
33. Zhu, Y., Li, G., Liu, H., Sun, G., Chen, R., & Song, S. (2018). Effects of partial replacement of nitrate with different nitrogen forms on the yield, quality and nitrate content of Chinese kale. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(11), 1384-1393. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1464179>
34. Zhu, Z., Gerendas, J., & Sattelmacher, B. (1997). Effects of Replacing of Nitrate with Urea or Chloride on the Growth and Nitrate Accumulation in Pak-Choi in the Hydroponics. p. 963-964. In: Ando, T., Fujita, K., Mae, T., Matsumoto, H., Mori, S., Sekiya, J. (eds.) *Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. The Netherlands.

A Comparative Analysis of the Impact of Various Acrylic Polymers on Mitigating the Mobility of Selected Heavy Metals in a Contaminated Soil

A. Barikloo¹, P. Alamdari^{2*}, A. Golchin³

1, 2 and 3- Ph.D. Graduated, Associate Professor and Professor of Soil Science Department, Faculty of Agriculture, University of Zanjan, Zanjan, Iran, respectively.

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

Received: 30-01-2024
Revised: 08-04-2024
Accepted: 08-04-2024
Available Online: 08-04-2024

How to cite this article:

Barikloo, A., Alamdari, P., & Golchin, A. (2024). A comparative analysis of the impact of various acrylic polymers on mitigating the mobility of selected heavy metals in a contaminated soil. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 253-267. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86611.1378>

Introduction

Heavy metals such as lead, aluminum, mercury, copper, cadmium, nickel, and arsenic are now commonly found worldwide. Among these, cadmium and lead are the most hazardous, posing significant risks to both the environment and human health. Cleaning soils contaminated with organic and inorganic contaminants is one of the most significant and fundamental challenges facing society today. One effective method for soil purification is to extract or immobilize the contaminant within the soil.

Materials and Methods

It is unclear how water-soluble polymers contribute to the immobilization of heavy metals. The purpose of this study is to examine how various polymers affect the immobilization of lead, zinc, and cadmium in the soil near a lead and zinc mine in the province of Zanjan. A factorial experiment with three replications was conducted using a randomized complete block design. The experimental treatments included one type of soil and three different kinds of acrylic polymers (cationic, nonionic, and anionic) applied at four different levels (0, 0.05, 0.1, and 0.2). The absorbable amounts of lead, zinc, and cadmium were tested at various intervals after the polymers were applied to the soil samples. After that, SAS statistical software was used to examine the data. To do this, the Duncan multiple range test was used to compare the means. The necessary tables and graphs were then created using Excel.

Results and Discussion

The findings demonstrated that, at 1% probability level, the kind of polymer had a considerable impact on the amount of lead, zinc, and cadmium that may be absorbed in the soil. The average concentration of soil-absorbable lead for the different types of polymers employed was 239.8, 260.15, and 267.65 mg/kg; anionic polymer had the lowest concentration. Stated differently, anionic polymer decreases the capacity to absorb lead and stabilizes more lead in the soil than the other two forms of polymer. Anionic polymers most likely have a stronger impact on soil granulation. Additionally, at 1% probability level, the impact of acrylic polymer intake on the amount of lead, zinc, and cadmium absorbable in the soil was considerable. With an increase in the amount of polymer utilized in the soil, the greatest absorbable lead concentration (301.58 mg/kg) in the control treatment dropped to the lowest absorbable lead concentration (0.2). It was possible to determine the polymer percentage and the lead concentration, which came out to be 205.9 mg/kg of soil. Zinc concentration dropped as acrylic polymer consumption increased; in the control treatment, absorbable zinc concentrations ranged from 0.2 to 83.5 mg/kg of soil, with 0.2 being the highest



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86611.1378>

concentration. At 1% probability level, the impact of the polymer's contact time with the soil on the amount of lead, zinc, and cadmium that the soil may absorb was significant. As a result, the tested soil had 414.52 mg of these elements at the initial stage of polymer treatment. The quantity of absorbable lead in the soil became 66% immobilized after a month, and after 720 hours, the amount of absorbable lead dropped to 141.83 mg/kg. As the polymer's contact time with the soil increased, so did the concentration of absorbable zinc in the soil. At 1% probability level, there was a strong correlation between the kind and amount of acrylic polymers and the amount of lead, zinc, and cadmium that may be absorbed in the soil. The ingestion of 0.2% anionic polymer resulted in the largest amount of lead immobilization, lowering the soil's absorbable lead concentration from 300 to 192 mg/kg of soil. A higher amount of anionic polymer immobilized the lead, and both cationic and non-ionic polymers were positioned after it. Additionally, anionic polymer was more prevalent than cationic polymer. It caused the non-ionic polymer's absorbable zinc to become immobile. Following 720 hours of polymer treatment, the soil's absorbable zinc element was immobilized to a greater extent by the anionic polymer (20%) than by the cationic and non-ionic polymers (26%), respectively. In comparison to the original concentration, the largest amount of immobilization by anionic polymer after one month was 78%, and the lowest amount of immobilization by nonionic polymer was 61%. Anionic polymer was 27% more effective than non-ionic polymer, 18% more effective than cationic polymer, and stabilized more cadmium.

Conclusion

The results of this study showed that with increasing the duration of contact of polymers used with the soil, the amount of mobility of heavy metals in the soil decreased and also with increasing the amount of polymer consumption, the rate of metal stabilization in the soil increased. Anionic polymers immobilize more lead, zinc and cadmium in soil. To reduce the mobility of lead, zinc and cadmium and improve the stability and increase aggregation in soil, the use of acrylic polymer in contaminated soil is recommended.

Keywords: Anionic polymer, Cationic polymer, Heavy metal stabilization, Nonionic polymer

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۶۷-۲۵۳

مقایسه اثر چند پلیمر اکریلیکی در کاهش تحرک برخی فلزات سنگین در یک خاک آلوده

علی باریکلو^۱ - پریسا علمداری^{۲*} - احمد گلچین^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

چکیده

یکی از مسایل مهم و اساسی در دنیای امروز پاکسازی خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی می‌باشد و بر این اساس، خارج نمودن آلاینده از خاک (استخراج) و یا غیر متحرک‌سازی آن یکی از راهکارهای پالایش خاک می‌باشد. این پژوهش برای بررسی تأثیر پلی‌مرهای مختلف در غیر متحرک کردن فلزات سرب، روی و کادمیم در خاک اطراف معدن سرب و روی انگوران استان زنجان انجام گرفت. برای انجام این پژوهش از یک آزمایش فاکتوریل (سه فاکتوره) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی را نوع پلی‌مر در سه سطح (کاتیونی، آنیونی و غیر یونی) مقدار پلی‌مر مصرفی در چهار سطح (صفر، ۵/۰، ۱ و ۲ گرم در کیلوگرم خاک) و مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک در هفت سطح (صفر، ۳، ۹، ۲۷، ۷۲، ۱۶۸، ۲۳۶ و ۷۲۰ ساعت) تشکیل می‌دادند. نمونه‌های خاک با پلی‌مرها محلول‌پاشی و در زمان‌های مختلف غلظت قابل استخراج سرب، روی و کادمیم اندازه‌گیری گردید. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد با افزایش مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک میزان تحرک فلزات سنگین در خاک کاهش یافت و همچنین با افزایش میزان مصرف پلی‌مر میزان تثبیت فلزات در خاک افزایش و پلی‌مر آنیونی به میزان بیش‌تری سرب، روی و کادمیم را در خاک غیر متحرک کرد. سرب قابل استخراج به میزان ۷۶ درصد روی قابل استخراج ۷۲ درصد و کادمیم قابل استخراج ۸۸ درصد توسط پلی‌مر آنیونی غیر متحرک گردید. توصیه می‌شود این پلیمر اکریلیکی برای کاهش تحرک فلزات سنگین از قبیل سرب، روی و کادمیم مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: پلی‌مر آنیونی، پلی‌مر کاتیونی، پلی‌مر غیر یونی، تثبیت فلزات سنگین

مقدمه

از جمله مهم‌ترین آلاینده‌های زیست‌محیطی محسوب می‌شوند و در فهرست سازمان محیط‌زیست آمریکا به‌عنوان خطرناک‌ترین فلزات سنگین معرفی شده‌اند (Sparks, 2003). راه‌های پالایش خاک‌های آلوده به آلاینده‌های آلی و معدنی بر یکی از دو اصل خارج نمودن آلاینده از خاک (استخراج) و یا غیر متحرک‌سازی آن استوارند. روش‌های غیر متحرک‌سازی شامل جامدسازی یا تثبیت است. کاهش تحرک آلاینده توسط افزودن مواد مختلف به خاک و استفاده از واکنش‌های شیمیایی تثبیت نام دارد (Mulligan et al., 2001). تکنیک تثبیت با کاهش تحرک و قابلیت دسترسی آلاینده خطرات آبشویی، جذب گیاه، در معرض قرار گرفتن انسان و سمیت آن را کاهش می‌دهد. در این روش غلظت کل آلاینده پس از پاک‌سازی تغییر نمی‌کند ولی به شکل‌های با سمیت کمتر و غیر فعال‌تر تبدیل می‌شود (Miretzky et al., 2003).

یکی از مهم‌ترین سیاست‌های زیست‌محیطی در کشورهای صنعتی و در حال توسعه، پالایش خاک‌ها و آب‌های آلوده به عناصر سنگین است. امروزه مناطق وسیعی از دنیا تحت تأثیر آلودگی عناصر سنگین قرار گرفته‌اند که توسعه صنعتی در کشورها را می‌توان یکی از عوامل مهم این فرآیند برشمرد. منابع فلزات سمی در محیط‌زیست، سوخت‌های فسیلی، منابع استخراج معادن، فاضلاب‌های شهری و دفع زباله‌ها در محیط‌زیست است. همچنین محیط‌زیست می‌تواند به‌دلیل استفاده از سموم کشاورزی، آفت‌کش‌ها، علف‌کش‌ها و کودها به فلزات سنگین آلوده شود. این فلزات به‌دلیل تجزیه ناپذیر بودن در محیط پایداری دارند و وارد زنجیره غذایی می‌شوند (Cherfi et al., 2014). کادمیم و سرب

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته دکتری، دانشیار و استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

(Email: p_alamdari@znu.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این تحقیق، یک نمونه خاک آلوده به فلزات سنگین از زمین‌های زراعی منطقه‌ای در اطراف معدن سرب و روی انگوران استان زنجان تهیه و پس از تیمارهای اولیه، برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی و نیز غلظت برخی عناصر اندازه‌گیری شدند. pH و EC در عصاره گل اشباع، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee & Walkely, 1986)، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Bauder, 1986)، درصد کربنات کلسیم معادل به روش کلسیمتری (& Blavk, 1934)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش باور (Nelson, 1982)، نیتروژن کل خاک با استفاده از هضم کج‌لدال (Miller, 1996)، فسفر قابل استفاده خاک به روش (Bremner & Mulvaney, 1996)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری اولسن (Helmke, 1996)، پتاسیم قابل استفاده به روش عصاره‌گیری با اسات آمونیوم (Helmke, 1996)، سرب، کادمیوم، روی، آهن، مس، و منگنز با DTPA (Lindsay & Norvell, 1978) تعیین شدند. سپس خاک‌های آلوده در نمونه‌های چهار کیلویی توزیع و پس از محلول‌پاشی با پلی‌مر اکریلیکی در گلدان‌های پلاستیکی ریخته شدند و جهت رسیدن به تعادل نسبی به مدت ۳۰ روز در گلخانه در دمای ۲۵ درجه سلسیوس نگهداری شدند. برای انجام این پژوهش از یک آزمایش فاکتوریل (سه فاکتوره) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. فاکتورهای مورد بررسی را نوع پلی‌مر (تهیه شده از پژوهشگاه پلی‌مر ایران) در سه سطح (کاتیونی، آنیونی و غیر یونی) مقدار پلی‌مر مصرفی در چهار سطح (صفر، ۱/۵ و ۲ گرم در کیلوگرم خاک) و مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک در هفت سطح (صفر، ۳، ۹، ۷۲، ۱۶۸، ۲۳۶ و ۷۲۰ ساعت) تشکیل می‌دادند. بنابراین تعداد تیمارهای آزمایشی ۸۴ عدد و با لحاظ نمودن سه تکرار در مجموع ۲۵۲ واحد آزمایشی با گلدان چهار کیلویی خاک وجود داشت که جامعه آماری آزمایش را تشکیل می‌دادند. پس از اعمال تیمارهای یاد شده، میزان فلزات سنگین قابل عصاره‌گیری با کلسیم کلرید و DTPA اندازه‌گیری شد. از آنجایی که کلسیم کلرید عصاره‌گیر مناسبی نبود، فقط نتایج عصاره‌گیر DTPA گزارش و تجزیه آماری روی آن انجام شد. درصد فلز سنگین غیر متحرک شده نیز با استفاده از معادله (۱) محاسبه شد. پس از جمع‌آوری اطلاعات، داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور مقایسه میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال یک درصد صورت پذیرفت. سپس با استفاده از نرم‌افزار Excel نمودارها و جدول‌های مورد نیاز رسم شد.

$$A = 1 - [(B)/(C)] \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه A برابر با درصد فلز سنگین غیر متحرک شده، B شامل غلظت فلز سنگین قابل استخراج در خاک تیمار شده و C غلظت فلز سنگین قابل استخراج با عصاره‌گیر در خاک بدون تیمار می‌باشد

۲۰۱۰). برخی از اصلاح‌کننده‌های مورد بررسی شامل مواد افزودنی مانند آهک (Geebelen et al., 2002)، ماده آلی، کمپوست و کود (Farfel et al., 2005) و همچنین محصولات صنعتی مانند زئولیت‌ها (Hamidpour et al., 2017 Friesl et al., 2003;)، بریسنایت (Mench et al., 2000) و برینگایت (et al., 1999) می‌باشند. پلی‌مرها مواد سودمندی برای بهبود ساختمان خاک هستند. بیش از ۵۰ سال است که انواع مختلف پلی‌مر برای اصلاح ساختمان خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. پلی‌مرهای آب‌دوست فراهمی زیستی فلزهای سمی را در نتیجه کلاته کردن و برقراری پیوند یونی و کوالانسی با فلزات کاهش می‌دهند و باعث بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان می‌شوند. دیمان و همکاران (Dhiman et al., 2020) بیان کردند که استفاده از پلی‌اکریل امید تحرک فلزات سنگین را در خاک کاهش می‌دهد و از جذب آن توسط گیاه سیب‌زمینی کم می‌کند. وارنس و همکاران (Varennnes et al., 2009) بیان کردند که در یک خاک آلوده، مقدار مس و روی قابل استخراج با آب به ترتیب ۲/۸ و ۲ برابر بیشتر از زمانی بود که آن خاک با پلی‌مر پلی‌اکریلات تیمار شده بود. پلی‌مرهای محلول در آب در بهبود بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند افزایش ظرفیت نگه‌داری آب، افزایش نفوذپذیری خاک و بهبود پایداری خاکدانه‌ها، مؤثر هستند (Al-Khashman, 2007). تشکیل خاکدانه سبب کاهش سطح ویژه ذرات خاک شده و سطحی از فاز جامد که در معرض محلول خاک قرار می‌گیرد را کاهش می‌دهد. این امر با کاهش آزادسازی عناصر از فاز تبدلی غلظت آنها را در محلول خاک کاهش داده و در نتیجه از زیست‌فراهمی آنها کاسته می‌شود (Aram abd Golchin, 2015). فلزات سنگین می‌توانند از طریق خاک و جذب توسط گیاه وارد زنجیره غذایی شده و باعث ایجاد مشکلات عصبی، گوارشی و تنفسی در انسان و حیوانات می‌شوند، همچنین فلزات سنگین باعث آلودگی آب و هوا می‌شوند. فلزات سنگین می‌توانند جذب مواد مغذی توسط گیاهان را مختل کرده و رشد گیاهان را کاهش دهند. غیر متحرک کردن فلزات سنگین می‌تواند به افزایش حاصلخیزی خاک و بهبود تولید محصولات کشاورزی کمک کند. پاکسازی خاک‌های آلوده به فلزات سنگین بسیار پرهزینه می‌باشد بنابراین غیر متحرک کردن فلزات سنگین می‌تواند به‌عنوان یک روش ارزان و مؤثر برای پاکسازی خاک‌های آلوده مورد استفاده قرار گیرد (Xiang et al., 2021). اگرچه تحقیقات متعددی روی پلی‌مرهای اکریلیک در غیر متحرک کردن فلزات سنگین صورت گرفته ولی تحقیقاتی که عملکرد و راندمان پلی‌مرها با بار مختلف را در غیر متحرک کردن فلزات سنگین مقایسه و نشان دهد کمتر وجود دارد. با توجه به اهمیت غیر متحرک کردن فلزات سنگین در خاک این تحقیق جهت بررسی میزان تثبیت فلزات سنگین خاک با استفاده از سه نوع پلی‌مر پلی‌اکریلیکی محلول در آب (آنیونی، کاتیونی، غیر یونی) با گذشت زمان صورت گرفت.

(Park et al., 2011).

نتایج و بحث

نتایج تجزیه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در **جدول ۱** آورده شده است. براساس این نتایج خاک مشکلی از نظر شوری و pH ندارد. غلظت قابل استخراج سرب، روی و کادمیم به ترتیب ۱۷، ۳۱ و ۴/۸۵ میلی‌گرم در گیلوگرم و کل به ترتیب ۶۳۳، ۸۵۰ و ۱۴ میلی‌گرم در گیلوگرم بود.

خصوصیات پلی‌مرهای اکریلیکی مورد استفاده در **جدول ۲** نشان داده شده است. این خصوصیات توسط پژوهشگاه پلی‌مر ایران اندازه گیری و گزارش شده است. پلی‌مرهای مورد استفاده دارای ساختار خطی بوده و محلول در آب هستند. در این سه نوع پلی‌مر مونومر پایه،

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک مورد استفاده

Table 1- Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

ظرفیت زراعی Fc	رس Clay	شن Sand	سیلت Silt	کربن آلی OC	کربنات کلسیم معادل CCE	pH	EC	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC	غلظت سرب قابل استخراج Extractable Pb	غلظت سرب کل Total Pb	غلظت روی قابل استخراج Extractable Zn	غلظت روی کل Total Zn	غلظت کادمیم قابل استخراج Extractable Cd	غلظت کادمیم کل Total Cd
			(%)			-	($\mu\text{S cm}^{-1}$)	(cmol kg^{-1})				(mg kg^{-1})		
19	24	45	31	0.5	30	7.7	385	28	17	623	31	850	4.85	14

جدول ۲- خصوصیات پلی‌مرهای اکریلیکی مورد آزمایش

Table 2- Properties of Acrylic Polymers Used in the Experiment

	اکریل آمید-اکریلیک اسید Acrylamide-acrylic acid	مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید Maleic anhydride-styrene-acrylic acid	مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید Maleic anhydride-styrene-acrylic acid
رنگ Color	سفید شیری white	سفید شیری white	سفید شیری white
نوع بار Charge	آنیونی anionic	کاتیونی cation	غیر یونی nonionic
وزن مولکولی Molecular weight	50000-55000	50000-55000	50000-55000
اکریلیک اسید Acrylic acid	80	63	60
اکریل آمید Acrylamide	20	0	0
مالئیک انیدرید Maleic anhydride	0	8	35
استایرن Styren	0	19	5
اسیدیته Acidity	2-3	6-7	7
چگالی Density	1.04	1.04	1.02
ویسکوزیته Viscosity	30	25	25

تأثیر نوع پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع پلی‌مرها بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). میانگین غلظت سرب قابل استخراج خاک برای انواع پلی‌مرهای مصرفی ۲۳۹/۸ (معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد) ۲۶۰/۲ (معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد) و ۲۶۷/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم (معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد) بود که کم‌ترین غلظت مربوط به پلی‌مر آنیونی و بیش‌ترین غلظت مربوط به پلی‌مر غیریونی بود. به عبارتی پلی‌مر آنیونی نسبت به دو نوع پلی‌مر دیگر سرب بیشتری در خاک تثبیت کرده و از قابلیت جذب سرب کاسته است (شکل ۱ الف). پلی‌مر آنیونی به دلیل داشتن بار منفی قادر است کاتیون‌ها را کلاته و غیر قابل استخراج کند در نتیجه میزان غلظت قابل استخراج کاهش بیشتری نسبت به پلی‌مر کاتیونی داشته است (Comforth, 1968; Lentz, 1992).

غلظت روی قابل استخراج خاک‌های تیمار شده با پلی‌مر آنیونی،

کاتیونی و غیریونی به ترتیب ۵۹/۳، ۶۱/۷ و ۶۳/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که پلی‌مر آنیونی بیش‌تر از دو پلی‌مر دیگر روی را در خاک غیر متحرک کرده بود (شکل ۱ ب). خاک تیمار شده با پلی‌مر آنیونی کم‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج به میزان ۱/۷۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و پلی‌مر غیریونی بیش‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج به میزان ۱/۹۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک را دارا بودند (شکل ۱ ج). وارنس و همکاران (Varens et al., 2006) گزارش کردند که غلظت فلزهای سمی کادمیوم، نیکل و روی محلول در خاک‌های آلوده تیمار شده با مقدار ۰/۱ درصد پلی‌مر پلی‌اکریلات کم‌تر از خاک شاهد بود و تیمار کردن خاک‌های آلوده با پلی‌مر سبب شد که غلظت کادمیوم، نیکل و روی به ترتیب ۲۵-۸، ۵۰-۲۵ و ۴۰-۵۳ درصد غلظت این فلزها در محلول خاک‌های فاقد پلی‌مر باشد. مکانیسم غیرمتحرک‌سازی عناصر سنگین توسط پلی‌مرهای اکریلیکی، احتمالاً از طریق برقراری پیوندهای کتوردینانسی بین فلزات سنگین و کاتیون فلزی متصل به گروه‌های عاملی کربوکسیل و آمین موجود در زنجیره پلی‌مر است.

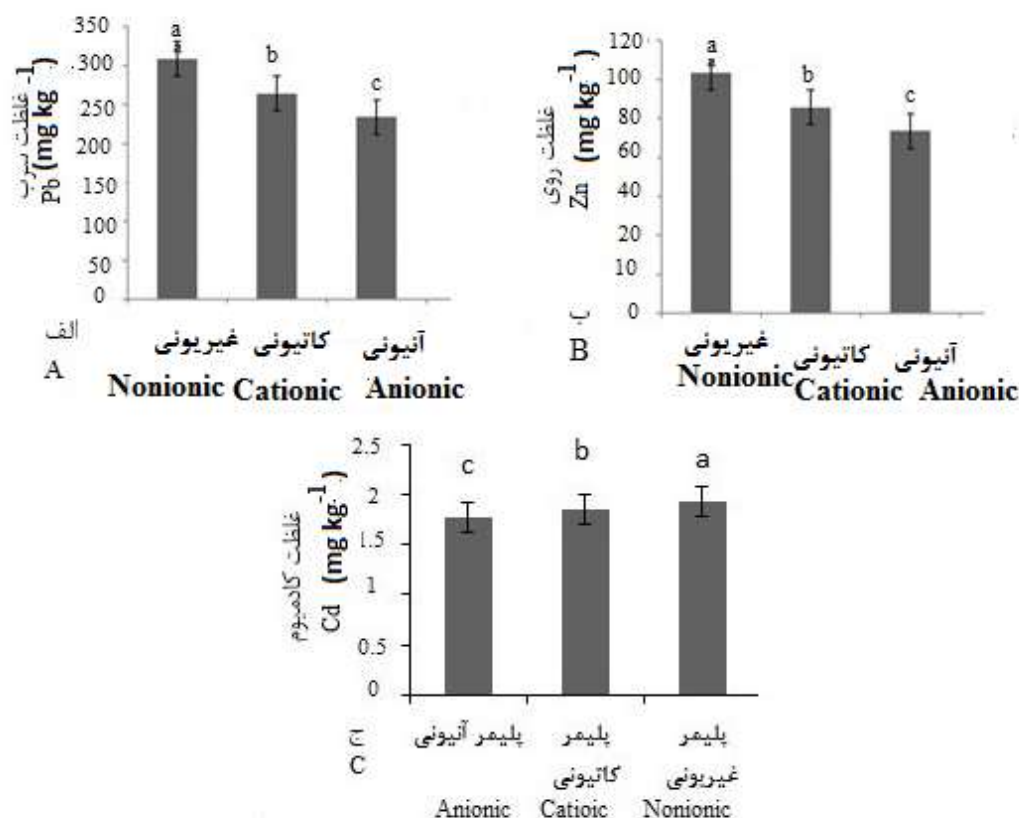
جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس اثرات تیمارهای آزمایشی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

Table 3- Results of analysis of variance for the effect of experimental treatments on the extractable concentrations of lead, zinc, and cadmium

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی Df	میانگین مربعات غلظت فلزات سنگین قابل استخراج خاک Mean squares of extractable heavy metals		
		سرب Pb	روی Zn	کادمیوم Cd
بلوک Block	2	12.0430 ^{ns}	0.7665 ^{ns}	0.0003 ^{ns}
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک Contact time of polymers with soil	7	286597**	4299**	5**
مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی Amount of acrylic polymers	3	130437.24**	171134.98**	150.69**
نوع پلی‌مرهای اکریلیکی Type of acrylic polymers	2	19892.451**	451.625**	0.523**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک × مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی The duration of contact of polymers with the soil x the amount of acrylic polymers used	21	36783.201**	544.675**	0.767**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک × نوع پلی‌مر Duration of contact of polymers with soil x type of polymer	14	2076.081**	8.122**	0.009**
مقدار مصرف پلی‌مر × نوع پلی‌مر اکریلیکی The amount of polymer used x the type of acrylic polymer	6	4255.58**	43.09**	0.093**
مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک × مقدار مصرف پلی‌مر × نوع پلی‌مر اکریلیکی Duration of contact of polymers with soil x amount of polymer consumption x type of acrylic polymer	42	996.824**	2.997**	0.003**
خطا Error	190	4.717	0.195	0.001

** و ns به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن اثر در سطح یک درصد و عدم معنی‌داری می‌باشند

ns, **: non-significant, significant at $p \leq 0.01$, respectively



شکل ۱- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیم (ج) قابل استخراج خاک
Figure 1- Comparison of the means of the effect of different types of acrylic polymer on the extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil

روی و کادمیم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). در مورد عنصر سرب تیمار شاهد دارای بالاترین قابل استخراج به میزان ۳۰۱/۶ میلی-گرم بر کیلوگرم بود که با افزایش مقدار پلی‌مر مصرفی در خاک غلظت سرب کاهش یافته و کم‌ترین غلظت سرب قابل استخراج با مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر و با غلظت ۲۰۵/۹ میلی‌گرم سرب بر کیلوگرم خاک به‌دست آمد (شکل ۲ الف). با افزایش مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی غلظت روی و کادمیم کاهش یافت و بیش‌ترین غلظت روی قابل استخراج در تیمار شاهد به میزان ۸۳/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت روی با مقدار مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر به میزان ۴۷/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (شکل ۲ ب). بیش‌ترین غلظت کادمیم قابل استخراج در تیمار شاهد و کم‌ترین غلظت آن در مقدار

پلی‌مرها با خاکدانه‌سازی و ایجاد پوشش بر سطح خاکدانه‌ها از سطح تماس ذرات رس با محلول خاک کاسته و با کاهش فرآیند تبادل کاتیونی بین ذرات و محلول خاک از زیست‌فراهمی فلزات سنگین می‌کاهند. بعلاوه مولکول‌های پلی‌مر با کلاته کردن و رسوب دادن فلزات سنگین در محلول خاک از قابلیت جذب آنها توسط گیاه می‌کاهند (Aram & Golchin, 2015). منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2017) جهت بررسی کاهش تحرک آرسنیک در خاک با استفاده از نانو ذرات هماتیت و پلی‌مرهای اکریلیکی بیان داشتند که کاربرد کوپلیمر آکریل آمید-اکریلیک اسید و کوپلیمرهای مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید غلظت آرسنیک فراهم، جذب شده به‌صورت اختصاصی در خاک و غلظت مجموع آرسنیک فراهم و آرسنیک جذب شده به‌صورت اختصاصی در خاک را به‌طور مؤثری کاهش داد و کاربرد ۰/۲ درصد از این پلی‌مرها در کاهش غلظت آرسنیک خاک را مؤثر دانستند.

تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب،

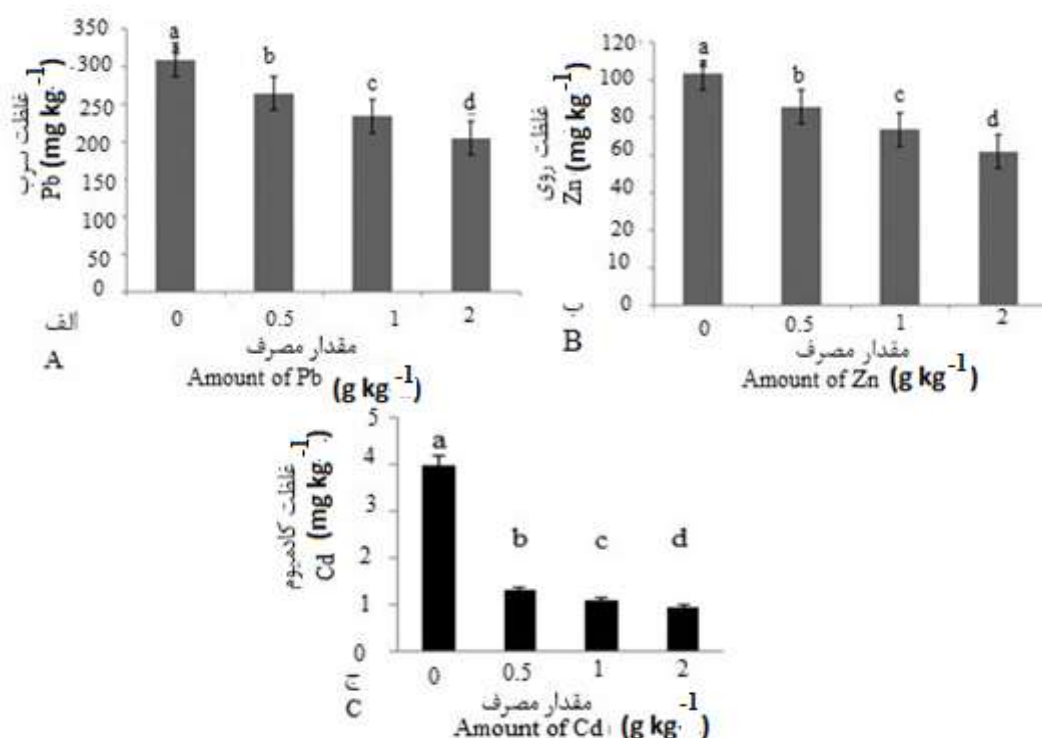
پلی‌مرها با خاک بر غلظت سرب، روی و کادمیم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳)، طوری‌که خاک مورد بررسی در لحظه اول تیمار کردن با پلی‌مر دارای ۴۱۴/۵۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم سرب قابل استخراج بود و با گذشت زمان کاهش یافت. پس از گذشت ۷۲۰ ساعت مقدار سرب قابل استخراج به میزان ۶۶ درصد در خاک غیر متحرک شد و میزان سرب قابل استخراج پس از گذشت ۷۲۰ ساعت به ۱۴۱/۸۳ میلی‌گرم بر کیلوگرم کاهش یافت (شکل ۳ الف). غلظت روی قابل استخراج خاک نیز با افزایش مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک کاهش یافت. غلظت روی قابل استخراج در زمان صفر ۷۶/۱۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم بود که پس از گذشت ۷۲۰ ساعت غلظت به ۴۳/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش یافت. بنابراین پس از گذشت ۷۲۰ ساعت مقدار روی قابل استخراج به میزان ۴۳/۳ درصد غیر متحرک شد (شکل ۳ ب). غلظت کادمیم با گذشت زمان کاهش یافت. بیش‌ترین غلظت کادمیم قابل استخراج در زمان صفر و بعد از تیمار کردن خاک با پلی‌مر به میزان ۲/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک و کم‌ترین غلظت پس از گذشت یک ماه به میزان ۱/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد (شکل ۳ ج).

مصرف ۲ گرم در کیلوگرم پلی‌مر در خاک با غلظت ۰/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم اندازه‌گیری شد که در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار می‌باشد (شکل ۲ ج). وارنس و همکاران (Varens et al., 2009) گزارش کردند که در یک خاک آلوده که با پلی‌مر اکریلات ۲ درصد تیمار شده بود مقدار سرب قابل استخراج با آب به ۶۳ درصد و مقدار مس و روی به ۵۰ درصد مقدار آن در خاک شاهد کاهش پیدا کرد. منصوری و همکاران (Mansouri et al., 2017) در مطالعه‌ی بررسی کاهش تحرک آرسنیک در خاک به کمک نانوذرات هماتیت و پلی‌مرهای اکریلیکی نشان دادند که با افزایش مقدار کاربرد پلی‌مرهای اکریلیکی میزان کاهش غلظت آرسنیک فراهم خاک، افزایش یافت و کم‌ترین غلظت آرسنیک فراهم خاک مربوط به مقدار ۰/۰۵ درصد پلی‌مر اکریلیکی غیر یونی (مالئیک انیدرید-استایرن-اکریلیک اسید) بود.

تأثیر مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک بر غلظت سرب،

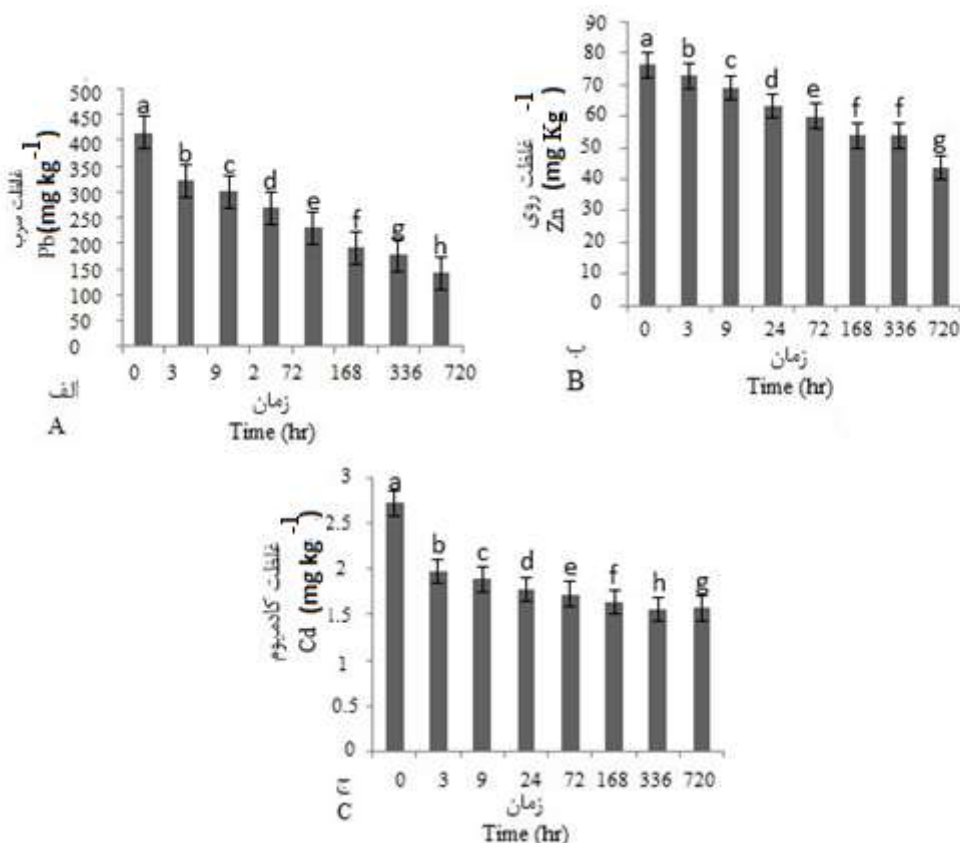
روی و کادمیم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر مدت زمان تماس



شکل ۲- مقایسه میانگین‌های تأثیر مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 2- Comparison of the means of the effect of acrylic polymer application rate on extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil



شکل ۳- مقایسه میانگین‌های تأثیر مدت زمان تماس پلی‌مرهای اکریلیکی با خاک بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک

Figure 3- Comparison of the means of the effect of contact time of acrylic polymers on the extractable concentrations of lead (a), zinc (b), and cadmium (c) in soil

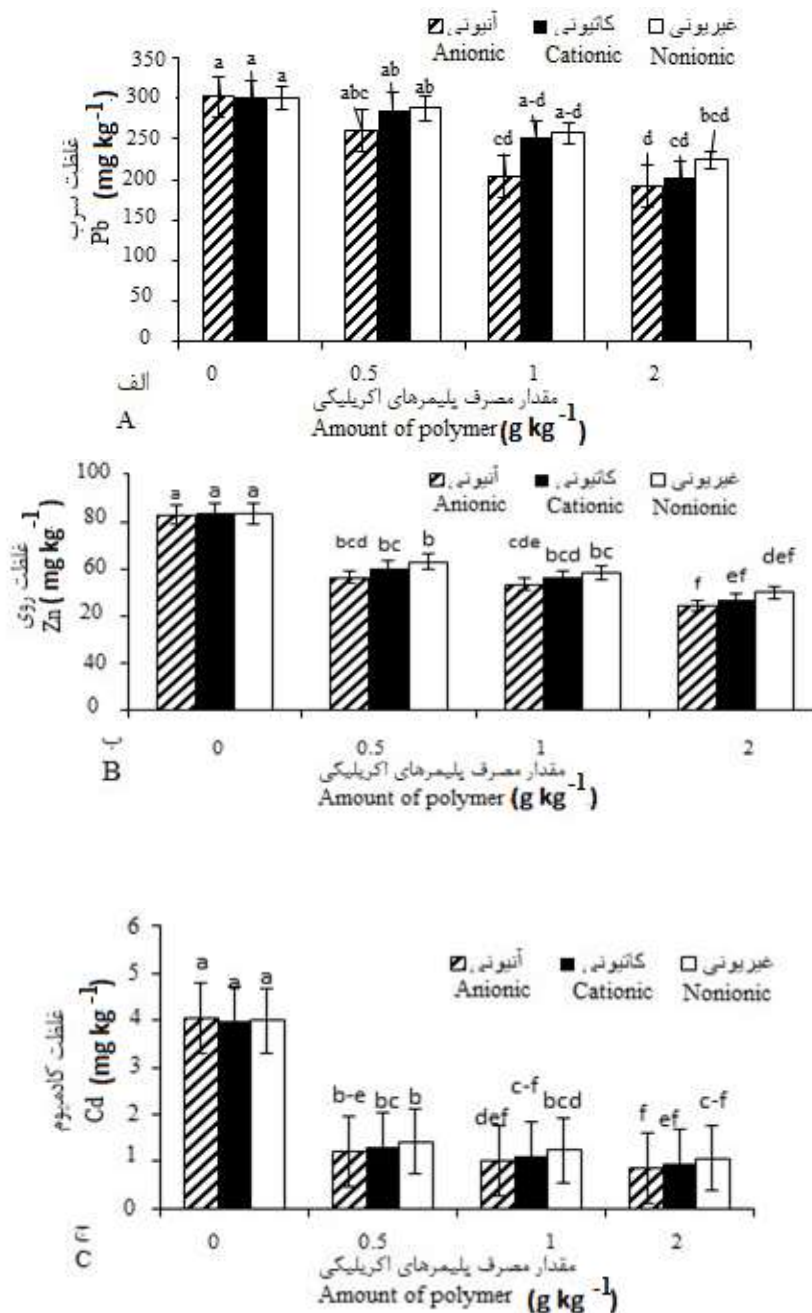
۰/۸۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد که نسبت به تیمار شاهد ۲۲ درصد کاهش یافت (شکل ۴ ج).

اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلی‌مرها با خاک، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد اثرات متقابل مدت زمان تماس پلی‌مرها، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). پلی‌مر آنیونی به میزان بیش‌تری سرب را غیر متحرک کرد و به‌ترتیب پلی‌مر کاتیونی و غیریونی بعد از آن قرار گرفتند. میزان تثبیت سرب نسبت به تیمار شاهد در پلی‌مر آنیونی با مصرف ۰/۵ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر ۷۲ درصد بود که با افزایش مصرف پلی‌مر ۲ گرم بر کیلوگرم به ۷۶ درصد رسید.

اثر متقابل نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تأثیر نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب، روی و کادمیوم قابل استخراج خاک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). بیش‌ترین مقدار غیر متحرک شدن سرب مربوط به مقدار مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی بود که غلظت سرب قابل استخراج خاک را از ۳۰۰ به ۱۹۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک کاهش داد. مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی در خاک ۳۶ درصد غلظت سرب قابل استخراج خاک را کاهش داد (شکل ۴ الف). کم‌ترین غلظت روی قابل استخراج با مقدار مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی به میزان ۴۴/۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک را دارا بود که نسبت به تیمار شاهد ۴۷ درصد کاهش یافته بود (شکل ۴ ب). غلظت کادمیوم قابل استخراج در تیمار شاهد به میزان ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم خاک بود که با افزایش مقدار مصرف پلی‌مر کاهش یافت و کم‌ترین غلظت کادمیوم قابل استخراج خاک با مقدار مصرف ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی در خاک به میزان



شکل ۴- مقایسه میانگین‌های تأثیر نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب (الف)، روی (ب) و کادمیوم (ج) قابل استخراج خاک
Figure 4- Comparison of the mean effects of type and consumption of acrylic polymers with soil on the concentrations of lead (a), zinc (b) and cadmium (c) absorbable soil

عنصر روی نیز به شکل پلی‌مر غیر یونی > پلی‌مر کاتیونی > پلی‌مر آنیونی بود (جدول ۵). پس از گذشت ۷۲۰ ساعت از تیمار کردن خاک با پلی‌مرها، درصد غیرمتحرک‌سازی پلی‌مر آنیونی برای عنصر روی نسبت به پلی‌مر کاتیونی و غیر یونی به ترتیب ۲۰ و ۲۶ درصد بیش‌تر

با مصرف ۵/۰ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر غیر یونی ۶۳ درصد از سرب افزوده شده تثبیت شد و با افزایش سطح مصرف (۲ گرم بر کیلوگرم) و زمان تماس (۷۲۰ ساعت) میزان تثبیت به ۷۱ درصد رسید (جدول ۴). مشابه با عنصر سرب، روند اثرگذاری پلی‌مرها در غیر متحرک کردن

بود. بیش‌ترین میزان غیر متحرک کردن روی پس از گذشت ۷۲۰ ساعت توسط پلی‌مر آنیونی به میزان ۷۸ درصد نسبت به غلظت اولیه و کم‌ترین مقدار آن به میزان ۶۱ درصد نسبت به غلظت اولیه توسط پلی‌مر غیریونی رخ داد (جدول ۵). روند اثرگذاری نوع پلی‌مر در مورد عنصر کادمیم نیز مشابه با عناصر روی و سرب بود. پلی‌مر آنیونی به‌ترتیب به

میزان ۱۸ و ۲۷ درصد بیشتر از پلی‌مرهای کاتیونی و غیریونی در غیرمتحرک‌سازی کادمیم مؤثر بود. مقدار مصرف ۰/۵، ۱ و ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مرهای اکریلیکی به‌ترتیب باعث کاهش ۸۲، ۸۵ و ۸۷ درصدی غلظت کادمیم قابل استخراج خاک پس از گذشت ۷۲۰ ساعت شدند (جدول ۶).

جدول ۴- مقایسه میانگین‌های اثر متقابل مدت زمان تماس پلی‌مرها با خاک، نوع و مقدار مصرف پلی‌مرهای اکریلیکی بر غلظت سرب قابل استخراج خاک و درصد سرب تثبیت شده

Table 4- Mean comparison of the interaction effects of polymer contact time, polymer type, and application rate on extractable lead concentration and immobilized lead percentage in soil

مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک Duration of polymer contact with soil (hours)	مقدار مصرف پلی‌مر در خاک Amount of polymer consumption in soil (percentage)	غلظت قابل استخراج سرب از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر آنیونی) Concentration of soil Pb-DTPA extractable (anionic polymer)	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر آنیونی Lead stabilized by anionic polymer	غلظت قابل استخراج سرب از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر کاتیونی) Concentration of soil Pb-DTPA extractable (cationic polymer)	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر کاتیونی Lead stabilized by cationic polymer	غلظت قابل استخراج سرب از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر غیریونی) Concentration of soil Pb-DTPA extractable (non-ionic polymer)	درصد سرب تثبیت شده توسط پلی‌مر غیریونی Lead stabilized by non-ionic polymer
0	0	293.7 _s	0 _b	300 _r	0 _b	300 _r	0 _b
	0.5	440 _d	0 _b	576 _a	0 _b	528 _c	0 _b
	1	375.1 _f	0 _b	542.3 _b	0 _b	525.3 _c	0 _b
	2	357.2 _g	0 _b	352.3 _h	0 _b	384.3 _e	0 _b
3	0	303.3 _{pqr}	0 _b	300 _r	0 _b	300 _r	0 _b
	0.5	322.3 _{jk}	0 _b	345.2 _i	0 _b	350.8 _h	0 _b
	1	314.8 _n	0 _b	320.3 _{kl}	0 _b	347 _i	0 _b
	2	305.5 _{opq}	0 _b	313.8 _n	0 _b	343.8 _i	0 _b
9	0	308.7 _o	0 _b	305 _{opq}	0 _b	305 _{opq}	0 _b
	0.5	315 _n	0 _b	319 _{klm}	0 _b	325 _j	0 _b
	1	277 _u	8.15 _y	312.5 _n	0 _b	315 _{mn}	0 _b
	2	251 _{vw}	16.8 _w	253 _v	16.1 _w	314 _n	0 _b
24	0	307 _{op}	0 _b	304 _{pqr}	0 _b	304 _{pqr}	0 _b
	0.5	314 _n	0 _b	316 _{lmn}	0 _b	319 _{klm}	0 _b
	1	178 _a	40.89 _r	277 _u	8 _y	282 _t	6.4 _z
	2	171 _b	43 _{pq}	210 _x	30 _u	248 _w	17.4 _v
72	0	302 _{qr}	0 _b	300 _r	0 _b	300 _r	0 _b
	0.5	274 _u	9.2 _x	282 _t	6.4 _z	294.7 _s	2.3 _a
	1	164 _c	45.56 _o	172 _b	42 _{pq}	180.2 _{az}	40.26 _r
	2	158 _d	47.28 _n	164 _c	45.45 _o	170.80 _b	43.35 _p
168	0	299 _r	0 _b	300 _r	۰ _b	300 _r	0 _b
	0.5	172 _b	42 _q	180.3 _{az}	40 _r	193 _y	35 _t
	1	135 _f	55 _l	163 _c	45 _o	172 _b	42 _{pq}
	2	119 _{hi}	60 _j	120 _h	60 _j	132 _f	56 _k
236	0	303 _{pqr}	0 _b	300 _r	۰ _b	300 _r	0 _b
	0.5	164.2 _c	45.5 _o	171 _b	43.18 _{pq}	183.5 _z	39.1 _s
	1	109.3 _j	63.7 _h	131 _g	56 _k	141.3 _e	53 _m
	2	101 _k	66 _g	116 _i	61 _i	109 _j	63.69 _h
720	0	301 _{qr}	0 _b	300 _r	۰ _b	300 _r	0 _b
	0.5	82 _n	73 _c	104 _k	65 _g	110 _j	63 _h
	1	78 _o	74 _b	90 _m	70 _e	95 _l	68.27 _f
	2	72 _p	76 _a	82 _n	72 _c	87 _m	71 _d

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

In each column, the mean with common letters have no significant difference at the one percent probability level.

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت روی قابل استخراج خاک و درصد روی تثبیت شده
Table 5- Mean comparison of interaction effects of experimental treatments on extractable soil zinc concentration and percent zinc immobilization

مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک Duration of polymer contact with soil (hours)	مقدار مصرف پلیمر در خاک Amount of polymer consumption in soil (percentage)	غلظت قابل استخراج روی از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر آنیونی) Concentration of soil Zn-DTPA extractable (anionic polymer)	درصد روی تثبیت شده توسط پلی‌مر آنیونی Zink stabilized by anionic polymer	غلظت قابل استخراج روی از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر کاتیونی) Concentration of soil Zn-DTPA extractable (cationic polymer)	درصد روی تثبیت شده توسط پلی‌مر کاتیونی Zink stabilized by cationic polymer	غلظت قابل استخراج روی از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر غیر یونی) Concentration of soil Zn-DTPA extractable (non-ionic polymer)	درصد روی تثبیت شده توسط پلی‌مر غیر یونی Zink stabilized by non-ionic polymer
0	0	84 _a	0 _r	84 _a	0 _r	84 _a	0 _r
	0.5	75.2 _g	9.8 _n	78.8 _e	5.0 _p	79.8 _d	4.2 _q
	1	70.2 _{kl}	15.8 _j	72.2 _z	13.0 _i	76.7 _f	7 _o
3	2	68.5 _{mn}	17.0 _i	70.2 _{kl}	15.8 _j	72.3 _i	13 _i
	0	83.3 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r
	0.5	70.8 _{jk}	14.44 _k	74 _h	10 _m	75.7 _g	9.19 _n
9	1	67.3 _o	19 _h	69 _i	16.19 _j	71.3 _j	14.39 _k
	2	62.5 _s	24.99 _d	64 _q	22.19 _f	67.2 _o	19.39 _h
24	0	83.5 _{ab}	0 _r	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r
	0.5	67.2 _o	19.4 _h	68.7 _m	18 _i	74 _h	10.9 _m
	1	64 _r	23 _e	66 _p	21 _g	68 _o	19 _h
72	2	54 _z	35.19 _w	56 _v	32.79 _x	61.3 _t	26.39 _c
	0	82.8 _{ab}	0 _r	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r
	0.5	60.2 _u	27.79 _b	65.8 _p	20.99 _g	67.8 _{no}	18.59 _h
168	1	56.8 _x	31.79 _y	59.2 _v	28.99 _a	61.2 _t	26.59 _c
	2	43.3 _g	47.99 _o	45.2 _f	45.79 _p	48.2 _c	42.18 _s
336	0	82 _c	0 _r	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r
	0.5	56.60 _{xy}	23.19 _{xy}	62.50 _s	24.99 _d	64.70 _{qr}	22.39 _f
	1	53.30 _z	35.99 _v	58.30 _w	29.99 _z	60.20 _u	27.79 _b
720	2	36 _k	57 _k	39 _i	54 _m	41 _h	50 _n
	0	83 _{bc}	0 _r	84 _a	0 _r	84 _a	0 _r
	0.5	48 _{cd}	43 _{rs}	49 _b	41 _t	52 _a	37 _u
336	1	45 _f	46 _p	46 _e	43 _q	47 _{de}	43 _r
	2	33 _m	59 _{gh}	36 _k	56 _{jk}	39 _j	54 _m
720	0	83 _{ab}	0 _r	83 _a	0 _r	84 _a	0 _r
	0.5	47.7 _{cd}	42.0 _{rs}	49.0 _b	41.0 _t	53.5 _z	35.0 _{vw}
	1	45.3 _f	45.6 _p	46.0 _e	43.0 _q	45.2 _f	45.8 _p
720	2	34.0 _m	59.2 _h	35.7 _{kl}	57 _{ij}	38 _i	53 _m
	0	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r	83.5 _a	0 _r
	0.5	26.7 _p	68.0 _c	33.3 _m	60.0 _g	37.0 _j	55.2 _l
	1	25.3 _q	69.6 _b	31.7 _n	61.9 _e	35.3 _i	57.7 _i
	2	23.0 _r	71.6 _a	29.8 _o	64.0 _d	32.3 _n	61.2 _f

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

In each column, the mean with common letters have no significant difference at the one percent probability level.

باشد، ولی افزایش اندک کادمیم قابل دسترس را می‌توان به حضور یون های رقیب سرب و روی نسبت داد. علاوه بر این، کادمیم سریع‌تر از روی، جذب سطحی شده و به تعادل می‌رسد در صورتی‌که روی برای رسیدن به تعادل به زمان بیشتری نیاز دارد (Chen *et al.*, 2012) مطالعات تامسون و جاروینن (Thompson & Jarvinen, 1999) نشان داد که استفاده از پلی‌مرهای پلی‌آکریلات در خاک معدن به شدت آلوده به سرب باعث بهبود کیفیت خاک و رشد گیاهان شد. آنها این امر را ناشی از کاهش میزان قابل دسترس بودن سرب در خاک اصلاح شده دانستند. پلی‌مرها با خاکدانه‌سازی و ایجاد پوشش بر سطح خاکدانه‌ها از سطح تماس ذرات رس با محلول خاک کاسته و با کاهش فرآیند تبادل کاتیونی بین ذرات و محلول خاک از قابلیت جذب آنها توسط گیاه می‌کاهند.

برخلاف دو عنصر روی و سرب، بزرگترین درصد تثبیت کادمیم در پلی‌مر آنیونی در زمان ۳۳۶ ساعت به دست آمده و در زمان‌های بعدی، کاهش یافته است، فرآیند واجذب یکی از عواملی است که می‌تواند به کاهش میزان کادمیم غیر متحرک شده با زمان کمک کند. در این فرآیند، کادمیمی که قبلاً غیر متحرک شده یا به ماتریس جذبی چسبیده است، متحرک و آزاد شده و وارد آب خاک می‌شود. این فرآیند زمانی اتفاق می‌افتد که مکان‌های جذبی در جاذب اشباع شده باشد. عواملی مثل تغییرات pH، شرایط اکسید و احیا یا وجود یون‌های رقیب بر این فرآیند تأثیر می‌گذارند. بنظر می‌رسد رقابت یون‌های روی و سرب که به مراتب غلظت بیشتری نسبت به کادمیم دارند با جابجا کردن یون کادمیم از سطح ماتریس جذبی خود بر سطح جاذب قرار می‌گیرند. اگر چه تغییرات کادمیم غیر متحرک شده با زمان بسیار کم و ناچیز می

جدول ۶- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل تیمارهای آزمایشی بر غلظت کادمیم قابل استخراج خاک و درصد کادمیم تثبیت شده

Table 6- Comparison of the means of the interaction effects of experimental treatments on the concentration of extractable cadmium in soil and the percentage of immobilized cadmium

مدت زمان تماس پلی‌مر با خاک Duration of polymer contact with soil (hours)	مقدار مصرف پلی‌مر در خاک Amount of polymer consumption in soil (percentage)	غلظت قابل استخراج کادمیم از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر آنیونی) Concentration of soil Cd-DTPA extractable (anionic polymer)	درصد کادمیم تثبیت شده توسط پلی‌مر آنیونی Cadmium stabilized by anionic polymer	غلظت قابل استخراج کادمیم از خاک توسط عصارگیر DTPA (کاتیونی) Concentration of soil Cd-DTPA extractable (cationic polymer)	درصد کادمیم تثبیت شده توسط پلی‌مر کاتیونی Cadmium stabilized by cationic polymer	غلظت قابل استخراج کادمیم از خاک توسط عصارگیر DTPA (پلیمر غیر یونی) Concentration of soil Cd-DTPA extractable (non-ionic polymer)	درصد کادمیم تثبیت شده توسط پلی‌مر غیر یونی Cadmium stabilized by non-ionic polymer
0	0	4.05 _{ab}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	2.73 _f	31.92 _j	2.86 _e	28.68 _k	2.96 _d	26.27 _i
	1	2.14 _d	46.71 _g	2.32 _h	42.14 _h	2.63 _g	34.33 _i
	2	1.47 _m	63.34 _b	1.66 _k	58.68 _e	1.84 _j	54.19 _f
3	0	4 _{bc}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	1.41 _n	64.80 _a	1.52 _l	62.01 _c	1.63 _k	59.43 _d
	1	1.11 _{rs}	72.32 _u	1.24 _p	69.08 _v	1.34 _o	66.5 _z
	2	1.02 _{tu}	74.64 _s	1.14 _r	71.49 _v	1.21 _{pq}	69.83 _{wx}
9	0	4 _{abc}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	1.34 _o	66.00 _z	1.40 _h	65.01 _a	1.51 _l	62.34 _c
	1	1.00 _{uv}	75.00 _{rs}	1.05 _t	74.00 _t	1.19 _q	70.24 _w
	2	0.97 _{vwx}	75.89 _{opq}	1.01 _u	74.90 _{rs}	1.11 _{rs}	72.32 _u
24	0	4 _a	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	1.02 _{tu}	74.64 _s	1.11 _{rs}	72.32 _u	1.23 _p	69.3 _{xy}
	1	0.95 _{wxy}	76.2 _{op}	1.02 _{tu}	74.60 _s	1.14 _{rs}	71.00 _v
	2	0.87 _{bc}	78.22 _j	0.91 _{az}	77.31 _m	1.02 _{tu}	74.5 _s
72	0	4.04 _{abc}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	0.94 _{xyz}	76.00 _{no}	0.99 _{uvw}	75.39 _{qr}	1.10 _s	72.49 _u
	1	0.9 _{ab}	77.48 _m	0.95 _{wxy}	76.23 _{op}	1.01 _{tu}	74.8 _{rs}
	2	0.84 _{cde}	78.97 _{ijk}	0.91 _{ab}	77.39 _m	0.95 _{wxy}	76.20 _{op}
168	0	4 _{ab}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	0.83 _{de}	79.2 _{ij}	0.96 _{wxy}	76.10 _{ap}	1.01 _{tu}	74.34 _s
	1	0.75 _{fg}	81 _{gh}	0.84 _{cde}	78.96 _{ijk}	0.92 _{ayz}	76.97 _{mn}
	2	0.65 _i	83.7 _{cd}	0.72 _h	82.1 _e	0.85 _{cde}	78.8 _{ijkl}
336	0	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	0.72 _{gh}	82.00 _{ef}	0.85 _{cde}	78.70 _{ijkl}	0.96 _{wx}	75.90 _{opq}
	1	0.64 _i	85 _c	0.75 _{fg}	81 _{gh}	0.82 _e	79.55 _i
	2	0.51 _k	88 _a	0.64 _i	84 _c	0.76 _{fg}	81.13 _h
720	0	4 _{abc}	0 _m	4 _c	0 _m	4 _c	0 _m
	0.5	0.72 _{fgh}	81.79 _{efg}	0.86 _{cd}	78.55 _{kl}	0.97 _{vwx}	75.81 _{pq}
	1	0.64 _i	83.70 _{cd}	0.75 _{fgh}	81.38 _{fgh}	0.86 _{cd}	78.70 _{kl}
	2	0.56 _j	86.11 _b	0.67 _i	83.29 _d	0.76 _f	80.96 _h

در هر ستون میانگین‌های با حروف مشترک فاقد اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد می‌باشند.

In each column, the mean with common letters have no significant difference at the one percent probability level

نتیجه‌گیری

روی (۶۴ درصد) و کادمیم (۸۸ درصد) در سطح ۲ گرم بر کیلوگرم پلی‌مر آنیونی و پس از گذشت زمان تماس ۷۲۰ ساعت به‌دست آمد. بنابراین به‌طور کلی به‌نظر می‌رسد که استفاده از پلی‌مرهای آنیونی در خاک آلوده می‌تواند باعث افزایش تثبیت این فلزات در خاک شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی تأثیر این کوپلی‌مرهای اکریلیکی بر تثبیت سایر فلزات سنگین مانند آرسنیک مورد مطالعه قرار گیرد.

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد با افزایش میزان مصرف و مدت زمان تماس پلی‌مرها در خاک، میزان تحرک فلزات سنگین سرب، روی و کادمیم در خاک کاهش یافت و یا به عبارت دیگر میزان تثبیت این فلزات در خاک افزایش یافت. اثرگذاری پلی‌مر آنیونی در غیر متحرک‌سازی عناصر سرب، روی و کادمیم در خاک بیش‌تر از پلی‌مرهای کاتیونی و غیر یونی بود. بیشترین مقدار تثبیت سرب (۷۶ درصد)،

References

- Al-Khashman, O.A. (2007). The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba city, Jordan. *Environmental Geochemistry and Health*, 29, 197-207. <https://doi.org/10.1007/s10653-006-9065-x>

2. Aram, H., & Golchin, A. (2015). The effect of different levels of water-soluble polymer and mycorrhizal fungi on cadmium of berseem clover. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 5(1), 253-262. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.23221267.1394.5.1.17.8>
3. Boisson, J., Mench, M., Vangronsveld, J., Ruttens, A., Kopponen, P., & De Koe, T. (1999). Immobilization of trace metals and arsenic by different soil additives: evaluation by means of chemical extractions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(3-4), 365-387. <https://doi.org/10.1080/00103629909370210>
4. Bremner, J.M. (1996). N-total. *Methods of Soil Analysis, part 3*, 1085-1121.
5. CCME. (2010). Canadian Council of Ministers of the Environment.
6. Chen, S., Chao, L., Sun, L.N., & Sun, T.H. (2012). Competition absorption and desorption dynamic character of cadmium, lead and zinc by soil in north-east of China. *Advanced Materials Research*, 356, 52-58.
7. Cherfi, A., Abdoun, S., & Gaci, O. (2014). Food survey: levels and potential health risks of chromium, lead, zinc and copper content in fruits and vegetables consumed in Algeria. *Food and Chemical Toxicology*, 70, 48-53. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.04.044>
8. Cornforth, I.S. (1968). Relationships between soil volume used by roots and nutrient accessibility. *Journal of Soil Science*, 19(2), 291-301.
9. Dhiman, J., Prasher, S. O., ElSayed, E., Patel, R., Nzediegwu, C., & Mawof, A. (2020). Use of polyacrylamide superabsorbent polymers and plantain peel biochar to reduce heavy metal mobility and uptake by wastewater-irrigated potato plants. *Transactions of the ASABE*, 63(1), 11-28.
10. Hamidpour, M., Akbari, L., & Shirani, H. (2017). Effects of co-application of zeolites and vermicompost on speciation and phytoavailability of cadmium, lead, and zinc in a contaminated soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 48(3), 262-273.
11. Farfel, M.R., Orlova, A.O., Chaney, R.L., Lees, P.S., Rohde, C., & Ashley, P.J. (2005). Biosolids compost amendment for reducing soil lead hazards: a pilot study of Orgro® amendment and grass seeding in urban yards. *Science of the Total Environment*, 340(1-3), 81-95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.08.018>
12. Friesl, W., Lombi, E., Horak, O., & Wenzel, W.W. (2003). Immobilization of heavy metals in soils using inorganic amendments in a greenhouse study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 166(2), 191-196.
13. Gee, G.W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 383-411.
14. Geebelen, W., Vangronsveld, J., Adriano, D.C., Carleer, R., & Clijsters, H. (2002). Amendment-induced immobilization of lead in a lead-spiked soil: evidence from phytotoxicity studies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 140, 261-277. <https://doi.org/10.1023/A:1020147901365>
15. Guiwei, Q., De Varennes, A., & Cunha-Queda, C. (2008). Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth. *Soil Use and Management*, 24(4), 350-356. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00173.x>
16. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 551-574. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c19>
17. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421-428.
18. Mansouri, T. (2017). Reduction of arsenic mobilization in soil by application of hematite nanoparticles and acrylic polymers. *Journal of Water and Soil Conservation*, 23(6), 79-99. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/JWFST.2017.10254.2473>
19. Mench, M., Manceau, A., Vangronsveld, J., Clijsters, H., & Mocoquot, B. (2000). Capacity of soil amendments in lowering the phytoavailability of sludge-borne zinc. *Agronomie*, 20(4), 383-397.
20. Miretzky, P., & Cirelli, A.F. (2010). Remediation of arsenic-contaminated soils by iron amendments: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40(2), 93-115. <https://doi.org/10.1080/10643380802202059>
21. Mulligan, C.N., Yong, R.N., & Gibbs, B.F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60(1-4), 193-207.
22. Nelson, D.A., & Sommers, L. (1983). Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of Soil Analysis: Part 2 Chemical and Microbiological Properties*, 9, 539-579.
23. Park, J.H., Bolan, N.S., Chung, J.W., Naidu, R., & Megharaj, M. (2011). Environmental monitoring of the role of phosphate compounds in enhancing immobilization and reducing bioavailability of lead in contaminated soils. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(8), 2234-2242.
24. Sparks, D.L. (2003). Environmental soil chemistry: An overview. *Environmental Soil Chemistry*, 2, 1-42.
25. Sumner, M.E., & Miller, W.P. (1996). Cation exchange capacity and exchange coefficients. *Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical Methods*, 5, 1201-1229.
26. Thompson, J.A., & Jarvinen, G. (1999). Using water-soluble polymers to remove dissolved metal ions. *Filtration & Separation*, 36(5), 28-32.
27. Varennes, A., Cunha-Queda, C., & Ramos, A.R. (2009). Polyacrylate polymers as immobilizing agents to aid

- phytostabilization of two mine soils. *Soil Use and Management*, 25(2), 133-140. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00208.x>
28. Varennes, A., Goss, M.J., & Mourato, M. (2006). Remediation of a sandy soil contaminated with cadmium, nickel, and zinc using an insoluble polyacrylate polymer. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(11-12), 1639-1649. <https://doi.org/10.1080/00103620600710264>
29. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38.
30. Xiang, Y., Li, C., Hao, H., Tong, Y., Chen, W., Zhao, G., & Liu, Y. (2021). Performances of biodegradable polymer composites with functions of nutrient slow-release and water retention in simulating heavy metal contaminated soil: Biodegradability and nutrient release characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126278.

Research Article

Vol. 38, No. 2, May-June 2024, p. 269-283

Modeling Soil Penetration Resistance Using Regression, Artificial Neural Network and Gene Expression Programming

Sh. Asghari^{1*}, M. Hasanpour Kashani², H. Shahab Arkhazloo³

1 and 3- Professor and Associate Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: shasghari@uma.ac.ir)

2- Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 12-02-2024
Revised: 05-03-2024
Accepted: 19-03-2024
Available Online: 19-03-2024

How to cite this article:

Asghari, Sh., Hasanpour Kashani, M., & Shahab Arkhazloo, H. (2024). Modeling soil penetration resistance using regression, artificial neural network and gene expression programming. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 269-283. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2024.86792.1385>

Introduction

The penetration resistance (PR) of the soil shows the mechanical resistance of the soil against the penetration of a conical or flat probe; it is important in terms of seed germination, root growth and tillage operations. In general, if the PR value of a soil exceeds 2.5 MPa, the growth and expansion of roots in the soil will be significantly limited. The direct measurement of PR is also a laborious and costly task due to instrumental errors. Therefore, it is useful the use of different models such as multiple linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and gene expression programming (GEP) to estimate PR through easily accessible and low-cost soil characteristics. The objectives of this research were: (1) to obtain MLR, ANN and GEP models for estimating PR from the easily accessible soil variables in forest, range and cultivated lands of Fandoghloo region of Ardabil province, (2) to compare the accuracy of the aforementioned models in estimating soil PR using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) criteria.

Materials and Methods

Disturbed and undisturbed samples ($n = 80$) were nearly systematically taken from 0-10 cm soil depth with nearly 50 m distance in forest ($n = 20$), range ($n = 23$) and cultivated ($n = 37$) lands of Fandoghloo region of Ardabil province, Iran (lat. $38^\circ 24' 10''$ to $38^\circ 24' 25''$ N, long. $48^\circ 32' 45''$ to $48^\circ 33' 5''$ E) in summer 2023. The contents of sand, silt, clay, CaCO_3 , pH, EC, bulk (BD) and particle density (PD), organic carbon (OC), gravimetric field water content (FWC), mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) were measured in the laboratory. Relative bulk density (BDrel) was calculated using BD and clay data. Mean geometric diameter (d_g) and geometric standard deviation (σ_g) of soil particles were computed by sand, silt and clay percentages. The penetration resistance (PR) of the soil was measured in situ using cone penetrometer (analog model) at 5 replicates. Data randomly were divided in two series as 60 data for training and 20 data for testing of models. The SPSS 22 software with stepwise method, MATLAB and Gene Xpro Tools 4.0 software were used to derive multiple linear regression (MLR), artificial neural network (ANN) and gene expression programming (GEP) models, respectively. A feed forward three-layer (2, 5 and 6 neurons in hidden layer) perceptron network and the tangent sigmoid transfer function were used for the ANN modeling. A set of optimal parameters were chosen before developing a best GEP model. The number of chromosomes and genes, head size and linking function were selected by the trial and error



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/JSW.2024.86792.1385>

method, as they are 30, 3, 8, and +, respectively. The rates of genetic operators were chosen according to literature studies. The accuracy of MLR, ANN and GEP models in estimating PR were evaluated by coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean error (ME) and Nash-Sutcliffe coefficient (NS) statistics.

Results and Discussion

The studied soils had clay loam ($n = 11$), sandy clay loam ($n = 6$), sandy loam ($n = 12$), loam ($n = 13$), silty clay loam ($n = 14$), silty clay ($n = 1$) and silt loam ($n = 23$) textural classes. The values of sand (13.14 to 64.79 %), silt (21.11 to 74.96 %), clay (2.95 to 42.18 %), OC (1.01 to 7.17 %), FWC (11.58 to 50.47 mass percent), BD (0.84 to 1.43 g cm⁻³) and PR (1.03 to 5.83 MPa) showed good variations in the soils of the studied region. There were found significant correlations between PR with FWC ($r = -0.45^{**}$), silt ($r = -0.36^{**}$) and σ_g ($r = 0.36^{**}$). Due to the multicollinearity of silt with σ_g ($r = -0.84^{**}$), the σ_g was not used as an input variable to estimate PR. Generally, 3 MLR, ANN and GEP models were constructed to estimate PR from measured readily available soil variables. The results of MLR, ANN and GEP models showed that the most suitable variables to estimate PR were FWC, silt and BDrel. The values of R^2 , RMSE, ME and NS criteria were obtained equal 0.44, 1.19 MPa, 0.19 MPa and 0.36, and 0.92, 0.41 MPa, -0.05 MPa and 0.92, 0.79, 0.91 MPa, 0.13 MPa, 0.63 for the best MLR, ANN and GEP models, respectively. The former researchers also reported that there is a negative and significant correlation between PR with FWC.

Conclusion

The results indicated that field water content (FWC), silt and relative bulk density (BDrel) were the most important and readily available soil variables to estimate penetration resistance (PR) in the studied area. According to the lowest values of RMSE and the highest values of NS, the accuracy of ANN models to predict soil PR was higher than MLR and GEP models in this research.

Keywords: Estimation, Fandoghloo region, Gravitational water content, Readily variables, Soil resistance

مقاله پژوهشی

جلد ۳۸، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۳، ص. ۲۸۳-۲۶۹

مدل سازی مقاومت فروروی خاک با استفاده از رگرسیون، شبکه عصبی مصنوعی و برنامه ریزی بیان ژن

شکراه اصغری^{۱*} - مهسا حسنیور کاشانی^۲ - حسین شهاب آرخالو^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۹

چکیده

اطلاع از مقاومت فروروی (PR) خاک از نظر جوانه زنی، بذریه و عملیات خاک ورزی اهمیت فراوان دارد. اندازه گیری مستقیم PR خاک به دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی شدید آن، کاری پرهزینه و گران می باشد. هدف از این پژوهش، ارائه مدل های رگرسیون خطی (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد PR از روی ویژگی های زود یافت خاک بود. در مجموع ۸۰ نمونه خاک سطحی (۰ تا ۱۰ cm) دست خورده و دست نخورده (با استفاده از استوانه های استیل به قطر و ارتفاع ۵ سانتی متر) از اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل در تابستان ۱۴۰۲ برداشته شد سپس برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی زود یافت خاک در آنها اندازه گیری شد. مقاومت فروروی خاک به طور درجا در محل با استفاده از یک فروسنج مخروطی تعیین گردید و همزمان رطوبت خاک مزرعه در استوانه ها اندازه گیری شد. داده ها به طور تصادفی به دو گروه آموزشی (۶۰ نمونه) و آزمونی (۲۰ نمونه) تقسیم گردید. مدل های MLR، ANN و GEP به ترتیب با استفاده از نرم افزارهای SPSS، MATLAB و Gene Xpro Tools ایجاد شدند. نتایج مدل سازی نشان داد که رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی، مهمترین متغیرهای ورودی در برآورد PR خاک بودند. مقادیر آماره های ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) براساس داده های آزمونی برابر 0.44 ، 0.19 MPa، 0.36 و 0.05 MPa، 0.41 MPa، 0.79 و 0.92 و 0.91 MPa، 0.13 MPa و 0.63 به ترتیب برای بهترین مدل MLR، ANN و GEP تعیین گردید. براساس نتایج آماره های ارزیابی مدل ها، می توان گفت که در منطقه مورد مطالعه، مدل ANN از بیشترین دقت و مدل MLR از کمترین دقت در برآورد PR خاک برخوردار بود.

واژه های کلیدی: تخمین، رطوبت جرمی، مقاومت خاک، منطقه فندقلو، ویژگی زود یافت

مقدمه

مقاومت فروروی^۴ (PR) خاک که مقاومت مکانیکی خاک را در برابر نفوذ یک فروسنج مخروطی یا مسطح نشان می دهد، از نظر جوانه زنی، رشد ریشه و عملیات خاک ورزی حائز اهمیت است. به طور کلی، اگر مقدار PR یک خاک از $2/5$ مگاپاسکال فراتر رود رشد و

گسترش ریشه در خاک به طور معنی دار محدود خواهد شد (Whalley *et al.*, 2007).

مقاومت فروروی (PR) خاک با تغییر سایر ویژگی های خاک مانند کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک مزرعه، با زمان و مکان تغییر پیدا می کند. به طور مثال، اصغری و همکاران (Asghari *et al.*, 2017) گزارش کردند ضریب تغییرات (CV) مقاومت فروروی

۱ و ۳- به ترتیب استاد و دانشیار، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
(Email: shasghari@uma.ac.ir) * نویسنده مسئول

۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

برآورد هدایت هیدرولیکی نزدیک اشباع خاک در دشت مغان استان اردبیل برخوردار بود. نتایج پژوهش احمدزاده کلپور و فولادپناه (Ahmadzadeh Kaleibar & Fuladipناه, 2023) در دشت ارسباران واقع در شمال غرب ایران نیز نشان داد که مدل GEP در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی از دقت بالاتری در برآورد رطوبت‌های ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم برخوردار بود. زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) گزارش کردند که مدل GEP توانست ضریب نفوذپذیری خاک را از روی برخی ویژگی‌های خاک مانند نسبت پوکی، اندازه مؤثر و میانگین اندازه ذره با دقت بالاتری (R^2 برابر با ۰/۹۴ و RMSE برابر با ۰/۰۰۴۸) نسبت به سایر مدل‌های هوشمند و روابط ریاضی تخمین بزند.

اگرچه مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) مختلفی برای برآورد PR خاک در نقاط مختلف دنیا ارائه گردیده است ولی کاربرد عملی این مدل‌ها در خاک‌های سایر مناطق جهان با شرایط اقلیمی متنوع، همواره توسط محققان با شک و تردید همراه بوده است. از سوی دیگر، تحقیقات انجام گرفته در زمینه استفاده از مدل برنامه ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد PR خاک انگشت‌شمار است. بررسی منابع نشان داد که تاکنون تحقیقی در زمینه برآورد PR توسط مدل‌های هوشمند مانند ANN و GEP و مقایسه آن با مدل‌های رگرسیونی در جنگل‌های فندقلوی اردبیل اجرا نگردیده است لذا موضوع پژوهش حاضر از این نظر دارای نوآوری است. با توجه به اینکه منطقه فندقلوی استان اردبیل از مناطق گردشگری مهم و پرتردد کشور به‌ویژه در فصل تابستان محسوب می‌شود و تغییر کاربری اراضی جنگلی و مرتعی به زراعی نیز در آن با شدت زیاد در حال وقوع است لذا ارائه مدل‌های هوشمند برای اطلاع از وضعیت فیزیکی و مکانیکی خاک‌های منطقه مذکور حائز اهمیت فراوان است. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارت بودند از (۱) ارائه مدل‌های MLR، ANN و GEP برای برآورد PR از روی متغیرهای زودیافت در خاک‌های جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی استان اردبیل (۲) مقایسه دقت مدل‌های مذکور در برآورد PR خاک با استفاده از معیارهای R^2 ، RMSE، میانگین خطا $(ME)^2$ و ضریب نش-ساتکلیف $(NS)^3$ بود.

مواد و روش‌ها

خاک‌های مورد مطالعه، در اراضی منطقه گردشگری فندقلو واقع در شرق استان اردبیل (مختصات جغرافیایی $38^{\circ} 33' 45''$ تا $38^{\circ} 33' 5''$ و 48° طول شرقی و $38^{\circ} 34' 10''$ تا $38^{\circ} 34' 25''$ عرض شمالی) قرار

در ۱۰۵ نمونه خاک برداشته شده (با فواصل ۳۰۰ متر) از اراضی زراعی دشت اردبیل (24×42 km) حدود ۵۰ درصد تعیین گردید و دامنه تغییرات کربن آلی از ۰/۳ تا ۲/۴ درصد، جرم مخصوص ظاهری از ۱/۰۲ تا ۱/۶۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و PR از ۱/۱ تا ۶/۶ مگاپاسکال به دست آمد. همچنین اصغری و شهابی (Asghari & Shahabi, 2019) مقادیر CV را برای مقاومت فروروی خاک در اراضی زراعی و بایر بخش شندآباد منطقه شبستر (2000×400 m) حدود ۴۶ درصد گزارش نمودند. از سوی دیگر، اندازه‌گیری مستقیم PR نیز به دلیل خطاهای ابزاری، کاری طاقت‌فرسا و پرهزینه است؛ بنابراین استفاده از مدل‌های مختلف مانند رگرسیون خطی چندگانه^۱ (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی^۲ (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن^۳ (GEP) برای برآورد PR از طریق ویژگی‌های سهل‌الوصول و کم‌هزینه خاک می‌تواند در این زمینه راهگشا باشد.

نتایج پژوهش بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) نشان داد که در برآورد PR از روی تخلخل کل، درجه اشباع نسبی و رطوبت خاک مزرعه، مدل ANN در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی از دقت بالاتری برخوردار بود. واز و همکاران (Vaz et al., 2011) گزارش کردند که رطوبت خاک، مهمترین ویژگی تأثیرگذار بر مقاومت فروروی خاک می‌باشد. سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011) از جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک مزرعه برای برآورد PR خاک در مدل‌های رگرسیونی و ANN استفاده کردند. آنها بیان کردند که PR با جرم مخصوص ظاهری رابطه مستقیم و با رطوبت خاک مزرعه رابطه معکوس دارد. شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) گزارش کردند که در برآورد PR خاک، مقادیر ضریب تبیین $(R^2)^4$ و مجذور میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) به ترتیب در مدل ANN برابر با ۰/۹۱ و ۰/۳۷ MPa و در مدل MLR برابر با ۰/۵۵ و ۰/۸۹ MPa به دست آمد بنابراین مدل ANN نسبت به مدل MLR دارای دقت بالاتری بود؛ همچنین رطوبت خاک مزرعه، جرم مخصوص ظاهری و توزیع اندازه ذرات خاک، مهمترین متغیرهای ورودی در برآورد PR خاک تشخیص داده شد. اخیراً از سایر روش‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک و مدل GEP در برآورد ویژگی‌های دیریافت خاک استفاده گردیده است؛ احمدی و همکاران (Ahmadi et al., 2016) گزارش کردند که در برآورد هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در دشت تبریز، مدل GEP نسبت به مدل رگرسیون راجع به علت داشتن R^2 بالا و RMSE پایین دارای دقت بالاتری بود. آزاد مرد و همکاران (Azadmard et al., 2019) بیان کردند مدل ترکیبی ANN با الگوریتم ژنتیک در مقایسه با مدل MLR از دقت به مراتب بالاتری در

5- Root mean square error

6- Mean error

7- Nash-Sutcliffe coefficient

1- Multiple linear regression

2- Artificial neural network

3- Gene expression programming

4- Determination coefficient

دارد که فاصله آن از مرکز استان اردبیل در حدود ۳۰ کیلومتر می‌باشد. تعداد ۸۰ نمونه خاک دست‌خورده (با حداقل دست‌خوردگی) و دست نخورده (با استفاده از استوانه‌های استیل به قطر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر) از محدوده عمق ۰ تا ۱۰ سانتی‌متر اراضی شیبدار و تپه‌ای با کاربری جنگلی (۲۰ نمونه)، مرتعی (۲۳ نمونه) و زراعی (۳۷ نمونه) به هم چسپیده به فواصل حدود ۵۰ متر و به طور تصادفی-منظم در تابستان ۱۴۰۲ برداشته شد. موقعیت هر یک از نقاط نمونه‌برداری شده با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) ثبت گردید (شکل ۱).

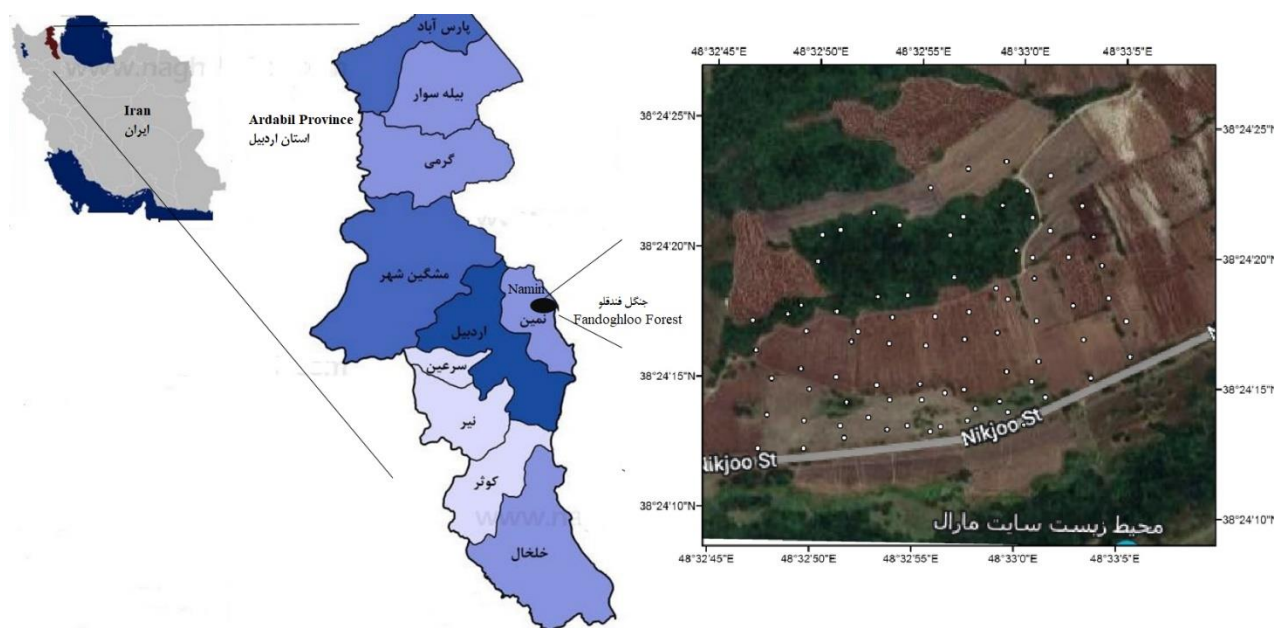
پس از هواخشک کردن نمونه‌های خاک، بخشی از آن‌ها برای تعیین پایداری خاکدانه‌ها جدا گردیده و بخش دیگر برای تعیین سایر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی از الک ۲ mm گذرانده شد. توزیع اندازه ذرات شن، سیلت و رس و کلاس بافت خاک به روش هیدرومتری ۴ قراته (Gee & Or, 2002) تعیین و پارامترهای میانگین هندسی قطر (d_g) و انحراف استاندارد هندسی (σ_g) ذرات خاک از روی درصدهای شن، سیلت و رس محاسبه گردید (Campbell, 1985). کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson & Sommers, 1982)، اسیدیته (pH) و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره ۱ به ۲/۵ خاک به آب و آهک به روش تیتراسیون با اسید و سود (Page, 1985) تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری (BD) در استوانه‌های استیل (Blake & Hartge, 1986a) و جرم مخصوص حقیقی (PD) به روش پیکنومتر (Blake & Hartge, 1986b) اندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری نسبی (BDrel) از روی داده‌های جرم مخصوص ظاهری و درصد رس محاسبه گردید (Kelishadi et al., 2014). میانگین وزنی قطر 2 (MWD) و میانگین هندسی قطر 3 (GMD) خاکدانه‌ها به روش الک خشک در ۵۰ گرم خاک هواخشک گذرانده شده از الک ۴/۷۵ میلی‌متر با استفاده از دستگاه شیکر الک با به‌کارگیری الک‌های با قطر سوراخ به‌ترتیب از بالا به پایین ۱، ۰/۵، ۰/۲۵ و ۰/۱۰۶ میلی‌متر اندازه‌گیری و محاسبه گردید (Yoder, 1936). مقاومت فروروی (PR) خاک به‌طور مستقیم در مزرعه با استفاده از دستگاه فروسج مخروطی مدل عقربه‌ای ساخت شرکت اکل کمپ کشور هلند در ۵ تکرار اندازه‌گیری شد (Lowery & Morrison, 2002) و همزمان رطوبت خاک مزرعه در حین اندازه‌گیری PR، با استفاده از استوانه‌های خاک برداشته شده برای اندازه‌گیری BD پس از آون خشک کردن در دمای ۱۰۵ °C به روش وزنی تعیین گردید (Gardner, 1986).

نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بررسی گردید سپس محاسبات مربوط به آمار توصیفی و ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرها و نیز اشتقاق مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) بین متغیرهای زودیاقت خاک با متغیر دیریاقت (PR) به روش

گام به گام در نرم‌افزار SPSS 22 انجام شد. مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با استفاده از نرم‌افزار MATLAB ایجاد گردید. در این پژوهش شبکه پرسپترون سه لایه شامل یک لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی با الگوریتم پس انتشار خطا و ۱۰۰۰ تکرار برای رسیدن به حداقل خطا و حداکثر پایداری شبکه به کار گرفته شد و تعداد نرون‌های مناسب به روش سعی و خطا در لایه پنهان برای سه مدل شبکه عصبی به‌ترتیب برابر ۵، ۶ و ۲ انتخاب گردید. نرون‌های پنهان داخل شبکه پرسپترون چند لایه، در هر لایه به نرون‌های لایه بعد متصل هستند. به‌منظور تجزیه و تحلیل ویژگی‌ها در داده‌های ورودی، توابع فعال‌سازی تانژانت سیگموئید و خطی به‌ترتیب در لایه‌های پنهان و خروجی هر سه مدل به کار برده شد (Ghorbani et al., 2019). به‌منظور آموزش شبکه با دقت بالا از الگوریتم آموزشی مارکوآرت-لونبرگ استفاده گردید.

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) توسط فریرا (Ferreira, 2001) پیشنهاد شد. این روش یک الگوریتم توسعه‌یافته براساس برنامه‌ریزی ژنتیک و الگوریتم ژنتیک می‌باشد و مبنای تمامی آنها براساس نظریه تکامل داروین استوار است که در آن کروموزوم‌های خطی و ساده با طول ثابت مشابه آنچه در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود و ساختارهای شاخه‌ای با اندازه‌ها و اشکال متفاوت مشابه با برنامه‌ریزی ژنتیک ترکیب می‌شوند. برای مطالعه بیشتر در زمینه جزئیات مدل GEP می‌توان به مقاله زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) مراجعه نمود. در این تحقیق برای مدل‌سازی مقاومت فروروی (PR) خاک براساس برنامه ریزی بیان ژن (GEP) از نرم‌افزار Gene Xpro Tools 4.0 استفاده شد. برای این منظور از مجموعه عملگرهای ریاضی شامل چهار عمل اصلی (+، -، × و /)، جذر، اکسپونشیال، لگاریتم طبیعی، توان ۲ و ۳ و ریشه سوم استفاده شد. همچنین پارامترهای لازم برای مدل‌سازی GEP در جدول ۱ آورده شده است.

در همه مدل‌های به کار رفته در تحقیق حاضر از مجموع ۸۰ داده برای هر متغیر، بعد از تصادفی کردن کل داده‌ها در نرم‌افزار اکسل، ۶۰ داده برای آموزش مدل و ۲۰ داده برای آزمون مدل در نظر گرفته شد. برای ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های ANN، MLR و GEP در برآورد PR، از محک‌های آماری ضریب تبیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) (Ghorbani et al., 2019) استفاده شد. مقادیر بالای R^2 (نزدیک به ۱) بیانگر دقت بالای برآورد می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و نقشه توزیع نقاط نمونه برداری در تصویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Geographic position and distribution map of sampled points in satellite image of the studied area

جدول ۱- مقادیر پارامترهای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

Table 1- The values of GEP model parameters

مقادیر Values	عوامل ژنتیک Genetic factors	مقادیر Values	تنظیمات عمومی General adjustment
0.044	Mutation rate نرخ جهش	30	تعداد کروموزمها Number of chromosome
0.1	Inversion rate نرخ وارون سازی	8	اندازه سر Head size
0.3	One point recombination rate نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	3	تعداد ژن‌ها Number of genes
0.3	Two point recombination rate نرخ ترکیب دو نقطه‌ای	جمع (+)	تابع پیوند Linking function
0.1	Gene recombination rate نرخ ترکیب ژن	RMSE	معیار خطای تابع Fitness function error type

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{i(p)} - Y_{i(m)}}{n} \quad (2)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i(m)} - \bar{Y}_m)^2} \quad (3)$$

در معادله‌های ۱، ۲ و ۳، $Y_{i(p)}$ ، $Y_{i(m)}$ و $\bar{Y}_m$ به ترتیب مقادیر اندازه گیری، برآورد شده و میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده PR توسط مدل و تعداد داده‌ها برای PR در هر مدل می‌باشد. از میان مدل‌های ایجاد شده برای برآورد PR، مناسب‌ترین مدل ANN، MLR و GEP با ترکیب متغیرهای ورودی در داده‌های آزمونی براساس محک‌های آماری مذکور تعیین گردید. آزمون مدل‌ها در تشخیص دقت مدل به ازای داده‌هایی که در آموزش مدل استفاده نشده‌اند به کار می‌رود.

از لحاظ آماری کمترین مقدار RMSE، صفر می‌باشد که در آن وضعیت، مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR باهم برابر هستند؛ هرچه مقدار RMSE کوچکتر باشد برآوردهای انجام شده توسط مدل برآورد کننده دقیق‌تر است. مقادیر مثبت ME بیش‌برآوردی و مقادیر منفی آن کم‌برآوردی مدل را نشان می‌دهد. اگر ضریب NS برابر یک باشد بیانگر آن است که مدل‌سازی با دقت بالایی انجام گرفته و مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR در تطابق کامل هستند. مقدار برابر با صفر NS نشان‌دهنده آن است که برآوردهای مدل، دقتی برابر با دقت میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده دارند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{n}} \quad (1)$$

نتایج و بحث

آماره های توصیفی ویژگی های خاک

توصیف آماری ویژگی های خاک منطقه فندقلوی اردبیل در جدول ۲ نشان می دهد که داده های آموزشی و آزمونی به کار رفته در توسعه و ارزیابی مدل های رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه ریزی بیان ژن (GEP) دارای توزیع نسبتاً مناسبی هستند و این موضوع از نظر توسعه و ارزیابی مدل ها حائز اهمیت است؛ به طور مثال، دامنه تغییرات بالا به ترتیب در داده های آموزشی و آزمونی برای مقاومت فروروی خاک (PR) از ۱/۲ تا ۴/۸ مگاپاسکال و از ۱/۰۳ تا ۵/۸۳ مگاپاسکال و برای رطوبت خاک مزرعه (FWC) از ۱۱/۴۸ تا ۵۰/۴۴ درصد وزنی و ۱۲/۹۰ تا ۵۰/۴۷ درصد وزنی و کربن آلی خاک از ۱/۰۱ تا ۷/۱۷ و ۱/۱۵ تا ۶/۳۱ درصد مؤید این موضوع است. همچنین مقادیر میانگین داده ها در سری آموزش و آزمون به هم نزدیک بوده و به ترتیب برای PR ۲/۱۵ و ۲/۲۲ مگاپاسکال، برای FWC ۲۴/۴۶ و ۲۵/۷۳ درصد وزنی و برای کربن آلی، ۲/۸۵ و ۲/۹۰ درصد می باشد. لازم به توضیح است که مقادیر بالای کربن آلی به کاربری جنگلی و مقادیر پایین کربن آلی به کاربری زراعی مربوط می باشد. همچنین مقادیر بالای به دست آمده برای

رطوبت خاک مزرعه (در لحظه اندازه گیری PR) به علت وقوع بارندگی در اواخر تیر ۱۴۰۲ در منطقه مورد مطالعه می باشد. مقادیر متوسط میانگین وزنی (MWD) و هندسی (GMD) قطر خاکدانه ها به ترتیب در داده های سری آموزش برابر با ۱/۵۵ و ۱/۰۳ mm و در داده های سری آزمون برابر با ۱/۶۱ و ۱/۴ mm به دست آمد (جدول ۲)؛ مقادیر بالای شاخص های پایداری خاکدانه ها (MWD و GMD) در تحقیق حاضر در مقایسه با سایر خاک های استان اردبیل را می توان به کربن آلی زیاد خاک در منطقه مورد مطالعه نسبت داد. شیخ زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) میانگین کربن آلی و PR خاک را به ترتیب ۱/۱۱ درصد و ۲/۷۸ مگاپاسکال در ۱۰۵ نمونه خاک زراعی برداشته شده از دشت اردبیل گزارش کردند. امیرعابدی و همکاران (Amirabedi et al., 2016) نیز میانگین کربن آلی و MWD را به ترتیب ۰/۷۷ درصد و ۰/۵۰ mm در ۱۰۰ نمونه خاک زراعی برداشته شده از دشت اردبیل گزارش کردند.

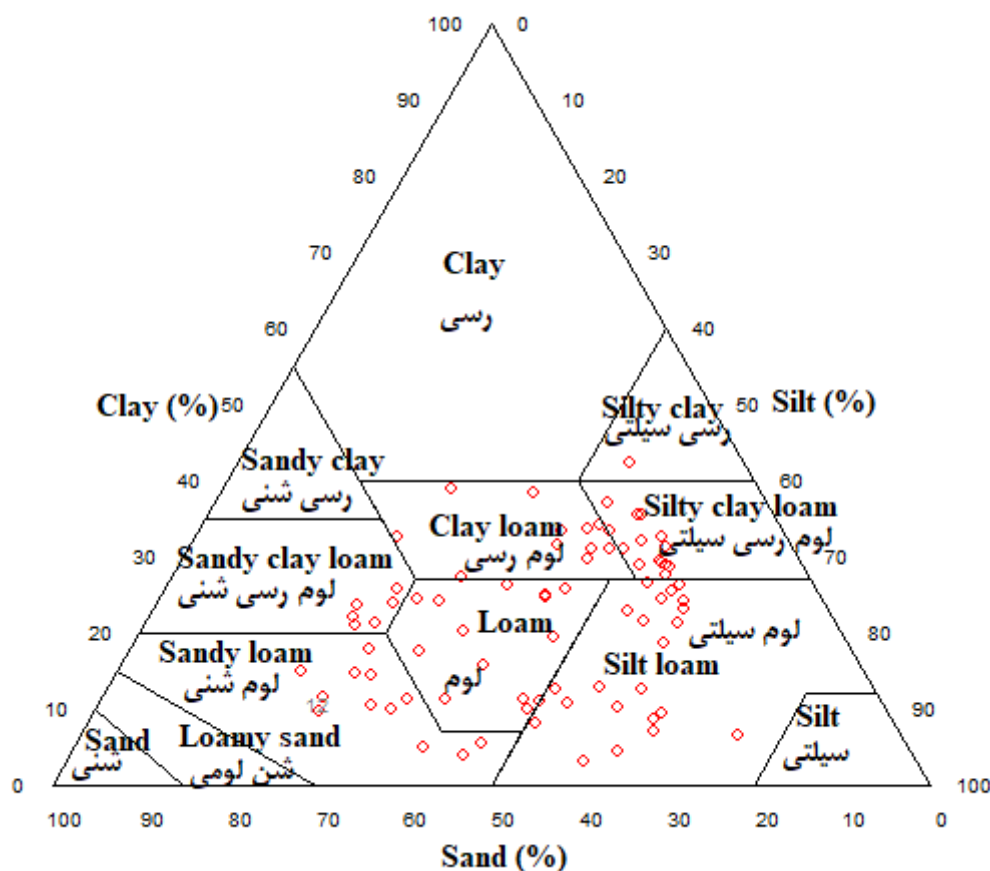
با توجه به شکل ۲ مشاهده می شود که کلاس بافت خاک های مورد مطالعه براساس مثلث بافت آمریکایی لوم، لوم رسی سیلتی، لوم شنی، لوم رسی، لوم سیلتی و رسی سیلتی بود که بیانگر توزیع گسترده بافتی در منطقه مورد مطالعه است.

جدول ۲- آماره های توصیفی متغیرهای خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 2- Descriptive statistics of soil variables in the studied area

متغیر Variable	آموزش Training			آزمون Testing				
	Min.	Max.	Mean	Sd.	Min.	Max.	Mean	Sd.
FWC (% g g ⁻¹)	11.48	50.44	24.46	10.24	12.90	50.47	25.73	12.15
BDrel	0.44	0.75	0.63	0.07	0.43	0.79	0.63	0.10
PD (g cm ⁻³)	2.01	2.67	2.44	0.15	2.02	2.68	2.41	0.17
Clay (%)	2.95	42.18	21.78	9.53	3.94	38.40	20.28	11.27
Silt (%)	21.11	65.19	44.62	12.90	25.53	74.96	47.45	12.35
Sand (%)	13.14	64.10	33.59	15.52	15.31	64.80	32.27	14.89
d _g (mm)	0.01	0.18	0.06	0.05	0.02	0.21	0.06	0.05
σ _g (-)	6.94	20.43	11.75	3.29	6.94	20.43	11.75	3.29
MWDd (mm)	0.98	2.31	1.55	0.28	1.19	1.98	1.61	0.25
GMD (mm)	0.8	1.33	1.03	0.11	0.8	1.2	1.04	0.1
OC (%)	1.01	7.17	2.85	1.75	1.15	6.31	2.90	1.71
CaCO ₃ (%)	3.12	10.32	7.18	1.76	2.1	15.6	6.74	2.67
pH _{1:2.5}	5.45	7.2	6.29	0.38	5.68	7.34	6.33	0.43
EC _{1:2.5} (dS m ⁻¹)	0.02	1.08	0.15	0.19	0.04	0.33	0.11	0.07
PR (MPa)	1.2	4.8	2.15	0.85	1.03	5.83	2.22	1.52

FWC: رطوبت خاک مزرعه (field water content), BDrel: جرم مخصوص ظاهری نسبی (relative bulk density), D_p: جرم مخصوص حقیقی (particle density), Clay: رس، silt: سیلت، sand: شن، d_g: میانگین هندسی قطر ذرات (geometric mean diameter), σ_g: انحراف استاندارد هندسی ذرات (geometric standard deviation), MWDd: میانگین وزنی قطر خاکدانه ها به روش الک خشک (mean weight diameter), GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه ها (geometric mean diameter), OC: کربن آلی (organic carbon), CaCO₃: کربنات کلسیم معادل، PR: مقاومت فروروی (penetration resistance), Sd: انحراف استاندارد، Mean: میانگین، Max: حداکثر، Min: حداقل.



شکل ۲- توزیع کلاس بافت در خاک‌های مورد مطالعه
Figure 2- Distribution of textural class in the studied soils

نتایج مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک

به‌طور کلی براساس روش گام به گام در رگرسیون خطی، ۳ نوع مدل MLR برای برآورد PR با استفاده از متغیرهای رطوبت خاک مزرعه (FWC)، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی (BDrel) از بین متغیرهای زود یافت در منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شد (جدول ۴). نتایج ضریب همبستگی پیرسون بین PR با متغیرهای زود یافت خاک در جدول ۳ نشان می‌دهد که بیش‌ترین همبستگی منفی و معنی‌دار بین PR با FWC ($r = -0.45^{**}$) یافت شد. همچنین همبستگی منفی و معنی‌دار بین PR با سیلت ($r = -0.36^{**}$) و همبستگی مثبت و معنی‌دار بین PR با انحراف استاندارد هندسی ذرات (σ_g) ($r = 0.36^{**}$) به‌دست آمد؛ البته به‌دلیل همراستایی سیلت و σ_g از σ_g به‌عنوان ورودی در تخمین PR استفاده نشد و سایر متغیرهای

ضرایب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای خاک در جدول ۳ نشان می‌دهد که همبستگی خطی قوی ($r > 0.60$) بین شن با سیلت و میانگین هندسی قطر ذرات (d_g)، سیلت با انحراف استاندارد هندسی ذرات (σ_g)، رس با d_g ، کربن آلی با رطوبت خاک مزرعه و MWDD با GMD وجود دارد بنابراین برای اجتناب از همراستایی چندگانه^۱ از این متغیرها به‌عنوان ورودی مدل به‌طور همزمان برای ایجاد مدل‌های MLR در برآورد PR استفاده نشد. عامل تورم واریانس^۲ (VIF) از جمله روش‌های تشخیص همراستایی چندگانه بوده که نشان می‌دهد واریانس ضرایب برآوردی تا چه حد نسبت به‌حالتی که متغیرهای برآوردی همبستگی خطی ندارند افزایش یافته است (Yazdani et al., 2014). نتایج آنالیز هم‌خطی حداکثر تورم واریانس (VIF) مدل‌های MLR مربوطه (جدول ۴) مقادیر کمتر از ۵ را نشان دادند که مقدار حداکثر آن در این پژوهش ۱/۴ به‌دست آمد. به‌طور کلی، اگر آماره VIF برای یک متغیر کمتر از ۵ باشد آن متغیر در مدل وارد می‌گردد در غیر این صورت باید از مدل حذف شود.

2- Variance inflation factor (VIF)

1- Multicollinearity

می رود با افزایش درصد سیلت در خاک به علت ایجاد حالت سست و نرم، مقاومت فروروی خاک کاهش یابد. در مدل MLR شماره ۳، علاوه بر FWC و سیلت، جرم مخصوص ظاهری نسبی (BDrel) نیز با علامت منفی وارد مدل گردید. به نظر می رسد با افزایش سهم رس در توزیع اندازه ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری مرجع در مخرج کسر محاسبه BDrel کاهش و در نتیجه BDrel افزایش و منجر به کاهش PR می گردد. کلیشادی و همکاران (Kelishadi et al., 2014) توضیح نسبتاً کاملی درخصوص کاستی های جرم مخصوص ظاهری و مزیت های استفاده از BDrel به جای آن ارائه کرده اند. همان طوری که از **جدول ۳ و ۴** نمایان است برخلاف انتظار، در این پژوهش بین کربن آلی و PR همبستگی معنی دار یافت نشد بنابراین کربن آلی نتوانست به عنوان یک متغیر ورودی مدل های رگرسیونی تخمین زننده PR ظاهر گردد که دلیل این مسأله را شاید بتوان به ضریب تغییرات بالای آن ($CV = 60\%$) در سه کاربری مجاور هم جنگلی، مرتعی و زارعی منطقه فندقلوی اردبیل نسبت داد. این در حالی است که در تحقیق شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) در خاک های دشت اردبیل، بین کربن آلی و PR همبستگی منفی و معنی دار ($r = -0.47^{**}$) پیدا شد و کربن آلی در برخی مدل های MLR برای برآورد PR، به عنوان ورودی مدل انتخاب گردید.

ورودی (به استثنای BDrel) نیز براساس تشخیص روش گام به گام و احتمالاً به علت نداشتن همبستگی معنی دار با PR، در مدل های MLR ظاهر نشدند.

مشاهده می شود FWC در هر سه مدل MLR به عنوان متغیر ورودی و با علامت منفی ظاهر گردیده است (**جدول ۴**) بنابراین در پژوهش حاضر رطوبت خاک مزرعه (FWC) مهمترین عامل اثرگذار در برآورد مقاومت فروروی خاک بوده است. در مدل های رگرسیونی ارائه شده توسط بیات و همکاران (Bayat et al., 2008)، واز و همکاران (Vaz et al., 2011) و شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) نیز رطوبت خاک مزرعه یکی متغیرهای ورودی مهم در برآورد PR گزارش گردیده است. علامت منفی FWC در هر سه مدل MLR نیز بیانگر آن است که با افزایش رطوبت خاک محل و نرم شدن خاک، مقاومت مکانیکی خاک در برابر نفوذ فروسنج مخروطی کاهش یافته است که با یافته های سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011) و اصغری و شهابی (Asghari & Shahabi, 2019) در یک راستا می باشد. همچنین مشاهده می شود در مدل MLR شماره ۲ و ۳، سیلت با علامت منفی به عنوان متغیر ورودی وارد مدل گردیده است (**جدول ۴**)؛ ذرات سیلت در مقایسه با زبری ذرات شن و چسپندگی ذرات رس از خاصیت نرمی برخوردار هستند (Campbell, 1985) بنابراین انتظار

جدول ۳- ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای مورد مطالعه (n=80)

Table 3- Pearson correlation coefficient (r) between studied variables (n=80)

Variable	OC	Sand	Silt	Clay	dg	σ_g	FWC	BDrel	PD	MWDd	GMD	CaCO ₃
PR	-0.06	0.21	-0.36**	0.14	0.10	0.36**	-0.45**	0.17	0.19	0.08	-0.01	-0.03
OC	1	0.59**	-0.24*	-0.59**	0.55**	0.03	0.78**	-0.50**	-0.57**	0.23*	0.14	0.40**
Sand		1	-0.76**	-0.56**	0.88**	0.42**	0.44**	-0.19	-0.32*	0.18	0.11	0.42**
Silt			1	-0.11	-0.50**	-0.84**	-0.07	-0.17	0.07	-0.24*	-0.27*	-0.28*
Clay				1	-0.71**	0.43**	-0.59**	0.50**	0.15	0.04	0.18	-0.29*
dg					1	0.01	0.47**	-0.34**	-0.36**	0.02	-0.03	0.45**
σ_g						1	-0.12	0.33**	0.08	0.34**	0.36**	0.05
FWC							1	-0.57**	-0.63**	0.25*	0.17	0.37**
BDrel								1	0.52**	-0.03	-0.01	-0.19
PD									1	-0.14	-0.08	-0.28*
MWDd										1	0.87**	-0.07
GMD											1	0.02
CaCO ₃												1

* و **: به ترتیب معنی دار در سطح احتمال ۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در زیر **جدول ۲** آورده شده است.

Variable symbols description is available under Table 2. *, **: Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

جدول ۴- مدل های رگرسیون خطی چندگانه (MLR) مقاومت فروروی (PR) خاک

Table 4- MLR models of soil PR

شماره	مدل	حداکثر VIF
Number	Model	Max VIF
1	PR = 3.007 - 0.035 FWC	1.00
2	PR = 4.22 - 0.041 FWC - 0.024 silt	1.03
3	0.059 FWC - 0.030 silt - 5.098 BDrel PR = 8.161-	1.40

توصیف متغیرها در زیر **جدول ۲** آورده شده است.

Variables description is available under Table 2.

جدول ۵- معیارهای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (MLR) مقاومت فروروی (PR) خاک

Table 5- Evaluation criteria for MLR models of PR

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set			آموزش Training				
		R ²	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS	R ²	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS
1	FWC	0.27	1.32	0.12	0.20	0.18	0.77	-0.001	0.18
2	FWC, silt	0.44	1.19	0.19	0.36	0.31	0.70	0.003	0.31
3	FWC, silt, BDrel	0.34	1.25	0.19	0.29	0.45	0.63	0	0.45

NS: ضریب نش-ساتکلیف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R²: ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.
R²: coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. Variables description is available under Table 2.

نتایج مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای برآورد مقاومت (PR) خاک

برای ایجاد مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برآورد کننده PR، از ۳ مدل با همان متغیرهای ورودی مدل‌های MLR (جدول ۵) استفاده شد؛ جدول ۶ معیارهای ارزیابی ۳ مدل ارائه شده برای برآورد PR را نشان می‌دهد. رتبه‌بندی مدل‌های ANN نیز همانند مدل‌های MLR (جدول ۵)، بر مبنای پایین بودن RMSE و بالا بودن NS انجام شد. براساس معیارهای فوق در داده‌های آزمونی (جدول ۶)، بهترین مدل ANN برای برآورد PR، مدل ANN شماره ۳ با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی در مقایسه با سایر مدل‌های ANN بود. مقادیر R²، RMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۷۹، ۰/۳۹ MPa، ۰/۰۵ MPa و ۰/۷۸ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۹۲، ۰/۴۱ MPa، ۰/۰۵ MPa - و ۰/۹۲ تعیین گردید (جدول ۶). مقادیر مثبت و منفی ME برای داده‌های آموزشی و آزمونی به ترتیب بیان گر برآورد جزئی بیشتر و کمتر از مقدار واقعی PR خاک توسط مدل شماره ۳ می‌باشد. در رتبه‌های بعدی، به ترتیب مدل ANN شماره ۲ و شماره ۱ دارای دقت بیشتری در برآورد PR می‌باشد؛ مدل ANN شماره ۲ نشان می‌دهد اضافه شدن متغیر سیلت به مدل ANN شماره ۱ موجب کاهش خطای مدل و افزایش دقت آن گردید به طوری که براساس داده‌های آزمونی، RMSE مدل ANN شماره ۲ نسبت به مدل ANN شماره ۱ به میزان ۴۵ درصد کاهش و ضریب NS مدل ANN شماره ۲ نسبت به مدل ANN شماره ۱ به میزان ۹۳ درصد افزایش یافت. بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) گزارش کردند افزودن متغیر درجه اشباع نسبی به مدل ANN برای برآورد PR، موجب بهبود تخمین مقاومت فروروی خاک از طریق افزایش R² از ۰/۷۵ به ۰/۸۰ و کاهش RMSE به میزان ۸/۶۵ درصد گردید. سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011) بیان کردند که مقاومت فروروی خاک با دقت بالایی (R²= ۰/۹۸ و RMSE= ۰/۰۸۴) توسط شبکه عصبی مصنوعی از روی متغیرهای ورودی جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک مزرعه مورد

در جدول ۵ مقادیر معیارهای ضریب تبیین (R²)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) برای ارزیابی مدل‌های MLR از نظر دقت برآورد PR آورده شده است. استفاده از R² به تنهایی برای سنجش اعتبار مدل‌ها ممکن است فریبنده باشد و الزاماً R² نزدیک به ۱ دلیل بر تطابق کامل مقادیر اندازه‌گیری با مقادیر برآوردی PR نیست یعنی بالا بودن R² دلیلی بر کم بودن خطا نیست (Kozak et al., 1996) بنابراین در پژوهش حاضر رتبه‌بندی مدل‌های ANN، MLR و GEP در برآورد PR، بر مبنای پایین بودن RMSE و بالا بودن NS انجام شد. براساس پایین بودن میزان RMSE و بالا بودن میزان NS در داده‌های آزمونی، مشاهده می‌شود مدل MLR شماره ۲ (جدول ۵) با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه و سیلت از نظر برآورد PR دارای دقت بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های MLR بود. مقادیر R²، RMSE، ME و NS این مدل برای داده‌های آموزشی به ترتیب برابر ۰/۳۱، ۰/۷۰ MPa، ۰/۰۳ MPa و ۰/۳۱ و برای داده‌های آزمونی برابر ۰/۴۴، ۱/۱۹ MPa، ۰/۱۹ MPa و ۰/۳۶ تعیین گردید (جدول ۵). مقادیر مثبت ME برای داده‌های آموزشی و آزمونی بیان گر برآورد بیشتر از مقدار واقعی PR خاک توسط مدل شماره ۲ می‌باشد. همچنین معادله رگرسیونی این مدل (جدول ۴) نشان می‌دهد که تأثیر منفی متغیر رطوبت خاک مزرعه به علت داشتن ضریب رگرسیونی بالاتر در برآورد PR به مراتب بیشتر از متغیر سیلت می‌باشد. در رتبه‌های بعدی، مدل شماره ۳ با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی و مدل ۱ با متغیر ورودی رطوبت خاک مزرعه قرار دارد (جدول ۵)؛ پس در مجموع براساس آماره‌های ارزیابی سه مدل رگرسیونی فوق‌الذکر، مدل شماره ۲ برای برآورد PR ارجح‌تر است. در پژوهش شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) نیز بهترین مدل MLR با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه و تخلخل کل با مقادیر R²، RMSE و ME به ترتیب برابر با ۰/۴۱، ۱/۱۶ MPa، ۰/۱۷ MPa (داده‌های آزمونی) برای برآورد PR در خاک‌های زراعی دشت اردبیل تعیین گردید.

مخصوص ظاهری نسبی در مقایسه با سایر مدل های GEP می باشد. مقادیر R^2 ، RMSE، ME و NS برای این مدل براساس داده های آموزشی به ترتیب برابر $0/75$ ، $0/43$ MPa، $0/4$ و $0/74$ و داده های آزمونی برابر $0/79$ ، $0/91$ MPa، $0/13$ و $0/63$ به دست آمد (جدول ۷). مقادیر مثبت ME در داده های آموزشی و آزمونی نشان دهنده اندکی بیش برآوردی در تخمین PR خاک توسط مدل GEP شماره ۳ می باشد. در رتبه های بعدی، به ترتیب مدل GEP شماره ۲ و شماره ۱ دارای بیشترین دقت در برآورد PR می باشد؛ با توجه به جدول ۷ مشاهده می شود افزودن متغیر سیلت به مدل GEP شماره ۱ باعث کاهش RMSE از $1/26$ به $0/93$ مگاپاسکال و افزایش ضریب NS از $0/28$ به $0/61$ در داده های آزمونی گردید. دیناروند و همکاران (Dinarvand et al., 2018) نیز بیان کردند مدل GEP با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، جرم مخصوص ظاهری، رس و میانگین هندسی قطر (d_g) ذرات خاک توانست PR خاک در اراضی زراعی دشت اردبیل با دقت بالایی تخمین بزند به طوری که مقادیر R^2 ، RMSE و ME مدل مذکور به ترتیب برابر با $0/51$ ، 1 MPa و $-0/43$ در داده های آزمونی به دست آمد.

تخمین قرار گرفت. شیخزاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) نیز در خاک های زراعی دشت اردبیل، مدل با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، سیلت، جرم مخصوص ظاهری و انحراف استاندارد هندسی (σ_g) ذرات خاک را به عنوان بهترین مدل (R^2 ، RMSE و ME به ترتیب برابر با $0/41$ ، $1/4$ MPa، $0/206$ - در داده های آزمونی) برای برآورد PR خاک معرفی کردند.

نتایج مدل های برنامه ریزی بیان ژن (ANN) برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک

در برآورد PR با استفاده برنامه ریزی بیان ژن (GEP) نیز ۳ نوع مدل با همان متغیرهای ورودی مدل های MLR و ANN (جدول ۵ و ۶) ایجاد گردید؛ جدول ۷ معیارهای ارزیابی ۳ مدل GEP ارائه شده برای برآورد PR را نشان می دهد. رتبه بندی مدل های GEP نیز همانند مدل های MLR (جدول ۵) و ANN (جدول ۶)، براساس پایین بودن RMSE و بالا بودن NS انجام گردید. بر مبنای آماره های مذکور در داده های آزمونی (جدول ۷)، دقیق ترین مدل GEP برای برآورد PR، مدل شماره ۳ با متغیرهای ورودی رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم

جدول ۶- معیارهای ارزیابی مدل های شبکه عصبی مصنوعی مقاومت فروروی (PR) خاک

Table 6 - Evaluation criteria for ANN models of PR

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R^2	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS	R^2	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS
1	FWC	0.56	1.12	0.17	0.43	0.14	0.79	0.07	0.13
2	FWC, silt	0.89	0.61	-0.29	0.83	0.70	0.46	-0.03	0.70
3	FWC, silt, BDrel	0.92	0.41	-0.05	0.92	0.79	0.39	0.05	0.78

NS: ضریب نش-سانتکلیف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R^2 : ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

R^2 : coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. Variables description is available under Table 2.

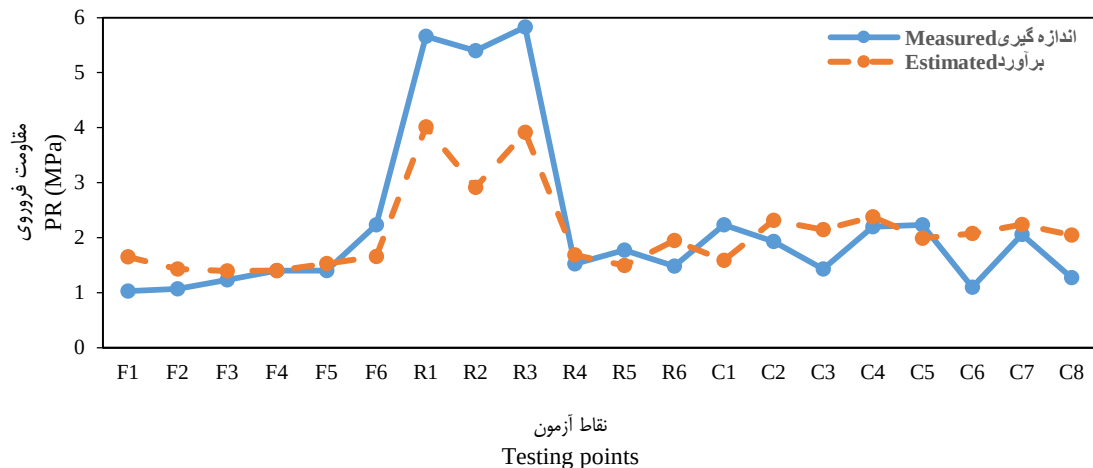
جدول ۷- معیارهای ارزیابی مدل های برنامه ریزی بیان ژن مقاومت فروروی (PR) خاک

Table 7- Evaluation criteria for GEP models of PR

شماره Number	متغیرهای ورودی Input variables	آزمون Testing set				آموزش Training			
		R^2	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS	R^2	RMSE (MPa)	ME (MPa)	NS
1	FWC	0.30	1.26	0.08	0.28	0.55	0.59	-0.02	0.50
2	FWC, silt	0.74	0.93	0.13	0.61	0.61	0.53	-0.03	0.61
3	FWC, silt, BDrel	0.79	0.91	0.13	0.63	0.75	0.43	0.04	0.74

NS: ضریب نش-سانتکلیف، RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا، ME: میانگین خطا، R^2 : ضریب تبیین. توصیف متغیرها در زیر جدول ۲ آورده شده است.

R^2 : coefficient of determination; RMSE: root mean square error; ME: mean error; NS: Nash-Sutcliffe coefficient. Variables description is available under Table 2.



شکل ۳- بررسی عملکرد بهترین مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک در نقاط آزمونی (n=20): F: کاربری جنگلی، R: کاربری مرتعی و C: کاربری زراعی

Figure 3- Investigation the performance of GEP model in estimating soil penetration resistance (PR) at the testing points (n=20); F: forest land use, R: range land use and C: cultivated land use

در مقایسه با مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه (R^2 از ۰/۲۷ تا ۰/۳۴، NS از ۰/۲۰ تا ۰/۳۶ و RMSE از ۱/۲۵ تا ۱/۳۲ مگاپاسکال) و مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (R^2 از ۰/۳۰ تا ۰/۷۹، NS از ۰/۲۸ تا ۰/۶۳ و RMSE از ۰/۹۱ تا ۱/۲۶ مگاپاسکال) دارای دقت بالاتری و خطای کمتری در برآورد PR بودند. شکل ۴ نیز نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR خاک را با استفاده از بهترین مدل MLR (مدل شماره ۲ در جدول ۵)، بهترین مدل ANN (مدل شماره ۳ در جدول ۶) و بهترین مدل GEP (مدل شماره ۳ در جدول ۷) برای داده‌های آزمونی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که پراکندگی داده‌ها حول محور ۱:۱ در بهترین مدل ANN کمتر از مدل‌های MLR و GEP برای برآورد PR در خاک‌های منطقه مورد مطالعه می‌باشد همچنین می‌توان گفت مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی و برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین PR به دلیل استفاده از روابط غیر خطی به مراتب دقیق‌تر از مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه عمل نموده‌اند. علت برآورد دقیق‌تر شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌های رگرسیونی را می‌توان در نحوه عمل شبکه پرسپترون سه لایه دانست. عملکرد این شبکه به این صورت است که ابتدا الگویی به شبکه عصبی عرضه می‌شود و خروجی آن محاسبه می‌شود سپس شبکه این خروجی را با مقادیر اندازه‌گیری شده متغیر یا متغیرهای خروجی مقایسه می‌کند و ضرایب وزنی شبکه را به نوعی تغییر می‌دهد که کمترین اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده باشد. بیات و همکاران (Bayat et al., 2008) و شیخ‌زاده و همکاران (Sheykhzadeh et al., 2016) نیز گزارش نمودند که شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به مدل‌های رگرسیون خطی چندگانه در برآورد PR دقیق‌تر عمل نمودند. سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011) نشان دادند تابع شبکه عصبی

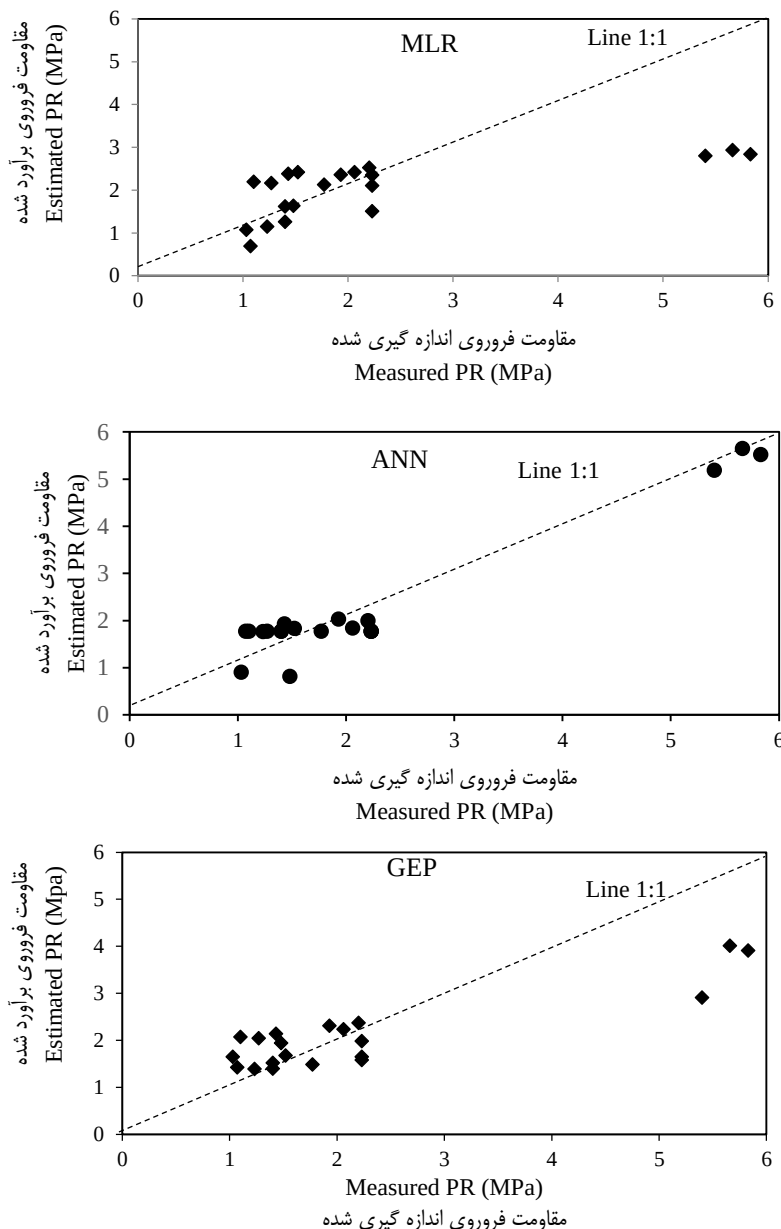
بررسی عملکرد بهترین مدل در برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک در نقاط آزمونی (۲۰ داده تصادفی) به عنوان نمونه در شکل ۳ برای مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) نشان داده شده است؛ با توجه به این شکل مشاهده می‌شود خطای مدل (اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر برآورد شده) در پیش‌بینی متغیر وابسته (PR) از روی متغیرهای مستقل (رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی) در نمونه‌های خاک برداشته شده از کاربری مرتعی (R) به مراتب بیشتر از کاربری‌های جنگلی (F) و زراعی (C) می‌باشد؛ علت این مسأله را شاید بتوان به ضریب تغییرات (CV) بالای مقاومت فروروی خاک در کاربری مرتعی (۵۸ درصد) در مقایسه با کاربری‌های جنگلی (۲۲ درصد) و زراعی (۲۳ درصد) نسبت داد همچنین از بین متغیرهای مستقل نیز رطوبت خاک مزرعه دارای بیشترین ضریب تغییرات در کاربری مرتعی (۳۷ درصد) در مقایسه با کاربری‌های جنگلی (۱۶ درصد) و زراعی (۱۶ درصد) بود. نتایج تحقیقات قبلی نیز بیانگر تأثیرپذیری بیشتر مقاومت فروروی از رطوبت خاک مزرعه در مقایسه با سایر ویژگی‌های زود یافت خاک می‌باشد (Bayat et al., 2008; Vaz et al., 2011; Santos et al., 2011; Sheykhzadeh et al., 2016; Asghari & Shahabi, 2019).

مقایسه دقت مدل‌های MLR، ANN و GEP در برآورد PR

مقادیر R^2 ، RMSE و NS برای مدل‌های MLR (جدول ۵)، ANN (جدول ۶) و GEP (جدول ۷) ارائه شده برای برآورد PR در داده‌های آزمونی بیانگر آن است که مدل‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به علت داشتن R^2 بالا (از ۰/۵۶ تا ۰/۹۲) و NS بیشتر (از ۰/۴۳ تا ۰/۹۳) و RMSE پایین (از ۰/۴۱ تا ۱/۱۲ مگاپاسکال)

های رگرسیون خطی و غیرخطی در برآورد ویژگی های دیرپافت خاک از روی ویژگی های زودپافت خاک توسط احمدزاده کلیبر و فولادپناه (Ahmadzadeh Kaleibar & Fuladipناه, 2023) و زانگ و زانگ (Zhang & Zhang, 2024) گزارش گردیده است.

مصنوعی ($R^2 = 0.98$ و $RMSE = 0.084$) نسبت به تابع رگرسیونی ($R^2 = 0.92$ و $RMSE = 0.951$) دقت بیشتری در برآورد مقاومت فروروی از روی جرم مخصوص ظاهری و رطوبت خاک مزرعه داشت. نتایج مشابهی در خصوص دقت بالای مدل GEP در مقایسه با مدل



شکل ۴- مقایسه مقادیر اندازه گیری و برآورد شده مقاومت فروروی (PR) خاک با استفاده از بهترین مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه ریزی بیان ژن (GEP) بر اساس داده های آزمونی ($n=20$). اطلاعات مربوط به مدل ها و متغیرهای ورودی در جداول ۵، ۶ و ۷ آورده شده است. خط چین بیانگر نمودار ۱:۱ است.

Figure 4- Comparisons of estimated and measured values of penetration resistance (PR) for the testing data set based on the best MLR, ANN and GEP models. Tables 4, 5 and 6 provide detailed information about each model and input variables. The dashed lines indicate the 1:1 diagonals.

نتیجه گیری

در این تحقیق از مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه (MLR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد مقاومت فروروی (PR) خاک از روی ویژگی‌های زود یافت خاک در اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی فندقلوی اردبیل استفاده گردید. نتایج نشان داد در منطقه مورد مطالعه، متغیرهای رطوبت خاک مزرعه، سیلت و جرم مخصوص ظاهری نسبی در برآورد PR در مقایسه با سایر ویژگی‌های زود یافت خاک از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و در ورودی مدل‌ها به کار گرفته شدند. مقایسه نتایج مدل‌ها نشان داد ANN به علت داشتن ضرایب تبیین (R^2) و نش-ساتکلیف (NS) بالاتر و مجذور میانگین مربعات خطای (RMSE) پایین‌تر، دارای دقت بالاتر و خطای

کمتری در برآورد PR خاک نسبت به مدل‌های MLR بودند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات بعدی از روش رگرسیون غیر خطی و نیز سایر مدل‌های هوشمند مانند نروفازی، ماشین بردار پشتیبان و جنگل تصادفی برای برآورد مقاومت فروروی خاک استفاده گردیده و نتایج آن با مدل‌های رگرسیونی مقایسه گردد.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از طرح پژوهشی مصوب دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد به این وسیله از حمایت‌های معاونت محترم پژوهشی و فن آوری دانشگاه تشکر و قدردانی می‌شود.

Referensec

- Asghari, Sh., & Shahabi M. (2019). Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and penetration resistance in salt-affected lands around Lake Urmia. *Water and Soil*, 33(1), 103-116. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V33I1.74411>
- Asghari, Sh., Sheykhzadeh, G.R., & Shahabi, M. (2017). Geostatistical analysis of soil mechanical properties in Ardabil plain of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(12), 1631-1643. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1296136>
- Azadmard, B., Mosaddeghi, M.R., Ayoubi, S., Chavoshi, E., & Raoof, M. (2019). Estimation of near-saturated soil hydraulic properties using hybrid genetic algorithm-artificial neural network. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 20(3), 437-449. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.09.001>
- Ahmadzadeh Kaleibar, F., & Fuladipannah, M. (2023). Assessment of regression, support vector machine, and gene expression programming transfer functions to predict soil humidity parameters in Arasbaran plain. *Journal of Water and Soil Science*, 27(2), 135-149. <https://doi.org/10.47176/jwss.27.2.42532>
- Ahmedi, A., Palizvan zand, P., & Palivan zand, H. (2018). Estimation of saturated hydraulic conductivity by using gene expression programming and ridge regression (A case study in East Azerbaijan province). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(5), 1087-1095. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2018.218413.667555>
- Amirabedi, H., Asghari, Sh., Mesri, T., & Balandeh, N. (2016). Prediction of mean weight diameter of aggregates using artificial neural network and regression models. *Applied Soil Research*, 4(1), 39-53. (In Persian with English abstract)
- Bayat, H., Neyshabouri, M.R., & Hajabbasi, M. (2008). Comparing neural networks, linear and nonlinear regression techniques to model penetration resistance. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32, 425-433.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986a). *Bulk density*. p. 363-375. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986b). *Particle density*. p. 377-381. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods*. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Campbell. G.S. (1985). *Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant System*. Elsevier. New York. 150 p.
- Dinarvand, H., Asghari, Sh., & Shahabi, M. (2018). Estimating soil penetration resistance using neurofuzzy, support vector machine and gene expression programming methods. Available at <https://civilica.com/doc/808626> (In Persian with English abstract)
- Ferreira, C. (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Syst* 13, 87-129.
- Ghorbani, M.A., Deo, R.C., Kashani, M.H., Shahabi M., & Ghorbani, S. (2019). Artificial intelligence-based fast and efficient hybrid approach for spatial modeling of soil electrical conductivity. *Soil and Tillage Research*, 186, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.012>
- Gardner, W.H. (1986). *Water content*. p. 493-544. In: Klute A. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 1*. 2nd ed. Agronomy. Monograph. 9. ASA, Madison, WI.
- Gee, G.W., & Or, D. (2002). *Particle-size analysis*. p. 255-293. In: Dane J. H., & Topp G. C. (eds.). *Methods of Soil*

- Analysis. Part 4. SSSA Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- 16- Kelishadi, H., Mossaddeghi, M.R., Hajabbasi, M.A., & Ayoubi, S. (2014). Near-saturated soil hydraulic properties as influenced by land use management systems in Koohrang region of central Zagros, Iran. *Geoderma*, 213, 426-434. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.008>
- 17- Kozak, E., Pachepsky, Y.A., Sokolowski, S., Sokolowska, Z., & Stepniewski, W. (1996). A modified number-based method for estimating fragmentation fractal dimensions of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1291-1297.
- 18- Lowery, B., & Morrison, J.E. (2002). *Soil penetrometer and penetrability*. In: Dane J.H., & Topp GC (eds.). *Methods of soil analysis*, part 4. Physical methods. Madison (WI): Soil Science Society of America; pp. 363-388.
- 19- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*. p. 539-579. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 20- Page, A.L. (ed.). (1985). *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Methods*. Agronomy No. 9. American Society of Agronomy, Madison, WI.
- 21- Santos, F.L., De Jesus, V.A.M., & Valente, D.S.M. (2012). Modeling of soil penetration resistance using statistical analyses and artificial neural networks. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 34, 219-224.
- 22- Sheykhzadeh, G.R., Asghari, Sh., & Mesri Gundoshmian, T. (2016). Estimating penetration resistance in agricultural soils of Ardabil plain using artificial neural network and regression methods. *Water and Soil*, 30(3), 941-954. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.V30I3.42235>
- 23- Vaz, C.M.P., Manieri, J.M., de Maria, I.C., & Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, 166, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016>
- 24- Whalley, W., To, J., Kay, B.D., & Whitmore, A.P. (2007). Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters. *Geoderma*, 137, 370-377. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.029> [Get rights and content](#)
- 25- Yazdani, A., Mosaddeghi, M.R., Khademi, H., Ayoubi, S., & Khayamim, F. (2014). Relationship between surface aggregate stability and some soil and climate properties in Isfahan province. *Soil Management*, 3(2), 23-31. (In Persian with English abstract)
- 26- Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *Journal of American Society Agronomy*, 28, 337-35.
- 27- Zhang, R., & Zhang, S. (2024). Coefficient of permeability prediction of soils using gene expression programming. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 128(107504). <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107504>

Research Article

Vol. 38, No. 2, May-June 2024, p. 285-300

The Effect of Cultivation Systems on Stability Index and Organic Carbon of Aggregates in Soils with Long-Term Sugarcane Cultivation History

N. Mollaie¹, M. Sheklabadi^{2*}, M. Nael³

1, 2 and 3- Former M.Sc. Student, Associate Professor and Assistant Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: sheklabadi@basu.ac.ir)

Received: 21-02-2024
Revised: 21-03-2024
Accepted: 02-04-2024
Available Online: 02-04-2024

How to cite this article:

Mollaie, N., Sheklabadi, M., & Nael, M. (2024). The effect of cultivation systems on stability index and organic carbon of aggregates in soils with long-term sugarcane cultivation history. *Journal of Water and Soil*, 38(2), 285-300. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86970.1390>

Introduction

Soil aggregate stability is a crucial indicator for evaluating soil structure, quality, and health. This index affects the physical and hydrological functions of the soil, which, in turn, depend on plant primary production and the capacity of organic carbon decomposition. Soil organic carbon plays a positive role in the formation and stability of soil aggregates. Soil organic carbon (SOC) causes a rapid decrease in water penetration into soil aggregates by creating a water-repellent coating around them and increases their stability against instant wetting stress. Land use and management, including cultivation systems and tillage methods, have an important impact on the stability and size distribution of soil aggregates. Mechanized sugarcane cultivation has a long history in Khuzestan province, particularly in Haft Tepe sugarcane cultivation and industry. Haft Tepe Agriculture is the first sugar production unit in Iran. Despite the increase in the use of chemical fertilizers, the yield of sugarcane crops has been decreasing due to the destruction of the physical properties of the soil. The study aimed to investigate the effects of different sugarcane cultivation systems on soil physicochemical-biological properties and soil stability indices in parts of Khuzestan province.

Materials and Methods

Soils were sampled from the surface of five farms in the Haft Tepe sugarcane cultivation complex located in the northwest of Khuzestan province. The farms included single-row, new planting cultivation (S-P); single-row, third ratoon cultivation (S-R3); double rows, new planting cultivation (D-P); double rows, first ratoon cultivation (D-R1); and uncultivated land (barren) that had been left unused for a long time. Soil organic carbon content, active carbon content, basal respiration, induced respiration, water-stable aggregates, and aggregate organic carbon fractions were measured in the sampled soil. Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates were also calculated.

Results and Discussion

The study found that the organic C content was highest in the double-rows+new planting (D-P) method and lowest in uncultivated land (0.95% and 0.12%, respectively). The increase in plant density, biomass, and plant residue addition in D-P cultivation has led to an improvement in SOC content. The higher SOC content in cultivated lands compared to uncultivated land indicates the positive effect of many years of cultivation and irrigation. Among the different cultivations, double-row new planting (D-P) cultivation had significantly higher active carbon. In D-R1 cultivation, returning plant residues to the soil increased the SOC (0.59%) and active carbon



©2024 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source.

<https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86970.1390>

content. The burning of sugarcane plant residues during harvesting and land preparation for new sugarcane cultivation in S-P fields appears to have led to a decrease in active carbon. Basal respiration and induced respiration values were significantly higher in single-row, third ratoon (S-R3) and double-row, new planting (D-P) cultivations, respectively. In S-R3 cultivation, the older plants and increased root biomass provided more rhizospheric organic C for microorganisms, resulting in higher microbial activity and respiration. Microorganisms transform and decompose soil organic matter, which is a source of energy for their metabolic processes. Therefore, there is a close relationship between organic matter and soil microorganisms. Lower basal respiration in newly planted lands may be due to the process of land preparation for cultivation. Additionally, single-row new-planted farms had a clayey texture, which could reduce soil respiration. In general, the recycling of organic matter and microbial activity is lower in fine-textured soils compared to coarse-textured soils. The highest MWD and GMD were found in single-row, third ratoon (S-R3) and single-row, new planting (D-P) cultivations. The uncultivated land had the lowest MWD and GMD, indicating unstable soil structure due to low SOC content. The lower MWD observed in S-P cultivation could be related to tillage and hilling up operations. S-R3 cultivation had more plant residues compared to other cultures. Higher plant ages and increased root biomass and rhizodeposits led to an increase in soil aggregate formation and stability. Soil tillage, which reduces soil organic carbon, can decrease the stability of soil aggregates and structure. The S-P and D-P cultivations had the highest value of coarse aggregates (larger than 2 mm) and fine aggregates (0.53-2 mm). The highest amount of medium aggregates were observed in S-P, D-P, and D-R1 cultivations. Agricultural operations can break large soil aggregates into smaller ones, while low SOC content and burning of sugarcane residues can reduce the formation of large aggregates. The study found statistically significant differences in the OC content of aggregates among the different cultivations. The highest content of aggregates OC was found in coarse aggregates (0.25-2.0 mm) of D-R1, D-P, and S-P cultivations.

Conclusion

This study investigates the impact of mechanized and long-term sugarcane cultivation on the physical and biological properties of soil. Overall, the water stable aggregates and MWD were found to be unsuitable in some of the studied fields due to the low amount of SOC. This is primarily caused by the annual burning of sugarcane residue. Therefore, returning plant residues after harvesting is suggested as a significant solution to improve problems related to compaction, soil instability, and their harmful consequences.

Keywords: Active C, Aggregates stability, Cultivation systems, Organic C, Sugarcane



پیامد نظام‌های کشت بر شاخص پایداری و کربن آلی خاکدانه‌ها در خاک‌های با سابقه بلندمدت کشت نیشکر

نرگس ملایی^۱ - محسن شکل‌آبادی^{۲*} - محسن نائل^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی اثرات سیستم‌های مختلف کشت نیشکر بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی-بیولوژیکی خاک و شاخص‌های پایداری خاکدانه‌ها در بخشی از اراضی استان خوزستان انجام گرفت. بدین منظور، اثرات روش کاشت نیشکر (یک ردیفه و دو ردیفه)، و سن گیاه (یکساله و چند ساله) بر برخی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک و مقدار پایداری خاکدانه خاک سطحی (۰-۳۰ سانتی‌متر) در مزارع نیشکر هفت تپه، که به‌مدت طولانی از ابتدای تأسیس مجتمع تحت کشت بوده‌اند، مورد بررسی قرار گرفت. در نمونه‌های خاک، مقادیر کربن آلی، کربن فعال، تنفس پایه، تنفس برانگیخته، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)، میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها (GMD)، درصد خاکدانه‌های پایدار و کربن خاکدانه‌ای اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد، کشت دوردیفه باز-رویش و زمین کشت‌نشده به‌ترتیب حاوی بیشترین (۰/۹۵ درصد) و کمترین (۰/۲۱ درصد) میزان کربن آلی خاک بودند و میزان کربن آلی به‌طور معنی‌دار در کشت‌های دوردیفه نخستین باز-رویش و تازه‌کشت، بیشتر از سایر کشت‌ها بود. مقدار تنفس پایه در کشت یک‌ردیفه سومین باز-رویش و تنفس برانگیخته در کشت دو ردیفه تازه‌کشت، به شکل معنی‌داری بیشتر از سایر کشت‌ها به‌دست آمد. بیشترین مقدار MWD و GMD در کشت‌های یک‌ردیفه سومین باز-رویش و یک‌ردیفه تازه‌کشت، و کمترین مقدار آنها در زمین کشت‌نشده مشاهده شد. بیشترین درصد خاکدانه‌های درشت (بزرگتر از ۲ میلی‌متر) و خاکدانه‌های ریز (۰/۵۳-۲ میلی‌متر)، به‌ترتیب در کشت‌های یک ردیفه تازه‌کشت و دوردیفه تازه‌کشت مشاهده شد. بیشترین درصد خاکدانه‌های متوسط در کشت‌های یک ردیفه تازه‌کشت، دوردیفه تازه‌کشت و دو ردیفه اولین باز-رویش مشاهده شد. بر طبق نتایج، اختلاف معنی‌داری بین کشت‌های مورد مطالعه در خصوص کربن آلی درون خاکدانه‌ها مشاهده شد، به‌نحوی که بیشترین میزان کربن آلی موجود در خاکدانه‌ها در خاکدانه‌های درشت (۰/۲۵-۲ میلی‌متر)، به‌ترتیب در کشت‌های دوردیفه دومین باز-رویش، دوردیفه تازه‌کشت و یک ردیفه تازه‌کشت مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: پایداری خاکدانه‌ها، کربن آلی، کربن فعال، نوع کشت، نیشکر

مقدمه

سلامت خاک در نظر گرفته می‌شود (Seybold & Herrick, 2001) و تعیین آن از این نظر که در ارتباط نزدیک با تخلخل، تغییرات دما و رطوبت و فرآیندهای فرسایش می‌باشد، برای رشد گیاه و تولید محصول حائز اهمیت است (Amézqueta, 1999; Boix-Fayos et al., 2001). خاکدانه‌ها ذرات ثانویه‌ای هستند که در اثر هم‌آوری ذرات اولیه رس، سیلت و شن به همراه مواد آلی و عوامل سیمانی و اتصال دهنده تشکیل می‌شوند (Bronick & Lal, 2005). پایداری خاکدانه یکی از ویژگی‌های تعیین‌کننده و اثرگذار بر پایداری خاک و تولید محصول

در دهه‌های اخیر، عواملی مانند کاهش مقدار ماده‌ی آلی خاک، شور و قلیا شدن اراضی، افزایش میزان سدیم تبادلی و کاهش فعالیت موجودات خاکزی سبب کاهش کیفیت ساختمان خاک و پایداری آن و به تبع آن کاهش کیفیت خاک و عملکرد محصول زمین‌های کشاورزی شده است (Boix-Fayos et al., 2001). مبنای یک ساختمان خوب برای رشد گیاه، پایداری خاکدانه‌های آن در آب است. پایداری خاکدانه‌های خاک به‌عنوان شاخص کلیدی برای ارزیابی ساختمان، کیفیت و

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: shekhabadi@basu.ac.ir)

خاک در مقابل دگرگونی کاربری اراضی ضروری است. کربن فعال یک شکل حد واسطه از کربن آلی است که در میان کربن آلی تازه و کربن آلی هوموسی شده که از تجزیه ریشه گیاه، بقایا و دیگر ورودی‌های ماده آلی ساخته می‌شود، قرار دارد. این شکل از کربن، یک شناسه از مواد آلی خاک بوده و منبع کربن و انرژی قابل فراهم برای جامعه میکروبی است (Blair et al., 1995; Weil et al., 2003). کربن فعال سریع‌تر از کربن کل خاک به مدیریت واکنش نشان می‌دهد. کربن فعال یک شناسه از مواد آلی خاک بوده و منبع کربن و انرژی قابل فراهم برای جامعه میکروبی است (Weil et al., 2003).

کشت نیشکر به صورت مکانیزه در استان خوزستان در قالب کشت و صنعت‌های نیشکر، به‌ویژه در کشت و صنعت نیشکر هفت تپه تاریخچه‌ای طولانی دارد. کشت و صنعت هفت تپه اولین واحد تولید شکر از نیشکر در ایران می‌باشد. سطح کل اراضی آن بیش از ۲۴۵۰۰ هکتار می‌باشد که هر ساله حدود ۱۲۰۰۰ هکتار آن به کشت نیشکر اختصاص می‌یابد. تخریب ویژگی‌های فیزیکی خاک از مهم‌ترین مشکلات این مناطق می‌باشد و هر ساله با وجود افزایش مصرف کودهای شیمیایی، عملکرد زراعی نیشکر روند نزولی پیدا کرده است (Jafari et al., 2005). باتوجه به اینکه خاک این مناطق پایداری ساختمانی کمی دارند، بیش‌تر در معرض فرسایش، تخریب و بیابان‌زایی می‌باشند. با توجه به مقدمه گفته شده، این پژوهش تلاش نمود که به بررسی جامعی از اثرات روش‌های کشت دراز مدت نیشکر بر توزیع اندازه و پایداری خاکدانه و مقدار کربن آلی آنها در مجتمع هفت تپه استان خوزستان، بپردازد.

مواد و روش‌ها

تشریح منطقه مورد مطالعه

نمونه‌برداری خاک از مزارع مجتمع کشت و صنعت نیشکر هفت تپه واقع در شمال غربی استان خوزستان با موقعیت $33^{\circ} 4'$ شمالی و طول جغرافیایی $48^{\circ} 21'$ شرقی صورت گرفت. اراضی منطقه هفت تپه دارای ارتفاع بین ۴۳ تا ۸۲ متر از سطح دریا می‌باشند. این منطقه دارای آب و هوای گرم و خشک با میانگین بارندگی ۲۶۵ میلی‌متر می‌باشد، که درجه حرارت سالیانه آن به‌طور متوسط $24/2^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد است. مزارع قدیمی که از سال‌های اولیه تأسیس مجتمع زیر کشت نیشکر رفته و سابقه کشت متراکم داشتند و براساس تاریخچه موجود در اسناد مجتمع، دارای سابقه ۵۰ سال کشت متراکم نیشکر بودند، انتخاب شد و نمونه‌برداری از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متر از چهار مزرعه با دو روش کشت متداول یک‌دیفه و دوریفه گیاه نیشکر و دارای گیاهان نیشکر چند ساله (باز-رویش یا راتون) و تازه‌کشت شده، در سه تکرار انجام گردید. جهت یکنواختی نمونه‌برداری در هر مزرعه نمونه‌های داخل جوی و روی پشته‌ها برداشت شده و با هم مخلوط گردید. از منطقه

است که برگستره وسیعی از فرآیندهای فیزیکی و بیوشیمیایی در محیط‌های طبیعی و کشاورزی تأثیر می‌گذارد (Amézketa, 1999; Kristiansen et al., 2006). این شاخص روی عملکردهای فیزیکی و هیدرولوژیکی خاک اثر می‌گذارد که بستگی به تولید اولیه و ظرفیت تجزیه کربن آلی دارد. به‌طور کلی با کمتر بودن خاکدانه‌های کوچک و بیشتر بودن خاکدانه‌های بزرگ، نفوذپذیری آب و فراهمی عناصر غذایی برای گیاه بیشتر می‌شود (Lee et al., 2023).

وانگ و همکاران (Wang et al., 2016) دو گروه ویژگی‌های درون‌زاد و برون‌زاد خاک را بر پایداری خاکدانه‌ها مهم دانسته‌اند. نوع کانی‌های رسی، مقدار کربنات کلسیم و کربن آلی خاک به‌عنوان عوامل درون‌زاد و مدیریت کشت، عملیات خاک‌ورزی و اقلیم به‌عنوان عوامل برون‌زاد، تأثیر شگرفی بر پایداری خاکدانه‌های خاک دارند. در مناطق نیمه‌خشک پایداری خاکدانه‌های خاک یکی از ویژگی‌های بسیار مهم خاک است که رشد گیاهان را کنترل می‌کند. در میان عوامل مختلفی که بر پایداری خاکدانه و بهبود ساختمان خاک‌های مناطق نیمه‌خشک تأثیرگذار است، مقدار ماده آلی خاک می‌باشد. مطالعات بسیاری بر ارتباط ماده آلی و خاکدانه‌ای شدن خاک صورت گرفته است (Six & Paustian, 2014; Wang et al., 2016; Zhao et al., 2017; Zheng et al., 2023). چنگ و همکاران (Cheng et al., 2015) دریافتند که مواد آلی خاک هم در پیدایش و هم در پایداری خاکدانه‌ها نقش مثبتی را ایفا می‌کنند، به‌نحوی که ماده آلی با ایجاد پوشش آب‌گریز پیرامون خاکدانه‌ها، سبب کاهش سریع نفوذ آب به درون خاکدانه‌ها و افزایش پایداری آن‌ها در برابر تنش خیسیدگی آبی خاکدانه‌ها می‌شود. فانت و همکاران (Fattet et al., 2011) نیز نشان دادند که افزایش پوشش گیاهی و کربن آلی خاک یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده پایداری خاکدانه در خاک می‌باشد. کاتیون‌های چند ظرفیتی رابطه معنی‌داری با خاکدانه‌های کوچک، دارند، اما ماده آلی به عنوان فاکتور اصلی در تشکیل خاکدانه‌های درشت معرفی شد (Boix-Fayos et al., 2001; Mikha et al., 2024; Wang et al., 2016). کاربری و مدیریت اراضی مانند روش‌های کشت و خاک‌ورزی نقش مهمی را در پایداری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها ایفا می‌کند (Bronick & Lal, 2005; Nath & Lal, 2017). روش‌های بدون خاک‌ورزی و خاک‌ورزی حفاظتی با دست‌کاری کمتر خاک و افزایش مواد آلی خاک، پایداری خاکدانه‌ها را بهبود می‌بخشند (Bronick & Lal, 2005; Mikha et al., 2024). برزگر و همکاران در پژوهش خود نشان دادند، تراکم خاک در زراعت نیشکر ممکن است در طی عملیات آماده‌سازی زمین، کاشت و به‌ویژه عملیات برداشت شدت گیرد، که نوع و شدت تأثیر روش خاک‌ورزی بر کیفیت فیزیکی خاک به نوع مدیریت، مدت زمان استفاده از یک نوع خاک‌ورزی و نوع خاک و شرایط منطقه بستگی دارد (Barzegar et al., 2000).

درک پویایی کربن در خاک برای بررسی آسیب‌پذیری مواد آلی

Wi نسبت وزن خاکدانه‌های روی هر الک به وزن کل خاکدانه‌های خاک و n تعداد الک می‌باشد. نسبت وزن خاکدانه‌ها (Wi) با استفاده از رابطه ۳ محاسبه شد:

$$Wi = \frac{Wi(a+s) - Wi(s)}{\sum_{i=1}^n Wi(a+s) - \sum_{i=1}^n Wi(s)} \quad (3)$$

که در آن: Wi(a+s) وزن توده خاک باقی‌مانده پس از آزمایش روی هر الک (خاکدانه باقی‌مانده + شن) و Wi(s) وزن شن روی هر الک پس از آزمایش (گرم) است.

هم‌چنین پایداری خاکدانه براساس میانگین هندسی قطر (GMD) از رابطه هندسی ۴ به‌دست آمد:

$$GMD = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n Wi \log Xi}{\sum_{i=1}^n Wi} \right\} \quad (4)$$

که در آن: Wi وزن توده خاک باقی‌مانده پس از آزمایش روی هر الک و $\log Xi$ لگاریتم میانگین قطر اندازه خاکدانه‌ها است.

برای اندازه‌گیری کربن فعال ابتدا ۲/۵ گرم خاک هوا خشک آسیاب شده و عبور کرده از الک ۰/۵ میلی‌متر در لوله آزمایش ۵۰ میلی‌لیتر ریخته، سپس ۲۰ میلی‌لیتر محلول ۰/۰۲ مولار پرمنگنات پتاسیم به نمونه‌ها افزوده و پس از ۲ دقیقه شیک و ۱۰ دقیقه سانتریفیوژ (۳۰۰۰ دور در دقیقه) عصاره‌ها جمع‌آوری شد. پس از رقیق کردن عصاره‌ها، مقدار کربن فعال با دستگاه اسپتروفتومتر در طول موج ۵۵۰ نانومتر قرائت شد (Weil et al., 2003). مقدار کربن فعال بر حسب میلی‌گرم در کیلوگرم خاک گزارش شد. هم‌چنین کربن آلی خاک و خاکدانه‌ها به روش اکسیداسیون تر والکلی بلک (Nelson & Sommers, 1982) اندازه‌گیری شدند. تنفس پایه خاک به روش اندرسون (Anderson, 1982) و تنفس برانگیخته با روش آلف و نانی پیری (Alefi & Nannipieri, 1995) اندازه‌گیری شد.

به‌منظور تجزیه و تحلیل نتایج، داده‌ها در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و مقایسه میانگین‌ها به روش LSD و همبستگی ساده پیرسون با استفاده از نرم‌افزار SAS و رسم نمودارها با استفاده از EXCEL انجام گردید.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. کربن آلی خاک‌ها در محدوده ۰/۲۱ در زمین بایر تا ۰/۵۹ درصد در کشت D-R1 متغیر بود. مقدار کربن آلی اندازه‌گیری شده در خاک‌های تحت کشت در محدوده مقدار کربن آلی گزارش شده توسط محققان دیگر (Azadi et al., 2021; Jafari et al., 2016; Moradi et al., 2015) برای خاک‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک استان خوزستان نزدیک است. خاک‌های مورد مطالعه، به استثنای زمین کشت‌نشده، غیر شور بودند. پ-هاش خاک‌های مورد

مجاور مزارع نیز که تاکنون کشت نشده و برای مدت طولانی دارای پوشش مرتعی بودند نیز به‌عنوان منطقه شاهد دست نخورده نمونه برداری انجام گرفت. بنابراین تیمارهای آزمایشی شامل مزرعه یک ردیفه تازه کشت (S-P)؛ یک ردیفه سومین باز-رویش (راتون^۱) (S-R3)؛ دو ردیفه تازه کشت (D-P)؛ دو ردیفه اولین باز-رویش (D-R1) و زمین کشت‌نشده (بایر) انتخاب شدند. در روش کاشت دو ردیفه پس از سوزاندن برگ‌ها، نیشکر به‌صورت کاملاً مکانیزه برداشت می‌گردد. بنابراین تردد وسایل نقلیه سنگین در مزرعه حداکثر است. در روش تک‌ردیفه بریدن نیشکر سوخته، دستی و به‌وسیله انسان بوده و بارگیری توسط گراب لودر و نیمه مکانیزه است. با توجه به چند ساله بودن گیاه نیشکر، زمین مزارع تنها در زمان کشت‌تازه شخم زده می‌شود و در سال‌های بعدی عملیات خاک‌ورزی خاصی انجام نمی‌شود و از پایه نی قبلی باز-رویش انجام می‌شود.

جداسازی خاکدانه‌های پایدار در آب و اندازه‌گیری پایداری خاکدانه

برای ارزیابی پایداری خاکدانه‌ها و جداسازی آن‌ها از روش الک تر بهره‌گیری شد (Kemper & Rosenau, 1986). ابتدا نمونه‌های هوا خشک از الک ۴ میلی‌متری عبور داده و سپس ۵۰ گرم از نمونه خاک‌ها وزن و به آرامی در حدود گنجایش ظرفیت مزرعه مرطوب شدند (تا از حبس هوا در خاکدانه‌ها و متلاشی شدن آن‌ها در موقع ورود یکبار در آب جلوگیری شود) و در سری الک‌ها (از بالا به پایین ۲، ۰/۲۵ و ۰/۰۵۳) گذاشته شد. الک کردن با کورس ۳ سانتی‌متر و تندى ۳۰ دور در دقیقه برای مدت زمان ۵ دقیقه درون سطل پر از آب با حرکت رفت و برگشتی انجام شد. خاک‌دانه‌ها باقی‌مانده روی هر سری الک جداگانه گردآوری و برای جلوگیری از سوختن ماده آلی در آون در دمای ۶۰-۵۵ درجه سانتی‌گراد برای ۲ تا ۳ روز خشک شدند. ذرات خاک عبور کرده از الک ۰/۰۵۳ نیز جمع‌آوری شدند. اصلاح مقدار شن و رطوبتی روی نمونه‌ها انجام شد. با بهره‌گیری از روابط زیر، درصد خاکدانه‌های پایدار روی هر الک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) تعیین شد.

$$\%AS = \frac{(W_i - W_s)}{(W_t - W_{st})} \quad (1)$$

%AS = درصد خاک‌دانه‌های پایدار با قطر معین

Wi = وزن خاک مانده روی هر الک پس از آزمایش

Ws = وزن دانه‌های شن و سنگ‌ریزه روی هر الک

Wst = وزن همه دانه‌های شن و سنگ‌ریزه خاک

Wt = وزن کل نمونه خاک آون خشک برای هر آزمایش

$$\bar{Xi} MWD_{wet} = \sum_{i=1}^n Wi. \quad (2)$$

که در این رابطه: $\bar{Xi}$ میانگین قطر خاکدانه‌های روی هر الک،

مطالعه قلیایی بوده و کمبود پتاسیم قابل دسترس در همه خاک‌ها قابل رویت بود. نتایج تجزیه واریانس برخی ویژگی‌های خاک در کاربری‌های مختلف در **جدول ۲** ارائه شده است. اثر کشت‌های مورد مطالعه بر همه ویژگی‌های مورد مطالعه از نظر آماری در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شده است که به تفصیل تغییرات میانگین هر خصوصیت توضیح داده خواهد شد. **جدول ۳** نیز هم‌بستگی ویژگی‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد.

کربن آلی خاک (SOC)

مقدار کربن آلی در بین کشت‌های مختلف، تفاوت معنی‌دار آماری در سطح ۰/۰۱ را نشان داد (**جدول ۲**). مقایسه میانگین‌ها (**شکل ۱-الف**) نشان داد، زمین کشت‌نشده کمترین مقدار کربن آلی را در میان

کشت‌ها داشته است. کربن آلی در زمین‌های زیر کشت نیشکر در کشت‌های دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) و تازه‌کشت (D-P) بیشترین مقدار را دارا بودند (**شکل ۱-الف**). افزایش بقایای گیاهی در این کشت سبب بهبود مقدار ماده آلی خاک شده است. این کشت‌ها با توجه به تراکم بالاتر گیاه در کشت دوردیفه، مقدار زیست‌توده گیاهی و تولید کاه و کلش بیشتری نسبت به دیگر کشت‌ها داشتند. مقدار کم کربن آلی در زمین‌های کشت‌نشده در برابر زمین‌های زیر کشت بیانگر افزایش کربن آلی خاک در طی سالیان متمادی کشت و کار به همراه آبیاری می‌باشد.

آزادی و همکاران (*Azadi et al., 2021*) در بررسی تغییرات فیزیکی و شیمیایی و ترسیب کربن در مراحل مختلف رشد نیشکر در جنوب استان خوزستان، دریافتند که مدیریت کشت نیشکر باعث تغییر ویژگی‌های خاک و افزایش ذخیره کربن آلی خاک شده است.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک‌های مورد مطالعه

Table 1- Some of the physico-chemical characteristics of the studied soils

نوع کشت Cultivation	کربن آلی SOC (%)	هدایت الکتریکی EC (dS/m)	pH	نیترژن کل TN(%)	پتاسیم قابل جذب (mg/kg)	فسفر قابل جذب (mg/kg)	توزیع اندازه ذرات Particle Size Distribution (%)			
							شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil Texture
S-P	0.56	0.21	8.01	0.049	78.7	15.2	5.3	40.7	54.0	Silty clay
S-R3	0.47	0.15	8.07	0.056	78.8	13.2	5.5	40.0	54.6	Clay
D-P	0.56	0.18	8.14	0.057	73.5	0.7	51.6	27.8	20.6	Sandy clay loam
D-R1	0.59	0.23	8.00	0.056	76.5	30.6	12.2	42.0	45.8	Silty clay
زمین کشت نشده Uncultivated	0.21	5.66	8.41	0.007	105.4	7.3	55.6	19.8	24.6	Sandy clay loam

S-P: یک ردیفه، تازه کشت؛ S-R3: یک ردیفه، سومین باز-رویش؛ P-D: دو ردیفه تازه کشت؛ D-R1: دو ردیفه اولین باز-رویش؛ uncultivated: زمین کشت‌نشده (بایر)؛ S-P: one row, newly planted; S-R3: one row, the third ratoon; D-P: two rows, newly planted; D-R1: two rows, the first ratoon

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر مدیریت‌های مختلف کشت و سن گیاه بر کربن آلی، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در اراضی با ۵۰ سال سابقه کشت نیشکر

Table 2- Analysis of variance of the effect of different cultivation managements and plant age on organic carbon, MWD and GMD in lands with 50 years of sugarcane cultivation history

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی Df	Mean Squares				میانگین مربعات	
		کربن آلی SOC	کربن فعال Active C	تنفس پایه Basal Respiration	تنفس برانگیخته Induced Respiration	MWD	GMD
Block بلوک	2	0.0008 ^{ns}	21221.004 ^{ns}	0.0017*	0.1649*	0.2519 ^{ns}	0.0091 ^{ns}
Cultivation نوع کشت	4	0.0757**	468347.336**	0.024**	1.769**	0.8273**	0.0471**
Error خطا	8	0.0021	36190.161	0.0010	0.102	0.0696	0.0043
CV		9.6	27.67	21.02	17.74	18.53	6.64

ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و یک درصد

^{ns}, **, and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively.

جدول ۳- همبستگی ساده پیرسون بین ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

Table 3- Pearson's simple correlation between measured soil characteristics

	SOC	MWD	GMD	WSA 2	WSA 0.25	WSA 0.05	WSA-OC 0.05	WSA-OC 0.25	IR	BR	Active C
MWD	0.63*										
GMD	0.26 ^{ns}	0.60*									
WSA 2	-	-0.24 ^{ns}	0.04 ^{ns}								
WSA 0.25	0.71**	0.34 ^{ns}	0.04 ^{ns}	-0.77**							
WSA 0.05	0.50 ^{ns}	0.23 ^{ns}	0.25 ^{ns}	-0.55*	0.15 ^{ns}						
WSA-OC 0.05	0.85**	0.48 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.68**	0.71**	0.41 ^{ns}					
WSA-OC 0.25	0.63*	0.22 ^{ns}	0.32 ^{ns}	-0.74**	0.49 ^{ns}	0.72**	0.77**				
IR	0.66**	0.27 ^{ns}	0.11 ^{ns}	-0.63*	0.58*	0.32 ^{ns}	0.66**	0.42 ^{ns}			
BR	0.48 ^{ns}	0.65**	0.51 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.37 ^{ns}	-0.29 ^{ns}	0.46 ^{ns}	-0.09 ^{ns}	0.42 ^{ns}		
Active C	0.60*	0.67**	0.45 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	0.45 ^{ns}	-0.08 ^{ns}	0.53*	0.09 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.76**	
Sand	-0.54*	0.80**	-0.60*	0.16 ^{ns}	-0.34 ^{ns}	0.01 ^{ns}	-0.48 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.59*	-0.63*
Silt	0.73**	0.81**	0.52*	-0.36 ^{ns}	0.52*	0.13 ^{ns}	0.67**	0.37 ^{ns}	0.17 ^{ns}	0.64**	0.73**
Clay	0.16 ^{ns}	0.61*	0.56*	0.15 ^{ns}	0.03 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	0.42 ^{ns}	0.37 ^{ns}	0.40 ^{ns}

SOC: کربن آلی خاک؛ MWD: میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ GMD: میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها؛ WSA2: خاکدانه‌های پایدار در آب بین ۴ تا ۲ میلی‌متر؛ WSA0.25: خاکدانه‌های پایدار در آب بین ۲ تا ۰.۲۵ میلی‌متر؛ WSA 0.05: خاکدانه‌های پایدار در آب بین ۰.۲۵ تا ۰.۰۵۳ میلی‌متر؛ WSA-OC 0.05: کربن آلی خاکدانه‌های پایدار در آب بین ۰.۲۵ تا ۰.۰۵۳ میلی‌متر؛ WSA-OC 0.25: کربن آلی خاکدانه‌های پایدار در آب بین ۰.۲۵ تا ۰.۰۵۳ میلی‌متر؛ IR: تنفس برانگیخته؛ BR: تنفس پایه؛ Active C: کربن فعال، Sand: شن، Silt: سیلت و Clay: رس. ns، * و ** به ترتیب عدم معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال ۵ و یک درصد

SOC: Soil organic carbon; MWD: Mean weight diameter of soil aggregates; GMD: geometric mean diameter of soil aggregates; WSA 2: water stable aggregates, 4-2 mm; WSA 0.25: water stable aggregates, 2-0.25 mm; WSA 0.05: water stable aggregates, 0.25-0.053 mm; WSA-OC 0.05: organic carbon of water stable aggregates, 0.25-0.053 mm; WSA-OC 0.25: organic carbon of WSA 2: water stable aggregates, 2-0.25 mm; IR: Induced respiration; BR: Basal respiration and Active C: Active carbon.

^{ns}, ** and *: non-significant, significant at $p \leq 0.01$ and $p \leq 0.05$, respectively

خاک و تجزیه سریع‌تر ماده آلی خاک می‌شود (Bakker, 1999). افزون بر آن، نی‌های باز-رویش با رشد سریع‌تر از نی‌های تازه‌کشت، قادرند سطح زمین را بپوشانند. محققین نشان دادند که پوشش گیاهی از طریق توزیع مواد آلی از راه لاشبرگ و برگشت ریشه گیاهان و ترشحات ریشه باعث افزایش کربن آلی در خاک می‌شوند (Fattet et al., 2011). به هم خوردن خاک باعث تجزیه بیشتر و سریع‌تر بقایای گیاهی شده و کربن و نیتروژن موجود در ماده آلی خاک زودتر معدنی شده و در نتیجه ماده آلی سریع‌تر از دست می‌رود. عملیاتی نظیر هرس‌زنی و خاک‌دهی پای بوته، تجزیه ریشه‌های کلشی را آسان می‌کند، به نحوی که تجزیه ریشه‌های کلشی ممکن است به صورت موقت ماده آلی خاک را افزایش دهد (Gul & Whalen, 2022). ترشحات گیاهی در گام‌های گوناگون رشد گیاه و حضور ریشه گیاه در عمق سطحی خاک می‌تواند دگرگونی چشم‌گیری در کربن آلی خاک ایجاد نماید (Gul & Whalen, 2022). همچنین ساقه‌های نسوخته، مانده‌های کلش نسوخته و ریشه‌ها می‌تواند منبع مهمی از مواد آلی افزوده‌شده به خاک

جعفری و همکاران (Jafari et al., 2016) نیز با مقایسه زمین‌های کشت‌نشده و کشت نیشکر در منطقه کشت و صنعت کارون استان خوزستان، مشاهده کردند که کشت نیشکر به صورت چشمگیری باعث افزایش کربن آلی خاک شده است. مرادی و همکاران (Moradi et al., 2015) عنوان کردند پس از تبدیل کاربری زمین‌های کشت‌نشده به زمین‌های زیر کشت نیشکر در نیشکر هفت‌تپه استان خوزستان، دگرگونی شدیدی در مقدار ماده آلی حاصل شده و ماده آلی خاک‌ها به صورت معنی‌داری افزایش یافت.

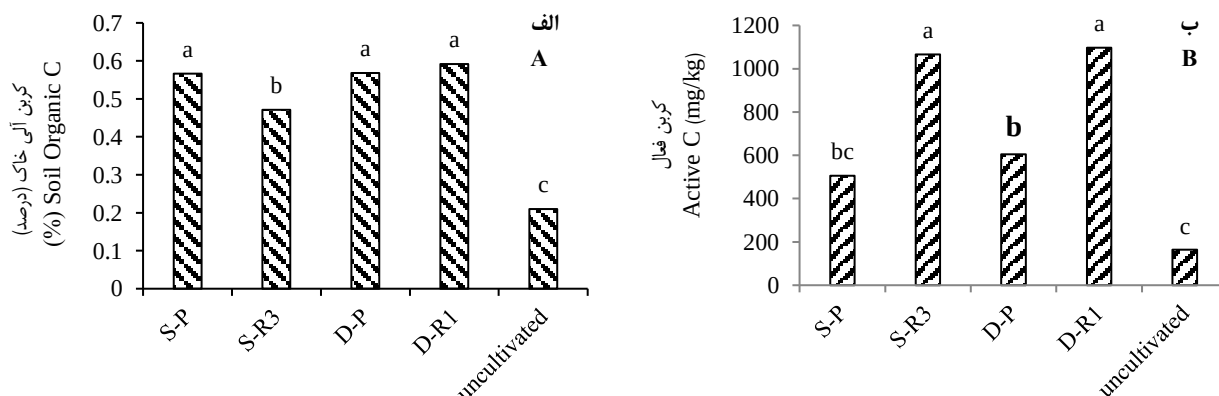
کشت‌های دوردیفه باعث افزایش کربن آلی نسبت به کشت یک ردیفه شده است، به نحوی که کشت دوردیفه نخستین باز-رویش با ۵۹ درصد بیشترین کربن آلی را داشت. کشت‌های دوردیفه به علت نگهداری باقیمانده‌های گیاهی روی سطح خاک دارای پوشش گیاهی و لاشبرگ بیشتری نسبت به کشت یک‌ردیفه بودند و به همین دلیل مقدار کربن آلی بیشتری نسبت به دیگر کشت‌ها داشتند؛ و همچنین با توجه به اینکه این سیستم نیاز به عملیات به روی پشته بردن^۱ دارد و این عملیات با هوادهی خاک، باعث آزاد شدن کربن آلی از توده‌های

با بافت سنگین‌تر دارند (Lee et al., 2023). بنابراین انتظار می‌رود که حداقل بخشی از کمبود کربن آلی خاک در زمین کشت‌نشده به دلیل بافت سبک‌تر خاک و در نتیجه ظرفیت کمتر آن برای نگهداشت کربن آلی باشد. اما در کشت دوردیفه تازه‌کشت (D-P) علی‌رغم بافت سبک‌تر خاک مقدار کربن آلی خاک با دیگر خاک‌ها تفاوت معنی‌داری ندارد (شکل ۱-الف). محققین معتقدند که در مناطق خشک به دلیل کمبود بازگشت بقایای گیاهی و دمای بالا کربن آلی خاک بیشتر و سریع‌تر از دیگر ویژگی‌ها تحت تأثیر مدیریت خاک قرار داشته و هر گونه تغییر در مدیریت کشت و کار می‌تواند تأثیر چشم‌گیری بر مقدار کربن آلی خاک داشته باشد (Azadi et al., 2021). بنابراین با تغییر مقدار ورودی کربن آلی خاک در کشت دوردیفه تازه‌کشت (D-P) مقدار کربن آلی خاک افزایش یافته است.

کربن فعال

کربن فعال که شامل تمام ترکیبات آلی قابل اکسید شدن از جمله مواد هیومیک و پلی‌ساکاریدها می‌باشند، ۵ تا ۳۰ درصد از کربن آلی خاک را تشکیل می‌دهد. مقدار کربن فعال در میان کشت‌ها، تفاوت آماری معنی‌داری داشتند ($P < 0.001$) (جدول ۲)، و کربن فعال در کشت دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) و یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) به صورت معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود (شکل ۱-ب). بیشتر بودن این شناسه در این کشت بیانگر وجود بقایای گیاهی بیشتر و تجزیه کمتر و انتشار CO_2 کمتر به اتمسفر می‌باشد (Alvaro-Fuentes et al., 2008; Salinas-Garcia et al., 2002).

باشد. در مزارع نیشکر علی‌رغم سوزاندن بقایای گیاهی و خروج ساقه‌های قابل آسیاب از خاک، ریشه‌ها و طوقه‌ها هر ساله به خاک اضافه می‌شوند. این منبع ماده آلی که حدود ۴۰٪ وزن ساقه‌های قابل آسیاب می‌باشند، سالانه حجم عظیمی از ماده آلی به خاک اضافه می‌کند (Jafari et al., 2005). پژوهش‌ها نشان از کاهش ماده آلی خاک پس از آتش‌سوزی دارند که می‌تواند وابسته به سوختن پوشش گیاهی و کم شدن ورودی سالانه ماده آلی در اراضی سوخته شده باشد (Luca et al., 2018). به نظر می‌رسد سوزاندن مانده‌هایی گیاهی نیشکر در زمان برداشت نیشکر و آماده‌سازی زمین برای کشت تازه نیشکر در کشت‌های S-P و D-P سبب کاهش ماده آلی خاک در این کشت‌ها بوده و این امر باعث کاهش کربن آلی کل و به تبع آن کاهش کربن فعال در خاک شده است. بررسی همبستگی کربن آلی خاک با دیگر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده (جدول ۳) نیز نشان‌دهنده تأثیر معنی‌دار کربن آلی خاک بر سایر ویژگی‌ها از جمله کربن فعال و پایداری خاکدانه‌ها است. در پژوهش حاضر بافت خاک در برخی خاک‌ها متفاوت بوده و در زمین کشت‌نشده و کشت دوردیفه تازه‌کشت (D-P) مقدار رس خاک بسیار کمتر از خاک‌های دیگر بود (جدول ۱). همچنین بررسی همبستگی بین ویژگی‌های خاک (جدول ۳) نیز نشان داد که رابطه معنی‌داری بین کربن آلی و مقدار رس خاک وجود ندارد اما رابطه مثبت و معنی‌داری با مقدار سیلت خاک مشاهده گردید. محققین نشان داده‌اند که ظرفیت خاک برای نگهداری کربن آلی خاک به بافت خاک وابسته بوده و خاک‌های با بافت سبک‌تر ظرفیت کمتری برای ذخیره کربن آلی و همچنین زمان بازگشت کربن آلی سریع‌تری نسبت به خاک‌های



شکل ۱- اثر مدیریت‌های مختلف کشت نیشکر در اراضی با سابقه کشت طولانی بر الف) کربن آلی و ب) کربن فعال خاک

S-P: یک‌ردیفه، تازه‌کشت؛ S-R3: یک‌ردیفه، سومین باز-رویش؛ D-P: دوردیفه تازه‌کشت؛ D-R1: دو ردیفه اولین باز-رویش؛ uncultivated: زمین کشت‌نشده (بایر)؛ میانگین‌هایی که حداقل در یک حروف مشترک هستند، بر اساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 1- The effect of different managements of sugarcane cultivation in lands with a long history of cultivation on A) organic carbon and b) soil active carbon

S-P: one row, newly planted; S-R3: one row, the third ratoon; D-P: two rows, newly planted; D-R1: two rows, the first ratoon; Means that have at least one letter in common do not have a significant difference at the 5% probability level based on the LSD test.

زمین‌های تازه کشت ممکن است به علت عملیات آماده‌سازی زمین برای کشت باشد. کشت یک‌ردیفه تازه کشت دارای بافت رسی و سنگین می‌باشد ممکن است علت کاهش تنفس پایه در این کشت باشد. همبستگی معنی‌دار و مثبتی بین تنفس پایه و میانگین قطر خاکدانه‌ها دیده می‌شود (جدول ۳) که می‌تواند به دلیل تهویه بهتر در خاک‌های با خاکدانه‌های درشت‌تر باشد. به‌طور کلی مشخص شده که بازچرخش مواد آلی و فعالیت میکروبی در خاک‌های با بافت ریز کمتر از خاک‌های با بافت درشت است (Lee et al., 2023).

هر چند گزارش شده است که جمعیت و فعالیت میکروبی در خاک‌های شخم نخورده نسبت به خاک‌های زیر کشت، بیش‌تر است (Gul & Whalen, 2022) ولی کمترین مقدار تنفس پایه در زمین‌های کشت‌نشده مشاهده شد. مقدار پوشش گیاهی، رطوبت و ماده آلی کمتر (۲۱٪ درصد) در این خاک بر فعالیت ریزجانداران نقش مؤثری داشته و با افزایش کشت و کار و به دنبال آن افزایش پوشش و بقایای گیاهی در اثر کشت آبی و افزایش کربن آلی خاک مقدار فعالیت میکروبی در دیگر خاک‌ها افزایش یافته است (Gul & Whalen, 2022; Zheng et al., 2023).

تنفس برانگیخته با بستره

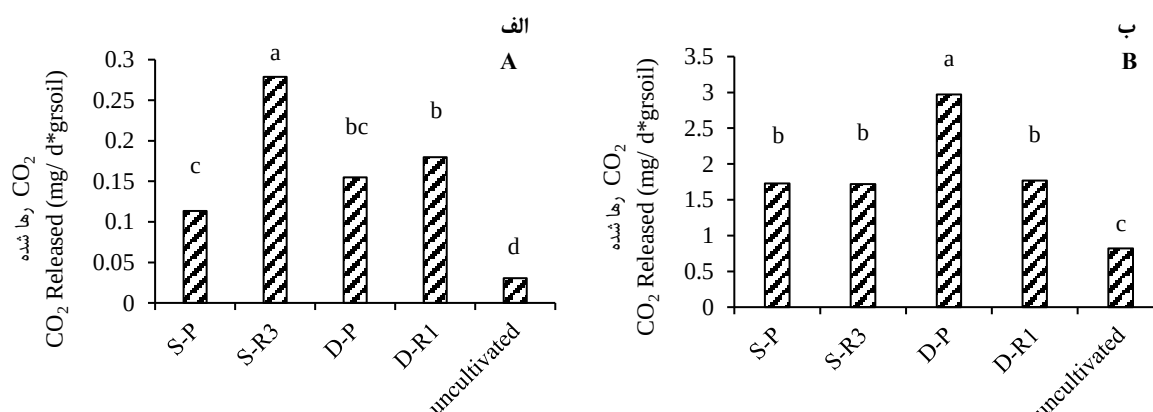
تنفس برانگیخته در میان انواع کشت تفاوت معنی‌داری در سطح احتمال آماری ۰/۰۱ داشت (جدول ۲). این شناسه در کشت D-P به گونه معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود (شکل ۲-ب). تفاوت معنی‌داری بین کشت‌های یک‌ردیفه تازه کشت (S-P)، یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) و دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) مشاهده نشد. مقدار تنفس برانگیخته در خاک دست‌نخورده به گونه معنی‌داری کمتر از دیگر کشت‌ها بود (شکل ۲-ب)؛ در زمین کشت‌نشده (بایر) مقدار لاشبرگ و ماده آلی کمترین مقدار (۲۱٪ درصد) بود در حالی که بیشترین مقدار تنفس برانگیخته مربوط به کشت دوردیفه با ریشه‌های متراکم و تراکم گیاهی بیشتر بود. تنفس برانگیخته با بستره، را می‌توان شناسه‌ای بسیار شایسته از زی‌توده ریزجانداران در خاک معرفی کرد. این ویژگی یکی از شناسه‌های پایه برای برآورد کمی زی‌توده میکروبی خاک به‌عنوان بخش بسیار فعال و ناپایدار کربن آلی خاک است. همبستگی معنی‌دار تنفس برانگیخته با کربن آلی خاک و خاکدانه‌ها (جدول ۳) نیز مؤید ارتباط زی‌توده میکروبی خاک و کربن آلی خاک است. توانایی خاک برای تولید CO₂ (تنفس) از بستره‌های متنوع ممکن است نشانگر یک جامعه میکروبی فعال و پویا باشد (Sawada et al., 2017). محققین، فراوانی جمعیت میکروبی بیشتری را در خاک‌های دارای سیستم ریشه‌ای متراکم‌تر نسبت به خاک‌های فاقد گیاه و سیستم ریشه‌ای گزارش کرده‌اند (Gul & Whalen, 2022).

بلر و همکاران (Blair et al., 1995) گزارش کردند که نسوزاندن بقایای نیشکر هیچ دگرگونی معنی‌داری در کربن آلی کل در افق ۷/۵-۰ سانتی‌متری ایجاد نمی‌کند، درحالی‌که مدیریت زراعی مختلف می‌تواند کربن فعال خاک را به شکل چشم‌گیری تغییر دهد. ویل و همکاران (Weil et al., 2003) نیز نشان دادند کربن فعال نسبت به کربن کل به عملیات مدیریتی حساسیت بیشتری دارد. در کشت‌های دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) مانده‌های گیاهی به خاک باز می‌گردد بنابراین مقدار مواد آلی در این نوع کشت زیادتر بوده (کربن کل ۵۹٪ درصد) و مقدار کربن فعال نیز بیشتر است. در کشت S-R3 به علت بیشتر بودن سن گیاه، زی‌توده ریشه و به دنبال آن ترشحات ریشه قابل توجه است و بقایای حاصل از این نوع کشت نیز حجم بالایی دارند بنابراین ترکیبات آلی پویا و ناپایدار آنها زیاد و در نتیجه مقدار کربن فعال در این کشت نیز زیاد است. به‌طور کلی مقدار کربن فعال در مناطق با اندوخته کربن آلی بالا، بیشتر است (Blair et al., 1995; Weil et al., 2003). در این پژوهش نیز کربن آلی خاک و کربن فعال همبستگی نسبتاً خوب و معنی‌داری در سطح ۵ درصد نشان داشتند (جدول ۳). بنابراین کربن فعال می‌تواند شناسه بهتری نسبت به کربن آلی خاک کشتزارها باشد.

تنفس پایه

اثر نوع کشت بر تنفس پایه در سطح احتمال آماری ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۲). مقدار میانگین تنفس پایه در کشت یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) به گونه معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود (شکل ۲-ب). مقدار تنفس پایه در زمین کشت‌نشده کمتر از دیگر کشت‌ها بود. این خاک دارای مقدار لاشبرگ و ماده آلی (۲۱٪ درصد) کمتری نیز بود (شکل ۱-الف).

مقدار بقایایی گیاهی و کربن آلی (۵۶٪ درصد) در کشت S-R3 زیاد است. یک بخش مهم از تنفس خاک به تجزیه بقایای گیاهی نسبت داده می‌شود، بنابراین تنفس پایه خاک با برداشت بقایا، کاهش و با افزایش بقایای گیاهی افزایش می‌یابد (Gul & Whalen, 2022). در کشت S-R3 به علت بیشتر بودن سن گیاه، زی‌توده ریشه و فراهمی کربن پویا برای ریشه و میکروب‌ها افزایش می‌یابد، که در نتیجه آن، فعالیت میکروبی زیادی دارند. مواد آلی خاک تحت تأثیر ریز جانداران دگرگون شده و تجزیه می‌شود. میان مواد آلی و ریز جانداران خاک وابستگی نزدیکی وجود دارد، زیرا مواد آلی خاک یک انبار انرژی برای فرایندهای سوخت‌وساز ریز جانداران می‌باشد. ریز جانداران با اکسیداسیون کربن آلی از آن انرژی می‌گیرند. فرآورده پایانی تجزیه ماده آلی، دی‌اکسید کربن و آب است. هنگامی که ماده آلی خاک تجزیه می‌شود، عناصر غذایی مورد نیاز گیاهان، فراهم‌تر می‌شوند (Gul & Whalen, 2022; Lee et al., 2023). رهاسازی دی‌اکسید کربن از خاک، نشان از تجزیه بالای مواد آلی در خاک دارد. تنفس پایه کم در



شکل ۲- اثر مدیریت‌های مختلف کشت نیشکر در اراضی با سابقه کشت طولانی بر الف) تنفس پایه و ب) تنفس برانگیخته

S-P: یک ردیفه، تازه کشت؛ S-R3: یک ردیفه، سومین باز-رویش؛ P-D: دو ردیفه تازه کشت؛ D-R1: دو ردیفه اولین باز-رویش؛ uncultivated: زمین بایر؛ میانگین‌هایی که حداقل در یک حروف مشترک هستند، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 2- The effect of different managements of sugarcane cultivation in lands with a long history of cultivation on A) Basal respiration and B) Induced respiration

S-P: one row, newly planted; S-R3: one row, the third ratoon; D-P: two rows, newly planted; D-R1: two rows, the first ratoon; Means that have at least one letter in common do not have a significant difference at the 5% probability level based on the LSD test.

همبستگی خوب و معنی‌داری نشان داد (جدول ۳). کشت S-P به علت خاک‌ورزی عملیات کشت نیشکر، روی پشته بردن و خاک کشت‌نشده به دلیل کم بودن ماده آلی میانگین وزنی قطر خاکدانه کمی داشتند. کشت S-R3 دارای لاشبرگ و زی‌توده گیاهی زیادی نسبت به دیگر کشت‌ها بود. همچنین به دلیل زیادتر بودن سن گیاه در این کشت، نشر مواد ریشه‌ای و میکروبی افزایش می‌یابد که این مواد سبب افزایش خاکدانه‌سازی می‌شوند (Gul & Whalen, 2022). محققین معتقدند که کمبود و یا کاهش ماده آلی، سبب کاهش اندازه خاکدانه‌ها، تخریب آن‌ها و در نتیجه، حساسیت خاک به فرسایش می‌شود (Boix-Fayos et al., 2001). همچنین محققین نشان دادند که با افزایش مواد آلی در خاک، پایداری خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها افزایش می‌یابد (Halder et al., 2023; Ghorbani et al., 2013; Jafari et al., 2016). براساس طبقه‌بندی ارائه شده به‌وسیله محققین برای شاخص MWD، خاک بایر با مقدار MWD کمتر از ۰/۴ میلی‌متر در دسته خاک‌های بسیار ناپایدار و دارای سله سطحی و بقیه خاک‌ها با MWD کمتر از ۰/۸ میلی‌متر در دسته ناپایدار قرار می‌گیرند (Le Bissonnais, 1996). بر این اساس هیچکدام از خاک‌های مورد بررسی در دسته با ساختمان پایدار قرار نمی‌گیرند.

میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها

میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در کشت‌های مختلف در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۲). مقدار این شناسه در کشت‌های

هر گونه اندوخته و معدنی‌شدن کربن ملزم به فعالیت‌های میکروبی و انتشار کربن به‌صورت تنفس خاک می‌باشد. کشت S-R3 باوجود اینکه مقدار تنفس پایه بالای داشت (شکل ۲-الف)، مقدار تنفس برانگیخته کمتری داشت در حالی که در کشت D-P، مقدار تنفس برانگیخته بیشتر و مقدار تنفس پایه کمتر بود (شکل ۲). تفاوت مشاهده شده در این خاک‌ها می‌تواند به دلیل تنوع در نوع بستره یا کربن آلی خاک، دشواری دسترسی به کربن آلی، تنوع جوامع میکروبی و استراتژی آنها باشد (Ali et al., 2018; Gul & Whalen, 2022).

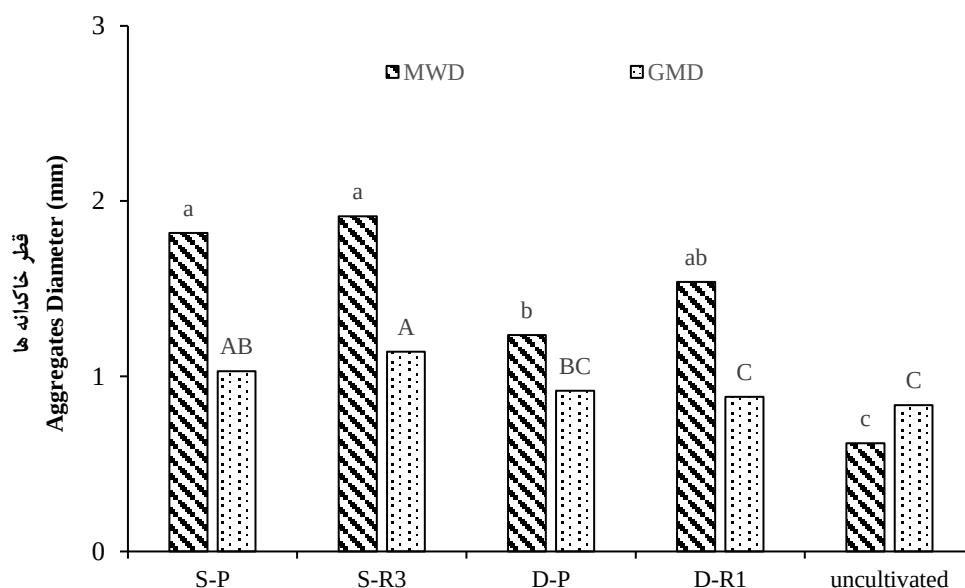
میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD)

میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در میان زمین‌های با سابقه کشت طولانی مدت در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۲). میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها در کشت‌های یک ردیفه سومین باز-رویش (S-R3)، یک ردیفه تازه کشت (S-P) و دو ردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) به‌طور معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود (شکل ۳). زمین کشت‌نشده کمترین میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها را داشت. کم بودن میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها بیانگر ناپایداری ساختمان خاک و از پیامدهای خاک‌ورزی‌های پیای و محتوای پایین ماده آلی خاک‌ها است. افزایش عملیات خاک‌ورزی با کاهش کربن آلی خاک، سبب کاهش پایداری خاکدانه‌ها شده و پایداری ساختمان خاک را کاهش می‌دهد (Zheng et al., 2023). در این مطالعه میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها همبستگی معنی‌داری با کربن آلی خاک نداشت، اما با کربن فعال

درصد خاکدانه‌های پایدار

تفاوت در درصد خاکدانه‌های پایدار برای کلاس‌های گوناگون خاکدانه‌ای (سری الک‌ها) در کشت‌های یک‌ردیفه تازه‌کشت (S-P) و دوردیفه تازه‌کشت (D-P) و دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۲). در کشت‌های S-P، D-P و D-R1 درصد خاکدانه‌های ۰/۲۵-۰/۲۵ میلی‌متر به گونه معنی‌داری بیشتر از دیگر اندازه‌ها بود (شکل ۴-الف)؛ در کشت‌های S-P و D-P خاکدانه‌های بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر با ۰/۲۵-۰/۰۵۳ میلی‌متر تفاوت معنی‌داری داشت و به گونه معنی‌داری کمتر از دیگر اندازه‌ها بود. در این کشت‌ها به علت عملیات کشاورزی خاکدانه‌های بزرگ به خاکدانه‌های کوچک‌تر می‌شکنند و از طرف دیگر به علت ماده آلی کم و همچنین سوزاندن بقایا برای برداشت نیشکر، ایجاد خاکدانه بزرگ کمتر می‌شود (Halder et al., 2023). حداقل درصد ماده آلی برای پایداری مطلوب خاکدانه‌ها میان ۲ تا ۴ درصد گزارش شده است (Le Bissonnais, 1996). در کشت D-P به علت مقدار رس کمتر، خاکدانه‌ها کوچک هستند.

یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) و یک‌ردیفه تازه کشت (S-P) تفاوت معنی‌داری نداشت و به‌طور معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود. میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها در کشت‌های دوردیفه تازه‌کشت (D-P)، دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) و زمین کشت‌نشده تفاوت معنی‌داری نداشت و کشت D-R1 و کشت‌نشده به‌طور معنی‌داری مقدار میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها کمتری نسبت به دیگر کشت‌ها داشتند (شکل ۳). میانگین هندسی قطر ذرات یکی از شناسه‌های پایداری خاکدانه‌ها است، که اندازه‌های بزرگ‌تر آن بیان‌کننده پایداری بیشتر خاک بوده و ارتباط خوبی بین آن و مقدار کربن آلی (جدول ۳) و مدیریت شخم مشاهده شده است (Halder et al., 2024; Mikha et al., 2024). در کشت D-P با افزایش عملیات خاک‌ورزی میانگین هندسی قطر خاکدانه‌ها کاهش یافته است که این موضوع احتمالاً به دلیل کاهش ماده آلی خاک و در نتیجه کاهش عامل سیمان‌کنندگی خاک با افزایش خاک‌ورزی خاک است (Mikha et al., 2024; Nath & Lal, 2017).



شکل ۳- اثر مدیریت‌های مختلف کشت نیشکر در اراضی با سابقه کشت طولانی بر میانگین وزنی (MWD) و هندسی (GMD) قطر خاکدانه‌ها
S-P: یک‌ردیفه، تازه کشت؛ S-R3: یک‌ردیفه، سومین باز-رویش؛ P-D: دو ردیفه تازه کشت؛ D-R1: دو ردیفه اولین باز-رویش؛ uncultivated: زمین بایر؛ میانگین‌هایی که حداقل در یک حروف مشترک هستند، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند. حروف کوچک، مقایسه میانگین‌های MWD و حروف بزرگ، مقایسه میانگین‌های GMD در بین انواع کشت را نشان می‌دهد.

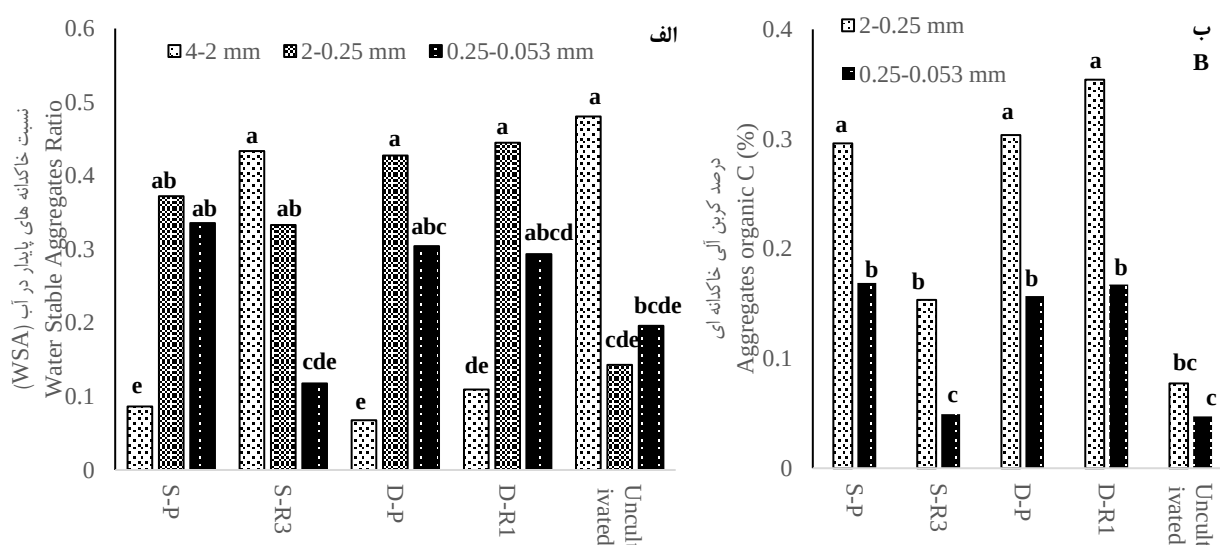
Figure 3- The effect of different managements of sugarcane cultivation in lands with a long history of cultivation on MWD and GMD

S-P: one row, newly planted; S-R3: one row, the third ratoon; D-P: two rows, newly planted; D-R1: two rows, the first ratoon; Means that have at least one letter in common do not have a significant difference at the 5% probability level based on the LSD test. Small letters show the comparison of the averages of MWD and capital letters show the comparison of the averages of GMD among the cultivation.

زمانی که مقدار ذرات ریز خاک شامل رس به علاوه سیلت زیاد باشد، افزایش هدایت الکتریکی خاک مایه ضعیف شدن ساختمان خاک می شود. کریستیانسن و همکاران (Kristiansen et al., 2006) نشان دادند که با افزایش مقدار رس، جزء خاکدانه های پایدار کمتر از ۱ میلی متر کاهش و خاکدانه های پایدار بیش تر از ۲ میلی متر افزایش یافت. تفاوت در درصد خاکدانه های پایدار برای کلاس های گوناگون خاکدانه ای در کشت یک رديفه سومین باز-رویش (S-R3) و زمین کشت نشده در سطح آماری ۰/۰۵ معنی دار شد. در کشت S-R3 و زمین کشت نشده درصد خاکدانه های پایدار در اندازه خاکدانه های بزرگ تر از ۲ و ۲-۰/۲۵ (میلی متر) تفاوت معنی داری باهم نداشتند و اندازه خاکدانه های بزرگ تر از ۲ و ۲-۰/۲۵ (میلی متر) به طور معنی داری بیشتر از اندازه خاکدانه ۰/۰۵۳-۰/۲۵ میلی متر بودند (شکل ۴-الف). کشت S-R3 دارای پوشش گیاهی خوب و همچنین ریشه های زیاد می باشد که سبب افزایش ترشحات ریشه ای می شوند که عامل ایجاد خاکدانه های بزرگ هستند (Halder et al., 2023; Gul & Whalen, 2022). توزیع اندازه خاکدانه ها تحت تأثیر مواد آلی و مانده های گیاهی قرار می گیرد. بررسی همبستگی بین پایداری خاکدانه ها نیز نشان دهنده همبستگی معنی دار کربن آلی خاک و خاکدانه های بین ۰/۰۵۳ تا ۲ میلی متر است (جدول ۳). زیاد بودن درصد خاکدانه های پایدار بزرگ در این کشت به سیستم ریشه ای نیشکر ارتباط دارد. انگرز (Angers, 1998) بیان کرد که سیستم ریشه ای ذرت به دلیل نحوه نفوذ در خاک با ریشه های زائد و افشان خود باعث تجمع خاکدانه ها می شود. ریشه ها و ترشحات آن منبع غذایی مناسبی برای ریزجانداران است و مواد چسبنده ساخته شده توسط ریزجانداران و ریزجانداران مرده سبب ایجاد خاکدانه های بزرگ می گردند (Angers, 1998; Gul & Whalen, 2022). خاک کشت نشده به علت پوشش گیاهی و مواد آلی کم، خاکدانه سازی کمتری دارد.

درصد خاکدانه های پایدار در بخش اندازه ای ۴-۲ میلی متر در بین کشت های مختلف دارای تفاوت معنی دار در سطح آماری ۰/۰۱ بود (شکل ۴-الف). این مقدار در کشت های D-R1 و S-R3 به طور معنی داری بیشتر از دیگر کشت ها بود. کشته ای D-P، S-P و زمین کشت نشده با کمترین مقدار پایداری خاکدانه در بخش ۴-۲ میلی متر در یک گروه آماری قرار گرفتند. (شکل ۴-الف). در کشت های D-R1 و S-R3 به علت کشت باز-رویش، زی توده ریشه بیشتر می باشد. سیستم های ریشه ای مختلف بسته به ویژگی های ریشه، ترشحات و عملکرد ریشه، اثر متفاوتی روی خاکدانه سازی دارند. ریشه های فیبری سطوح بالای خاکدانه های بزرگ را ایجاد می کنند. ریشه گیاهان لگوم به علت زی توده میکروبی بالا، خاکدانه سازی و خاکدانه های پایدار نسبت به گیاهان

غیر لگوم بیشتر افزایش می دهند. پایداری خاکدانه در غیر لگوم ها وابسته به حجم ریشه است (Haynes & Beare, 1997; Wang et al., 2023). درصد خاکدانه های پایدار ۲-۰/۲۵ میلی متر در بین کشت های مختلف دارای تفاوت معنی دار در سطح آماری ۰/۰۵ بود. این مقدار در کشت های S-P، S-R3 و D-P تفاوت معنی داری نداشت و به طور معنی داری بیش از دیگر کشت ها بود. زمین کشت نشده و D-R1 با کمترین مقدار پایداری خاکدانه در بخش ۲-۰/۲۵ میلی متر در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۴-الف). درصد خاکدانه های پایدار ۰/۰۵۳-۰/۲۵ میلی متر در بین کشت های مختلف دارای تفاوت معنی دار در سطح آماری ۰/۰۵ بود. مقدار این خاکدانه ها در کشت های D-P، S-P و D-R1 به طور معنی داری بیش از دیگر کشت ها بود. کشت S-R3 و زمین کشت نشده با کمترین مقدار پایداری خاکدانه در بخش ۰/۰۵۳-۰/۲۵ میلی متر در یک گروه آماری قرار گرفتند (شکل ۴-ب). محققین نیز به طور مشابهی دریافتند که توزیع اندازه ذرات در سیستم های مختلف کشت متفاوت است (Halder et al., 2023; Mikha et al., 2024). به دلیل تفاوت در ویژگی های خاک ها، توزیع اندازه ذرات و پایداری خاکدانه متفاوت است (Angers, 1998). هدایت الکتریکی در اکثر نقاط در هر چهار مزرعه مورد مطالعه مقادیری کمتر از یک دسی زیمنس بر متر دارند، لذا در گروه خاک های غیر شور قرار می گیرند. هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته و نسبت جذب سدیم (SAR) نیز جزء فاکتورهای اصلی کنترل کننده پراکنش/همآوری رس ها می باشند. مقادیر EC کم و SAR زیاد سبب تورم و پراکنش رس ها و تخریب ساختمان خاک می گردند (Angers, 1998). اثر مثبت EC بر MWD به دلیل نقش نمک های محلول در هم آوری ذرات اولیه و ایجاد و پایداری خاکدانه ها (ذرات ثانویه) می باشد. کاتیون های دو ظرفیتی (معمولاً Ca^{+2}) با جانشینی Na^{+} سبب افزایش EC محلول خاک، کاهش ضخامت لایه ی دوگانه ی پخشیده هم آوری رس ها و افزایش پایداری خاکدانه ها می شوند (Amézketa, 1999). شوری و سدیمی بودن دو خصوصیت مهم شیمیایی تخریب کننده خصوصیات فیزیکی خاک های مناطق خشک است. افزایش سدیم تبادل باعث تمایل ذرات رس به پراکنده شدن و در نتیجه تخریب خاکدانه ها و از دست رفتن ساختمان خاک می گردد.



شکل ۴- اثر مدیریت‌های مختلف کشت نیشکر در اراضی با سابقه کشت طولانی بر الف) نسبت خاکدانه‌های پایدار در آب و ب) کربن آلی خاکدانه‌ها

S-P: یک ردیفه، تازه کشت؛ S-R3: یک ردیفه، سومین باز-رویش؛ D-P: دو ردیفه تازه کشت؛ D-R1: دو ردیفه اولین باز-رویش؛ uncultivated: زمین بایر؛ میانگین‌هایی که حداقل در یک حروف مشترک هستند، براساس آزمون LSD اختلاف معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد ندارند.

Figure 4- The effect of different managements of sugarcane cultivation in lands with a long history of cultivation on A) Water stable aggregates ratio and b) Aggregates organic carbon

S-P: one row, newly planted; S-R3: one row, the third ratoon; D-P: two rows, newly planted; D-R1: two rows, the first ratoon; Means that have at least one letter in common do not have a significant difference at the 5% probability level based on the LSD test

در (al., 2023). مقدار کربن در درشت‌خاکدانه‌ها (۲-۲۵ میلی‌متر) در میان کشت‌های گوناگون تفاوت معنی‌داری در سطح آماری ۰/۰۱ داشت. کشت‌های D-R1، S-P و D-P بیشترین و کشت S-R3 و زمین کشت‌نشده کمترین مقدار کربن درشت‌خاکدانه‌ای را داشتند (شکل ۴-ب). مقدار کربن ریزخاکدانه‌ها (۰/۲۵-۰/۵۳ میلی‌متر) در میان کشت‌های گوناگون تفاوت معنی‌داری در سطح آماری ۰/۰۱ داشت (جدول ۲). بیشترین مقدار کربن آلی در بخش ریزخاکدانه‌ها در کشت‌های D-R1، S-P و D-P مشاهده شد؛ در زمین کشت‌نشده، این شناسه به حداقل مقدار خود رسیده است (شکل ۴-ب). در کشت D-R1 در هر دو بخش درشت و ریزخاکدانه‌ها، مقدار کربن آلی بیشتری نسبت به دیگر کشت‌ها داشت. عملیات شخم و زیرشکنی کشت‌های باز-رویش سبب شکستن خاکدانه‌ها و از دست رفتن کربن طی تجزیه میکروبی می‌شود (Zheng et al., 2023).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تأثیر کشت و کار مکانیزه و طولانی مدت نیشکر بر برخی از خصوصیات فیزیکی خاک در تعدادی از اراضی تحت کشت نیشکر با سابقه بهره‌برداری ۵۰ سال در عمق ۳۰-۰ سانتی‌متری خاک بررسی شد. کشت‌های دوردیفه باعث افزایش مقدار کربن آلی نسبت به

کربن خاکدانه‌ای

در کشت‌های S-P، D-P، D-R1 و زمین کشت‌نشده کربن آلی خاکدانه‌های ۲-۲۵ میلی‌متر (درشت‌خاکدانه‌ها) به گونه معنی‌داری بیش از کربن آلی ریزخاکدانه‌ها (۰/۲۵-۰/۵۳ میلی‌متر) اندازه‌گیری شد (شکل ۴-ب). در مقابل، در کشت S-R3، تفاوتی میان کربن آلی درشت‌خاکدانه‌ها و ریزخاکدانه‌ها مشاهده نشد. در بیشتر کشت‌ها، به جز S-R3، مقدار کربن آلی در درشت‌خاکدانه‌ها بیشتر بود. افزایش کربن آلی در این بخش از اندازه خاکدانه‌ها در کشتزارهای نیشکر می‌تواند ناشی از ورود پسماندهای گیاهی تازه و درشت (بزرگ‌تر از نظر اندازه و حجم) باشد (Halder et al., 2023; Mikha et al., 2024). مواد آلی به گونه یکسان و یک اندازه در خاکدانه‌ها توزیع نشده‌اند. بر پایه بررسی‌های (Six et al., 2002) مواد آلی تازه بیشتر در خاکدانه‌های درشت (۲-۲۵ میلی‌متر) قرار گرفته و مواد آلی موجود در خاکدانه‌های ریز (۰/۲۵-۰/۵۳ میلی‌متر) شامل مواد آلی تجزیه‌شده‌ای است که سبب پایداری این خاکدانه‌ها می‌شود. اما مطالعات جدیدتر نشان داده‌اند که اهمیت ساختار میکروبی در خاکدانه‌سازی بیشتر بوده و در خاک‌هایی که مواد آلی تازه بیشتری دریافت کرده و فعالیت قارچ‌های سیلیوم دار بیشتر است خاکدانه‌های پایدارتری نیز مشاهده می‌شود (Ali et al., 2018; Gul & Whalen, 2022; Mikha et al., 2024; Wang et

نشده به دلیل پایین بودن درصد ماده آلی و همچنین بافت لوم رس شنی، خاکدانه‌سازی کمتری دارند. بیشترین درصد خاکدانه‌های درشت و خاکدانه‌های ریز در یک‌ردیفه تازه کشت و دوردیفه تازه کشت مشاهده شد. بیشترین درصد خاکدانه‌های متوسط در کشت‌های یک‌ردیفه تازه کشت، دوردیفه تازه کشت و دو ردیفه اولین باز-رویش مشاهده شد. بیشترین کربن آلی خاکدانه‌ای در خاکدانه‌های درشت در کشت‌های دوردیفه دومین باز-رویش، دوردیفه تازه کشت و یک‌ردیفه تازه کشت شده مشاهده شد. در مجموع به علت میزان کم ماده آلی خاک که عمدتاً ناشی از سوزاندن هر ساله‌ی ساقه سبز نیشکر می‌باشد، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب در برخی از کشتزارهای مورد بررسی مناسب نبود. بنابراین پیشنهاد می‌شود با برگرداندن بقایای گیاهی بعد از برداشت، به میزان قابل توجهی مشکلات ناپایداری خاکدانه‌ها و پیامدهای زیانبار مرتبط با این عوامل را بهبود بخشید.

کشت یک‌ردیفه شد، به طوری که کشت دوردیفه نخستین باز-رویش بیشترین مقدار کربن آلی را داشت. کربن فعال در کشت دوردیفه نخستین باز-رویش (D-R1) و یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) به صورت معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود. به نظر می‌رسد سوزاندن مانده‌هایی گیاهی نیشکر در زمان برداشت نیشکر و آماده‌سازی زمین برای کشت تازه نیشکر در کشت‌های S-P و D-P سبب کاهش ماده آلی خاک در این کشت‌ها بوده و این امر باعث کاهش کربن آلی کل و به تبع آن کاهش کربن فعال در خاک شده است. مقدار تنفس پایه در کشت یک‌ردیفه سومین باز-رویش (S-R3) و تنفس برانگیخته در کشت D-P به گونه معنی‌داری بیشتر از دیگر کشت‌ها بود. کشت S-R3 دارای لاشبرگ و زی‌توده زیادی نسبت به دیگر کشت‌ها بود و از طرف دیگر با بالا بودن سن گیاه، نشر مواد ریشه‌ای و میکروبی افزایش می‌یابد که این مواد سبب افزایش خاکدانه سازی می‌شوند. کشت S-P به علت خاک‌ورزی عملیات کشت نیشکر و زمین کشت

References

1. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. Academic Press Harcourt Brace & Company Publishers London, 214–215 p.
2. Ali, R.S., Kandeler, E., Marhan, S., Demyan, M.S., Ingwersen, J., Mirzaeitalarposhti, R., Rasche, F., Cadisch, G., & Poll, C. (2018). Controls on microbially regulated soil organic carbon decomposition at the regional scale, *Soil Biology and Biochemistry*, 118, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.12.007>
3. Alvaro-Fuentes, J., Lopez, M.V., Arrue, J.L., & Cantero-Martinez, C. (2008). Management effects on soil carbon dioxide fluxes under semiarid Mediterranean conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 194–200. <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0310>
4. Amézqueta, E. (1999). Soil aggregate stability: A review. *Journal of Sustainable Agriculture*, 14, 83–151. https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08
5. Anderson, J.P.E. (1982). *Soil respiration*. pp. 831–871. In: Page, A.L., Keeney, D. R., Baker, D.E., Miller, R.H., Ellis, R. Jr., Rhoades, J.D. (Eds.), *Methods of soil analysis, Part 2- Chemical and Microbiological Properties*. ASA-SSSA, Madison, Wisconsin, USA. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c41>
6. Angers, A.D. (1998). Water stable aggregation of Quebec silty clay soils: some factors controlling its dynamics. *Soil and Tillage Research*, 47, 91–96. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00077-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00077-4)
7. Azadi, A., Seyed Jalali, S.A., Dehghan, R., & Navidi, M. (2021). Investigation of changes in physical and chemical properties of soil during different stages of sugarcane growth and estimation of organic carbon sequestration capacity, *Iranian Journal of Soil Research*, 35(3), 269–286. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2021.354244.600>
8. Bakker, M. (1999). *Sugarcane Cultivation and Management*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-4725-9>
9. Barzegar, A.R., Asoodar, M.A., & Ansari, M. (2000). Effectiveness of sugarcane residue incorporation at different water contents and the Proctor compaction loads in reducing soil compactibility. *Soil and Tillage Research*, 57, 167–172. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00158-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00158-6)
10. Blair, G.J., Lefroy, R.D.B., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46(7), 1459–1466. <https://doi.org/10.1071/AR9951459>
11. Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Imeson, A.C., & Soriano-Soto, M.D. (2001). Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators, *Catena*, 44, 47–67. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00176-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00176-4)
12. Bronick, C.J., & Lal, R. (2005). Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio. USA, *Soil and Tillage Research*, 81, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.011>
13. Cheng, M., Xiang, Y., Xue, Zh., An, Sh., & Darboux, F. (2015). Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. *Catena*, 124, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.09.006>

14. Fattet, M., Fu, Y., Ghestem, M., Ma, W., Foulonneau, M., Nespoulous, J., Bissonnais, Y.L., & Stokes, A. (2011). Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength. *Catena*, 87, 60-69. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.006>
15. Ghorbani, Z., Jafari, S., & Khalil Moghaddam, B. (2013). The effect of physicochemical properties of soils under different land use on aggregate stability in some part of Khuzestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 3(2), 29-51. (In Persian with English abstract). <https://dori.net/dor/20.1001.1.23221267.1392.3.2.2.1>
16. Gul, S., & Whalen, J.K. (2022). Perspectives and strategies to increase the microbial-derived soil organic matter that persists in agroecosystems. *Advances in Agronomy*, 175, 347-401. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2022.04.004>
17. Halder, M., Ahmad, S.J., Rahman, T., Joardar, J.C., Siddique, A.B., Islam, M.S., Islam, M.U., Liu, S., Rabbi, S., & Peng, X. (2023). Effects of straw incorporation and straw-burning on aggregate stability and soil organic carbon in a clay soil of Bangladesh. *Geoderma Regional*, 32, e00620. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00620>
18. Haynes, R.J., & Beare, M.H. (1997) Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biology and Biochemistry*, 29, 1647-1653. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00078-3](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00078-3)
19. Jafari, S., Baghernejad, M., & Chorom, M. (2005). Evaluation some changes of physicochemical properties of cultivated land (under sugarcane cultivation and crop rotation) and Haft Tapeh pristine region of Khuzestan. *Chamran, The Scientific Journal of Agriculture*, 22, 165-181. (In Persian with English abstract)
20. Jafari, S., Golchin, A., & Toolabifard, A. (2016). Effect of land use changes on physical fractionation properties of organic matter, clay dispersion and aggregate stability in some Khuzestan soils. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47, 593-603. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.59329>
21. Kemper, W.D., & Rosenau, K. (1986). *Size distribution of aggregates*. p. 425-442. In: Klute, A. (ed.), *Methods of Soil Analysis: Part 1: Physical and Mineralogical Methods*, American Society of Agronomy, Madison, WI.
22. Kristiansen, S.M., Schjønning, P., Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Kristensen, K., & Christensen, B.T. (2006). Similarity of differently sized macro-aggregates in arable soils of different texture. *Geoderma*, 137, 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.08.005>
23. Le Bissonnais, L.Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
24. Lee, J.H., Lucas, M., Guber, A.K., Li, X., & Kravchenko, A.N. (2023). Interactions among soil texture, pore structure, and labile carbon influence soil carbon gains. *Geoderma*, 439, 116675, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116675>
25. Luca, E.F., Chaplot, V., Mutema, M., Feller, C., Ferreira, M.L., Cerri, C.C., & Couto, H.T.Z. (2018). Effect of conversion from sugarcane preharvest burning to residues green-trashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. *Geoderma*, 310, 238-248, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.020>
26. Mikha, M.M., Green, T.R., Untiedt, T.J., & Hergret, G.W. (2024). Land management affects soil structural stability: Multi-index principal component analyses of treatment interactions. *Soil and Tillage Research*, 235, 105890. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105890>
27. Moradi, F., Ghorbani, Z., Khalili Moghadam, B., & Misaghi, P. (2015). Important characteristics influencing the cone penetration resistance in virgin, cultivated, and sugarcane land uses in some Khozestan soils. *Iranian Journal of Soil Research*, 29(2), 163-174 (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijsr.2015.102210>
28. Nath, A.J., & Lal, R. (2017). Effects of tillage practices and land use management on soil aggregates and soil organic carbon in the North Appalachian region, USA. *Pedosphere*, 27, 172-176, [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60301-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60301-1)
29. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1982). *Total carbon, organic carbon and organic matter*. p. 101-129. In: Page A.L. (ed.), *Methods of soil analysis. Part 2*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA Madison, WI.
30. Salinas-García, J.R., Velázquez-García, J.D.J., Gallardo-Valdez, M., Díaz-Mederos, P., Caballero-Hernandez, F., Tapia-Vargas, L.M., & Rosales-Robles, E. (2002). Tillage effects on microbial biomass and nutrient distribution in soils under rain-fed corn production in central-Western Mexico. *Soil and Tillage Research*, 66, 143-152. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00022-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00022-3)
31. Sawada, K., Inagaki, Y., Toyota, K., Kosaki, T., & Funakawa, S. (2017). Substrate-induced respiration responses to nitrogen and/or phosphorus additions in soils from different climatic and land use conditions. *European Journal of Soil Biology*, 83, 27-33, <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.10.002>
32. Seybold, C.A., & Herrick, J.E. (2001). Aggregate stability kit for soil quality assessments. *Catena*, 44, 37-45, [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00175-2)
33. Six, J., Conant, R., Paul, E., & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155-176. <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
34. Six, J., & Paustian, K. (2014). Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. *Soil Biology and Biochemistry*, 68, A4-A9. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>
35. Wang, X., Shan, K., Huang, P., Ma, M., & Wu, S. (2023). Response of soil aggregate stability to plant diversity loss

- along an inundation stress gradient in a reservoir riparian zone, *Catena*, 233, 107472, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107472>
36. Wang, J.G., Yang, W., Yu, B., Li, Z.X., Cai, C.F., & Ma, R.M. (2016). Estimating the influence of related soil properties on macro- and micro-aggregate stability in Ultisols of south-central China. *Catena*, 137, 545-553. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.11.001>
37. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., & Samson-Liebig, S.E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture*, 18, 3-17. <https://doi.org/10.1079/AJAA200228>
38. Zhao, J., Chen, S., Hu, R., & Li, Y. (2017). Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. *Soil and Tillage Research*, 167, 73-79. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.007>
39. Zheng, F., Liu, X., Zhang, M., Li, S., Song, X., Wang, B., Wu, X., & Jan van Groenigen, K. (2023). Strong links between aggregate stability, soil carbon stocks and microbial community composition across management 107509, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107509>

Contents

Effect of Planting Date on the Rate of Evaporation and Transpiration Components of Maize under Salinity Stress Conditions	175
R. Saeidi	
Assessment of the Performance of Various Wavelet Transforms in Combined Wavelet-neural Network Modeling for Monthly River Flow Prediction (Case Study: Kardeh Watershed)	191
A. Kazemi Choolanak, F. Modaresi, A. Mosaedi	
Effect of Mole Drainage and Nitrogen Fertilizer on the Yield and Yield Components of Rapeseed as a Second Crop of Paddy Fields in Rasht Region	207
E. Karamian, M. Navabian, M.H. Biglouei, M. Rabiee	
The Effect of Shrub Cover on Some Soil Properties in a Semi-arid Climate	223
Z. Sohrabzadeh, Y. Kooch	
Effects of Different Ratios of Urea:Nitrate in Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture	239
S. Naseri, Sh. Kiani, H.R. Motaghian	
A Comparative Analysis of the Impact of Various Acrylic Polymers on Mitigating the Mobility of Selected Heavy Metals in a Contaminated Soil	253
A. Barikloo, P. Alamdari, A. Golchin	
Modeling Soil Penetration Resistance Using Regression, Artificial Neural Network and Gene Expression Programming	269
Sh. Asghari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo	
The Effect of Cultivation Systems on Stability Index and Organic Carbon of Aggregates in Soils with Long-Term Sugarcane Cultivation History	285
N. Mollaie, M. Sheklabadi, M. Nael	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 38

No. 2

2024

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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



Ferdowsi University
of Mashhad

Vol. 38 No. 2

2024

Journal of Water and Soil

(Agricultural Science and Technology)

ISSN:2008-4757

Contents

Effect of Planting Date on the Rate of Evaporation and Transpiration Components of Maize under Salinity Stress Conditions	175
R. Saeidi	
Assessment of the Performance of Various Wavelet Transforms in Combined Wavelet-neural Network Modeling for Monthly River Flow Prediction (Case Study: Kardeh Watershed)	191
A. Kazemi Choolanak, F. Modaresi, A. Mosaedi	
Effect of Mole Drainage and Nitrogen Fertilizer on the Yield and Yield Components of Rapeseed as a Second Crop of Paddy Fields in Rasht Region	207
E. Karamian, M. Navabian, M.H. Biglouei, M. Rabiee	
The Effect of Shrub Cover on Some Soil Properties in a Semi-arid Climate	223
Z. Sohrabzadeh, Y. Kooch	
Effects of Different Ratios of Urea:Nitrate in Nutrient Solution on the Growth and Nitrate Accumulation of Red French Lettuce in Soilless Culture.....	239
S. Naseri, Sh. Kiani, H.R. Motaghian	
A Comparative Analysis of the Impact of Various Acrylic Polymers on Mitigating the Mobility of Selected Heavy Metals in a Contaminated Soil	253
A. Barikloo, P. Alamdari, A. Golchin	
Modeling Soil Penetration Resistance Using Regression, Artificial Neural Network and Gene Expression Programming	269
Sh. Asghari, M. Hasanpour Kashani, H. Shahab Arkhazloo	
The Effect of Cultivation Systems on Stability Index and Organic Carbon of Aggregates in Soils with Long-Term Sugarcane Cultivation History.....	285
N. Mollaie, M. Sheklabadi, M. Nael	