مجله
آب و خاک
(علوم و صنایع کشاورزی)

دانشگاه فردوسی مشهد
Ferdowsi University of Mashhad

جلد ۳۶ شماره ۳
سال ۱۴۰۱

Vol. 36 No. 3
2022

Journal of
Water and Soil
(Agricultural Science and Technology)

شماره پیاپی ۸۳

شاپا: ۴۷۵۷-۲۰۰۸

ISSN:2008-4757

عنوان مقالات

کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری ۳۲۱
محمدرضا امداد - آرش تافته - نیازعلی ابراهیمی پاک

ارزیابی سطوح مختلف آب آبیاری قطره‌ای نواری بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا ۳۳۹
نادر سلامتی - امیرخسرو دانایی - وحید یعقوبی

بهینه‌سازی و امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اردبیل ۳۵۳
هادی شوکتی - زینب سجودی - محمود مشعل

ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور استان همدان با استفاده از روش تشخیص چندگانه (CND) ۳۶۷
رحیم مطلبی فرد

تاثیر نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با بافت متفاوت ۳۷۹
سحر رضایی - حسین بیات

تأثیر آلودگی به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی در خاک ریزوسفری گندم ۳۹۵
پریسا کبیری سامانی - محمدحسن صالحی - حمیدرضا متقیان

مدل‌سازی بارش روزانه تبریز با روش‌های درختی ادغام شده با تجزیه فصلی-روند و رویکرد دسته‌بندی ۴۰۹
سحر جاویدان - محمدتقی ستاری - شکوه محسن زاده

مجله آب و خاک جلد ۳۶ شماره ۳ سال ۱۴۰۱
Journal of Water and Soil Vol.36 No.3 2022

Contents

Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements 319
M.R. Emdad, A. Tafteh, N. Ebrahimipak

Evaluation of Different Levels of Drip Irrigation Water on Yield and Yield Components in Canola 337
N. Salamati, A. Danaie, V. Yaaghoobi

Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil 351
H. Shokati, Z. Sojoodi, M. Mashal

Evaluation of Nutritional Status of Hamedan Province Grape Fields by Compositional Nutrient Diagnosis Method 365
R. Motalebifard

Effect of Zinc Oxide Nano-Particles (ZnO) on some Physical and Chemical Properties of Soils with Different Textures 377
S. Rezaei, H. Bayat

The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil 393
P. Kabiri Samani, M.H. Salehi, H. Motaghian

Tabriz Daily Rainfalls Modeling via Hybridized Tree Based and Seasonal-Trend Component Bagging Method 407
S. Javidan, M.T. Sattari, Sh. Mohsenzadeh

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

جلد36 شماره 3 مرداد- شهریور سال 1401

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

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

سردبیر: امیر فتوت — استاد- علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

اعضای هیئت تحریریه:

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

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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

بسم الله الرحمن الرحیم

مندرجات

کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری 321

محمدرضا امداد - آرش تافته - نیازعلی ابراهیمی پاک

ارزیابی سطوح مختلف آب آبیاری قطره‌ای نواری بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا 339

نادر سلامتی - امیرخسرو دانایی - وحید یعقوبی

بهینه‌سازی و امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اردبیل 353

هادی شوکتی - زینب سجودی - محمود مشعل

ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور استان همدان با استفاده از روش تشخیص چندگانه (CND) 367

رحیم مطلبی فرد

تاثیر نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با بافت متفاوت 379

سحر رضایی - حسین بیات

تأثیر آلودگی به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی در خاک ریزوسفری گندم 395

پریسا کبیری سامانی - محمدحسن صالحی - حمیدرضا متقیان

مدل‌سازی بارش روزانه تبریز با روش‌های درختی ادغام شده با تجزیه فصلی-روند و رویکرد دسته‌بندی 409

سحر جاویدان - محمدتقی ستاری - شکوه محسن زاده

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 319-331

Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements

M.R. Emdad[1*], A. Tafteh[2], N. Ebrahimipak[3]

Received: 10-04-2022
Revised: 25-04-2022
Accepted: 07-06-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Emdad M.R., Tafteh A., and Ebrahimipak N. 2022. Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements. Journal of Water and Soil 36(3): 319-331. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.75796.1149

Introduction

Quinoa (*Chenopodium quinoa*) is native plant in Bolivia, Chile and Peru, which is widely adapted to different climatic conditions and can grow in all soils. This plant has shown adequate adaptation to arid and semi-arid areas conditions and is planted from areas with low elevation (sea level) to areas with an altitude of 4000 meters above sea level. Quinoa is often cultivated in areas with limited water resources, and it is rare to find quinoa cultivation under full irrigation conditions. Some studies have shown that quinoa yields slightly better under full irrigation (without water restriction) than quinoa under deficit irrigation. Crop growth models are very important tools in the study of agricultural systems and they can be used to simulate the yield of crop in different conditions. Given that the study of performance limiting factors requires numerous and costly research and experiments in different areas, so finding a way to reduce the number, time and cost of these experiments is worthwhile. Aquacrop model is one of the applied models that are used to simulate yield variations in different water and soil management.

Materials and Methods

This investigation was carried out in two growing seasons of 2019 and 2020 to determine the efficiency of Aquacrop model for simulating Quinoa grain yield and biomass under imposing three stress treatments of 30, 50 and 70% of water consumption in development and mid-growth stages. Plant spacing was 40 cm between rows and 7 cm between plants within rows. Seeds of quinoa (Titicaca cultivar) were cultivated in the first decade of August 2019 and in the third decade of July 2020. The experiment was a randomized complete block design with three replications. Three deficit irrigation treatments including 30, 50 and 70% of available water were considered in two growth stages (development and mid-growth) in 18 experimental plots (3 × 4 m). Soil moisture in rooting depth (about 40 cm) was measured by TDR and after the soil moisture of the treatments reached the desired values, plots were irrigated until the soil moisture reached the field capacity. The results of grain and biomass yield in the first year were used to calibrate the Aquacrop model and the results of the second year were used to validate the model. Root mean square error (RMSE), normalized root mean square error (NRMSE), Willmott index (D), model efficiency (EF) and mean error deviation (MBE) were used to compare the simulated and observed values.

Results and Discussion

The results of the first and second year were used to calibrate and validate the model, respectively. The results of the first year showed that irrigation with 50 and 70% of available water in the development stage reduced quinoa grain yield by 17 and 33%, respectively, compared to the control treatment. The application of these two deficit irrigation treatments in the middle stage reduced the yield by about 12 and 28%, respectively. The results of comparing the statistical indices of grain yield, biomass and water use efficiency showed that the NRMSE for grain, biomass and water use efficiency were 9, 8 and 14% in the first year and 9, 6 and 9% in the second years. Furthermore, the EF for these traits were 0.81, 0.77 and 0.64 in the first year and 0.68, 0.71 and 0.62, in the second

1, 2 and 3- Associate Professor, Assistant Professor and Associate Professor of Department of Irrigation and Soil Physics, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: emdadmr591@yahoo.com)

year, respectively.

Conclusion

The results of calibration and validation of the model showed the accuracy and efficiency of the Aquacrop model in simulating grain yield, biomass and water use efficiency of quinoa. This model can be used to provide the most appropriate scenario and irrigation management for different levels of deficit irrigation managements.

Keywords: Evapotranspiration, Irrigation management, Plant modeling, Water stress, Water use efficiency

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص. ۳۳۱-۳۱۹

کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری

محمدرضا امداد[۱*]- آرش تافته[۲]- نیازعلی ابراهیمی پاک[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۷

چکیده

مدل آکواکراپ (Aquacrop) یکی از مدل‌های کاربردی بوده که به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات عملکرد در مدیریت‌های مختلف آب‌وخاک مورد استفاده واقع می‌شود. این پژوهش در دو سال زراعی ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ با هدف تعیین کارایی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده گیاه کینوا با اعمال سه تیمار تنش ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد مصرف آب قابل‌استفاده در مراحل توسعه و میانی رشد اجرا گردید (در شرایط آب‌وخاک غیرشور). از نتایج سال اول به‌منظور واسنجی و از نتایج سال دوم به‌منظور اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. نتایج سال اول نشان داد که تنش ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه (کم‌آبیاری) در مرحله توسعه به ترتیب موجب کاهش عملکرد دانه به میزان ۱۷ و ۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد (بدون تنش) و هم‌چنین اعمال این تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد در حدود ۱۲ و ۲۸ درصد گردید. نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به‌ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به‌ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد. هم‌چنین نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم به‌ترتیب ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به‌ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا بوده و می‌توان از این مدل به‌منظور ارائه مناسب‌ترین سناریو و مدیریت آبیاری در حالت‌های مختلف تنش و کم‌آبیاری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق، تنش آب، کارایی مصرف آب، مدل‌سازی گیاهی، مدیریت آبیاری

مقدمه

مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و بررسی سیستم‌های کشاورزی بوده و از آن‌ها می‌توان به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط مختلف به‌خوبی استفاده کرد. با توجه به اینکه بررسی عوامل محدودکننده عملکرد نیاز به انجام تحقیقات و آزمایش‌های متعدد و هزینه‌بر در مناطق مختلف دارد، بنابراین یافتن راهی برای کاهش تعداد، زمان و هزینه انجام این آزمایش‌ها شایان توجه می‌باشد. به دلیل این‌که فاکتورهای مؤثر بر سامانه تولید محصولات زراعی و ستاده‌های بخش کشاورزی متعدد بوده، لذا استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد محصولات گامی اساسی و مؤثر در امر مدیریت و تصمیم‌گیری می‌باشد.

گیاه کینوا (Quinoa) بومی مناطق بولیوی، شیلی و پرو است که سازگاری گسترده‌ای با شرایط مختلف آب و هوایی داشته و قابلیت رشد در کلیه خاک‌ها را دارد (Mamedi *et al.*, 2017). این گیاه سازگاری مناسبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک داشته و از مناطقی با ارتفاع کم (سطح دریا) تا مناطقی با ارتفاع ۴۰۰۰ متر از سطح دریا کاشته می‌شود. کینوا را می‌توان در تناوب با گیاهان سیب‌زمینی، جو و در برخی از اوقات با گندم و ذرت در مناطق کم‌ارتفاع کاشت (Christiansen *et al.*, 2010). توسعه مراحل فنولوژیکی وابسته به رقم کینوا بوده و تنش آب بر آن تأثیرگذار است (Geerts *et al.*, 2008a).کارایی مصرف آب کینوا در شرایط محدودیت منابع آب و شرایط تغذیه‌ای پایین بوده و در حدود ۰/۳ تا ۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش گردیده است (Geerts *et al.*, 2008b). کینوا

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشیار، استادیار و دانشیار بخش آبیاری و فیزیک خاک، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: emdadmr591@yahoo.com)

DOI: 10.22067/JSW.2022.75796.1149

گیاهی مقاوم به تنش آبی بوده و تنش آب در مراحل اولیه سبزینه‌ای موجب طولانی‌تر شدن دوره رشد گیاه شده تا گیاه بتواند کاهش رشد خود را در صورت تأمین آب جبران نماید (Jacobsen *et al.*,2003).

رقم‌های مختلف کینوا مقاومت‌های مختلفی نسبت به تنش آب از خود نشان می‌دهند (Bois *et al.*, 2006). غالب کشت کینوا در مناطقی انجام می‌شود که با محدودیت منابع آب مواجه باشند و به‌ندرت کشت کینوایی می‌توان یافت که در شرایط آبیاری کامل باشد (Oelke *et al.*, 1992). برخی تحقیقات نشان داده که عملکرد کینوا در شرایط آبیاری کامل(بدون محدودیت آب) اندکی بیشتر از کینوایی است که در شرایط کم‌آبیاری قرار داشته است (Geerts *et al.*, 2008b). کینوا در مقایسه با ذرت، برنج و یا حتی گندم از ارزش غذایی بالایی (پروتئین تا ۲۰ درصد) برخوردار است (Alvarez *et al.*,2009). کینوا یک گیاه امیدبخش برای تأمین کالری موردنیاز از طریق کشت در اراضی کم بازده و باکیفیت آب پایین (با هدایت الکتریکی زیاد) می‌باشد .اگرچه عملکرد بالا (حدود ۴/۵ تن در هکتار) برای رقم‌های کینوا در شرایط مناسب آبیاری و حاصلخیزی (بدون تنش) گزارش گردیده ولی عملکرد این گیاه در شرایط دیم به‌طور متوسط به حدود ۰/۸۵ تن در هکتار کاهش می‌یابد. همچنین شاخص برداشت کینوا در حدود ۰/۳ تا ۰/۵ گزارش‌شده است (Steduto *et al.*, 2012). در شرایط بدون تنش وزن هزار دانه کینوا در محدوده ۲/۱ تا ۶ گرم تغییر می‌کند (Rojas., 2003). بر اساس رقم‌های مختلف طول دوره از زمان ظهور تا رسیدگی فیزیولوژیکی بین ۱۰۰ تا ۲۳۰ روز و تنش آب موجب کاهش ۵۰ درصدی ارتفاع گیاه و نیز کاهش ۱۸ درصد عملکرد شده است (Mamedi *et al.*, 2017). کینوا گیاهی سه کربنه و بدون گلوتن می‌باشد و جزو گیاهان دارویی و ارزشمند ازنظر غذایی قلمداد می‌گردد (Jamali *et al.*, 2016). با توجه به اهمیت کینوا و ارزش غذایی آن و نیز نقش آن در امنیت غذایی، سال ۲۰۱۳ به نام سال کینوا معرفی‌شده است (Choukr-Allah *et al.*, 2016).

محققین روش‌های مختلف کم‌آبیاری را بر کینوا بررسی و گزارش نمودند که در شرایط آبیاری کامل عملکرد دانه کینوا حدود ۳ تن بر هکتار بوده که در شرایط کم‌آبیاری به میزان ۷۵ و ۵۰ درصد آبیاری کامل، مقادیر عملکرد دانه به ترتیب به حدود ۲/۹ و ۲/۴ تن در هکتار کاهش پیداکرده است (Colak *et al.*, 2021). کارایی مصرف آب در تیمار کم‌آبیاری بر اساس ۵۰ درصد آبیاری کامل ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب بوده که در آبیاری کامل به میزان ۱۷ درصد نسبت به تیمار کم‌آبیاری کاهش‌یافته است. شرایط تنش خشکی در مراحل فنولوژیکی گلدهی و پس‌ازآن تأثیر منفی بر عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا داشته و باعث کاهش عملکرد می‌گردد (Geerts *et al.*, 2009 ; Steduto *et al.*, 2012). مقادیر کارایی مصرف آب کینوا در ترکیه بین ۰/۴۸ تا ۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب و وزن هزار دانه کینوا را در شرایط دیم حدود ۳ تا ۳/۳ گرم گزارش‌شده است (Bazile *et al.*, 2015).

همچنین مقادیر عملکرد دانه کینوا را در شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری (به میزان ۵۰ درصد آبیاری کامل) را به ترتیب ۲/۱ و ۱/۷ تن در هکتار و کارایی مصرف آب را در تیمار کم‌آبیاری به میزان ۰/۸۴ کیلوگرم بر متر مکعب (مقدار آن در شرایط آبیاری کامل ۰/۵۵ کیلوگرم بر متر مکعب) گزارش کردند (Lavini *et al.*, 2014).

مدل AquaCrop یکی از مدل‌های گیاهی است که توسط سازمان خواروبار جهانی (فائو) در سال ۲۰۱۲ توسعه یافته است. این مدل در مقایسه با مدل‌های WOFOST وCropSyst، به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر برتری دارد. علاوه بر کاربرپسندی این مدل، به توانایی و دقت قابل‌قبول آن در شبیه‌سازی عملکرد محدوده وسیعی از محصولات مختلف زراعی می‌توان اشاره کرد (Heng *et al.*, 2009 ; Raes *et al.*, 2012). بیتری و همکاران (Bitri *et al.*, 2014)، به‌منظور شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی با مدل AquaCrop تحت دو شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل رطوبت ناحیه ریشه، زیست‌توده و عملکرد سیب‌زمینی را با این مدل شبیه‌سازی کردند. میانگین مربعات خطای نرمال شده در پارامترهای مذکور کمتر از ۵ درصد گزارش گردید. به‌منظور ارزیابی و آنالیز حساسیت مدل AquaCrop در سال زراعی ۱۳۷۸ (خاک لومی) در منطقه کرج روی گیاه سویا، تحقیقی با ۴ تیمار آبیاری کامل، کم‌آبیاری ۷۵ و ۵۰ درصد کمبود رطوبتی خاک و آبیاری موضعی منطقه ریشه در حد ۵۰ درصد انجام شد. نتایج نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب سویا، عملکرد قابل قبولی با خطای کمتر از ۴/۶ درصد داشته است (Babazadeh and Sarai., 2012).

با توجه به ارزش غذایی کینوا و تطابق کشت این گیاه در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز محدودیت منابع آب و نظر به اینکه کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری و کم‌آبیاری مشخص نگردیده، لذا در این تحقیق واکنش گیاه کینوا به کم‌آبی در مراحل مختلف رشد بررسی و کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری تعیین و ارزیابی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق به‌منظور تأثیر مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری در مراحل مختلف رشد بر عملکرد کینوا و کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا در شرایط تنش آبی در ایستگاه تحقیقاتی موسسه تحقیقات خاک و آب (کرج) به عرض و طول جغرافیایی به ترتیب ۳۵/۷۶ و ۵۰/۹۶ درجه و ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریا در دو سال زراعی (۱۳۹۸ و ۱۳۹۹) انجام شد (شکل ۱).

شکل ۱- نمایی از مزرعه تحقیقاتی کینوا
Figure 1- View of Quinoa research farm

فاصله ردیف‌های کشت ۴۰ سانتی‌متر و فواصل بوته‌ها ۷ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (۴۵ بوته در متر مربع). در سال اول، کشت کینوا (رقم تی‌تی‌کاکا) در دهه اول مرداد ۱۳۹۸ و در سال دوم در دهه سوم تیرماه ۱۳۹۹ انجام شد. در این خصوص ۳ تیمار آبی به‌صورت ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه آب قابل‌استفاده در سه تکرار و ۲ مرحله رشد (مرحله توسعه و میانی) در ۱۸ کرت آزمایشی (به ابعاد ۳ در ۴ متر) در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در دو سال زراعی اجرا شد (تیمار تخلیه رطوبتی بر اساس ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد در مرحله توسعه به ترتیب با T1، T2 و T3 و در مرحله میانی با T4، T5 و T6 مشخص شدند). در سایر مراحل، آبیاری بر اساس تخلیه ۳۰ درصد آب قابل‌استفاده در نظر گرفته شد و حجم آب آبیاری بر این اساس برای تیمارها اعمال گردید. رطوبت تا عمق توسعه ریشه (حدود ۴۰ سانتی‌متری) با دستگاهTDR مدل ترایم که برای بافت خاک واسنجی شده بود، اندازه‌گیری و پس از رسیدن رطوبت خاک تیمارها به مقادیر موردنظر، آبیاری قطعات با رساندن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی انجام شد. حجم آب آبیاری هر یک از کرت‌های آزمایشی بر اساس سطح کرت و عمق آب موردنیاز محاسبه و پس از اندازه‌گیری به تیمارها داده شد. پس از برداشت و تجزیه‌وتحلیل، نتایج عملکرد دانه و زیست‌توده در سال اول به‌منظور واسنجی مدل و از نتایج سال دوم برای اعتبارسنجی مدل اکواکراپ استفاده گردید (برداشت در سال اول و دوم به ترتیب در تاریخ‌های ۹۸/۸/۱۱ و ۹۹/۷/۲۵ انجام شد). همچنین با توجه به عملکرد کینوا در کرت‌های موردنظر، کارایی مصرف آب تیمارها تعیین و مورد تجزیه‌وتحلیل واقع شدند. از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، شاخص ویلموت (D)، کارایی مدل (EF) و میانگین انحراف خطا (MBE) به‌منظور مقایسه نتایج آماری استفاده گردید.

در راستای استفاده از مدل، از آمار و اطلاعات روزانه هواشناسی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارندگی در دوره‌های مذکور (سال‌های ۹۸ و ۹۹) به‌منظور تعیین تبخیر و تعرق مرجع استفاده گردید. همچنین با شناسایی مراحل فنولوژیکی گیاه و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به همراه مدیریت آبیاری و سایر اطلاعات موردنیاز نسبت به شبیه‌سازی عملکرد اقدام گردید.

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ و برخی از ویژگی‌های کیفی آب آبیاری مزرعه کینوا در جدول ۲ ارائه‌شده است. دوره‌های فنولوژی رشد کینوا (مراحل چهارگانه) در جدول ۳ ارائه گردیده است. به‌طور کلی دوره رشد اولیه ۲۰ روز، دوره توسعه ۳۰ روز، دوره میانی ۲۸ روز و دوره پایانی در حدود ۱۲ روز اندازه‌گیری شدند.

جدول ۱- برخی مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه
Table 1- Some physical and chemicals soil characteristics on farm

عمق خاک Soil depth	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil texture	FC	PWP	pH	EC	OC	P	K	Mg	Fe
cm	٪	٪	٪	-	%	%	-	dS/m	%	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
0-30	46	30	24	Loam	27	14	7.8	1.2	0.48	15.6	222	206	4.38
30-60	45	33	22	Loam	25	12	7.5	1.2	0.5	15.5	210	205	4.50

جدول ۲- ویژگی‌های کیفی آب آبیاری

Table 2- Quality characteristics of irrigation water

EC	SAR	pH	Ca	Mg	Na	Cl	HCO_3
dS/m	-	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
0.39	0.44	7.5	55.2	4.9	12.6	13.5	116

جدول ۳- دوره‌های فنولوژی رشد کینوا

Table 3- Quinoa growth phenology stages

	نام دوره Stage name	اولیه Initial	توسعه Development	میانی Mid	پایانی Final	کل Total
سال اول First Year	تعداد روز Day	20	30	25	15	90
سال دوم Second year	تعداد روز Day	20	30	30	10	90

تعداد روز از کاشت تا سبز شدن بذر کینوا حدود ۷ تا ۱۰ روز، تعداد روز از کاشت تا گلدهی حدود ۵۰ روز، تعداد روز از کاشت تا رسیدن حدود ۸۰ روز، تعداد روز از کاشت تا حداکثر پوشش گیاهی حدود ۵۵ تا ۶۰ روز و حداکثر رشد ریشه در حدود ۴۰ تا ۵۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد.

نتایج و بحث

از آمار و اطلاعات روزانه هواشناسی در راستای تعیین تبخیر و تعرق مرجع استفاده و سپس تبخیر و تعرق گیاه کینوا تعیین گردید. شکل ۲ مقادیر تبخیر و تعرق گیاه کینوا اندازه‌گیری شده در سال اول را با مقادیر به‌دست‌آمده با مدل آکواکراپ (از مدل فائو پنمن مانتیث و با استفاده از داده‌های هواشناسی شامل درجه حرارت حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، بارندگی و سرعت باد) و سامانه نیاز آب (سامانه تعیین نیاز آبی گیاهان زراعی و باغی کشور) در فصل کشت زراعی مقایسه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد نیاز آبی گیاه کینوا در طول دوره رشد ۱۰۰ روزه حدود ۳۶۰ تا ۳۸۰ میلی‌متر تعیین گردید.

جدول ۴ شاخص‌های آماری مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده را با مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب ارائه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برای مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب به ترتیب ۹ و ۶ درصد و همچنین کارایی مدل (ET) برای مدل و سامانه حدود ۰/۹۸ بوده که بیانگر دقت و همخوانی نتایج مدل در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق گیاه کینوا می‌باشد.

شکل ۲- مقایسه تغییرات نیاز آبی گیاه کینوا اندازه‌گیری شده در طول دوره رشد با نتایج مدل آکواکراپ و سامانه نیازآب

Figure 2- Comparison of changes in measured water requirement of quinoa plant during growth period with the results of Aquacrop model and NIAZAB

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های آماری تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با مدل و سامانه نیازآب

Table 4- Comparison of statistical indices of measured evapotranspiration with the model and NIAZAB

مدل Model	MBE	RMSE	NRMSE	D	EF
آکواکراپ Aquacrop	-10.60	19.58	0.09	0.96	0.97
سامانه نیاز آب NIAZAB	5.48	6.26	0.06	0.96	0.98

مقادیر اندازه‌گیری شـــده عملکرد، زیســـت‌توده، تبخیر و تعرق و کارایی مصـــرف آب کینوا در ســـال اول در تیمارهای مختلف مدیریت کم‌آبیـاری در جـدول ۵ ارائـه گردیده اســـت. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد در تیمار ۵۰ و ۷۰ درصد تنش در مرحله توسعه، مقدار عملکرد به میزان به ترتیب ۱۷ و ۳۳ درصـد نسـبت به تیمار شاهد (۳۰ درصد تنش در مرحله توسـعه) کاهش داشـته است. هم‌چنین مقادیر عملکرد حاصـله در تیمار ۵۰ و ۷۰ درصد تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد به ترتیب به میزان ۱۲ و ۲۸ درصد نسبت به تیمار شاهد (۳۰ درصد تنش در مرحله میانی) داشته است. مقادیر کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف اختلاف معنی‌داری با یکدیگر نداشـته و در محدوده ۱/۱ تـا ۱/۳ کیلوگرم دانـه بر مترمکعب آب بوده و بیانگر مقاوم بودن نســـبی گیـاه کینوا نســـبـت بـه تنش آب در این مراحل می‌باشـــد. به‌عبارت‌دیگر تنش شدید آب (۷۰ درصد کاهش مصرف آب) در مرحله توسعه و میانی باعث کاهش عملکرد دانه کینوا به ترتیب به حدود ۳۳ و ۲۸ درصد شده است.

هم‌چنین جدول ۶ مقادیر عملکرد، زیســـت‌توده، تبخیر و تعرق و کارایی مصـــرف آب گیاه کینوا را در ســـال دوم (۱۳۹۹) ارائه می‌کند. تنش آب به میزان ۵۰ و ۷۰ درصـد تخلیه آب قابل‌اســـتفاده در مرحله توســـعه موجب کاهش عملکرد دانه کینوا به میزان ۱۹ و ۳۲ درصـــد نسبت به تیمار شاهد شده است. از طرف دیگر افزایش تنش به میزان ۵۰ و ۷۰ درصد مصرف آب قابل‌استفاده در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد دانه کینوا به ترتیب به میزان ۱۲ و ۱۹ نسـبت به تیمار شاهد شده است. نتایج مشابهی از مقادیر کارایی مصرف آب تیمارها در سال دوم نســـبت به ســـال اول حاصـــل گردیده و محدوده تغییرات کارایی مصـــرف آب در حـدود ۱/۱ تـا ۱/۲ کیلوگرم دانـه بر مترمکعـب آب می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب کینوا در سال اول

Table 5- Measured yield, evapotranspiration and water use efficiency of quinoa in the first year

تیمار Treatment	عملکرد Yield t/ha	زیست‌توده Biomass t/ha	تبخیروتعرق ET (mm)	کارایی مصرف آب WUE kg/m^3 (ET)
T1	3.63	8.06	320	1.1
T2	3	6.83	250	1.2
T3	2.42	5.77	220	1.1
T4	3.63	7.28	300	1.2
T5	3.2	6.75	250	1.3
T6	2.6	5.94	200	1.3

جدول ۶- مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد، تبخیر و تعرق و کارایی مصرف آب کینوا در سال دوم

Table 6- Measured yield, evapotranspiration and water use efficiency of quinoa in the second year

تیمار Treatment	عملکرد Yield t/ha	زیست‌توده Biomass t/ha	تبخیروتعرق ET (mm)	کارایی مصرف آب WUE kg/m^3 (ET)
T1	3.79	7.24	345	1.1
T2	3.07	5.94	268	1.1
T3	2.56	5.83	240	1.1
T4	3.20	7.24	295	1.1
T5	2.81	6.53	265	1.1
T6	2.58	5.89	214	1.2

شکل ۳ و شکل ۴ مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را در راستای واسنجی مدل در سال اول ارائه می‌کند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد مقادیر عملکرد و زیست‌توده اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده قرابت و همخوانی مناسبی را با یکدیگر داشته و از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردارند (R=0.82). مقادیر کارایی مصرف آب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در شکل ۵ نیز نشان می‌دهد که مقادیر شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب قرابت و همخوانی بالایی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده داشته و حاکی از دقت مناسب این مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشد (R=0.80). نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد که نشانگر کارایی و دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب می‌باشد (جدول ۷).

شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب نتایج مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و زیست‌توده را در سال دوم که در راستای اعتبارسنجی انجام شده است را با یکدیگر مقایسه می‌کند. مقادیر عملکرد دانه و زیست‌توده از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردار بوده و بیانگر همخوانی و کارایی مناسب این مدل در شبیه‌سازی شده عملکرد دانه و زیست‌توده کینوا می‌باشد (ضریب همبستگی برای عملکرد دانه و زیست‌توده به ترتیب ۰/۸۲ و ۰/۹۱ می‌باشد).

جدول ۷- نتایج آنالیز آماری واسنجی مدل در سال اول

Table 7- Results of statistical analysis of model calibration in the first year

	MBE	RMSE	NRMSE	d	EF
عملکرد دانه Seed yield	0.11	0.27	0.09	0.88	0.81
زیست‌توده Biomass	0.14	0.48	0.08	0.86	0.77
کارایی مصرف آب WUE	0.03	0.13	0.14	0.75	0.64

شکل ۳- مقایسه عملکرد دانه کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 3- Comparison of measured and simulated quinoa seed yield (first year)

شکل ۴- مقایسه زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 4- Comparison of measured and simulated quinoa biomass (first year)

شکل ۵- مقایسه کارایی مصرف آب کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال اول)

Figure 5- Comparison of measured and simulated water use efficiency of quinoa (first year)

شکل ۶- مقایسه عملکرد دانه کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 6- Comparison of measured and simulated quinoa grain yield (second year)

شکل ۷- مقایسه زیست‌توده کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 7- Comparison of measured and simulated quinoa biomass (second year)

شکل ۸- مقایسه کارایی مصرف آب کینوا اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (سال دوم)

Figure 8- Comparison of quinoa measured and simulated water use efficiency (second year)

جدول ۸- نتایج آنالیز آماری ارزیابی مدل در سال دوم

Table 8- Results of statistical analysis of model evaluation in the second year

	MBE	RMSE	NRMSE	D	EF
عملکرد دانه Seed yield	0.04	0.27	0.09	0.83	0.68
زیست‌توده Biomass	0.32	0.37	0.06	0.90	0.71
کارایی مصرف آب WUE	0.03	0.05	0.09	0.64	0.62

همچنین مقایسه مقادیر کارایی مصرف آب دانه شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در سال دوم (شکل ۸) نشان می‌دهد که نقاط موردنظر از پراکندگی مناسبی نسبت به خط یک‌به‌یک برخوردارند و نشانگر کارایی و دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشد (R=0.70).

به‌طور کلی نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم نشان می‌دهد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب حدود ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین‌شده که نشانگر دقت و کارایی مناسب مدل در برآورد عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب می‌باشد (جدول ۸).

نتیجه‌گیری

با توجه به ارزش غذایی کینوا و تطابق کشت این گیاه در شرایط مختلف آب و هوایی و نیز محدودیت منابع آب و نظر به اینکه کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در مدیریت‌های مختلف آبیاری و کم‌آبیاری مشخص نگردیده، لذا در این تحقیق واکنش گیاه کینوا به کم‌آبی در مراحل مختلف رشد بررسی و کارایی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری تعیین و ارزیابی گردید. نتایج سال اول نشان داد که تنش

۵۰ و ۷۰ درصد تخلیه در مرحله توسعه به ترتیب موجب کاهش عملکرد دانه به میزان ۱۷ و ۳۳ درصد نسبت به تیمار شاهد و همچنین اعمال این تنش در مرحله میانی موجب کاهش عملکرد در حدود ۱۲ و ۲۸ درصد گردید. همچنین مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال اول نشان داد که ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده برای دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب به ترتیب ۹، ۸ و ۱۴ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۶۴ می‌باشد. از طرف دیگر نتایج مقایسه شاخص‌های آماری عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در سال دوم به ترتیب ۹، ۶ و ۹ درصد و کارایی مدل برای این صفات به ترتیب ۰/۶۸، ۰/۷۱ و ۰/۶۲ تعیین شد. نتایج حاصل از واسنجی و اعتبارسنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا می‌باشد. بنابراین می‌توان از این مدل به‌منظور ارائه مناسب‌ترین سناریو و مدیریت آبیاری گیاه کینوا در حالت‌های مختلف تنش و کم‌آبیاری استفاده و مناسب‌ترین مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری گیاه کینوا را در راستای ارتقا کارایی مصرف آب توصیه نمود.

منابع

1- Alvarez-Jubete L., Arendt E.K., and Gallagher E. 2009. Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients. Trends in Food Science & Technology 21: 106-113. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.10.014.

2- Babazadeh H., and Sarai Tabrizi M. 2012. Evaluation of AquaCrop model under soybean irrigation management conditions. Water and Soil 26(2). https: //doi: 10.22067 / jsw.v0i0.14156.

3- Bazile D, Bertero D., and Nieto C. 2015. State of the Art Report on Quinoa Around the World in 2013. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) & CIRAD (Centre de coopération international).

4- Bitri M., Grazhdani S., and Ahmeti A. 2014. Validation of the Aqua Crop Model for full and deficit Irrigation potato production in environmental conditions of korca zone, south-eastern Albania. International Journal of Innovative Reaserch in Science, Engineering and Technology 3(5): 12013-12020.

5- Bois J.F., Winkel T., Lhomme J.P., Raffaillac J.P., and Rocheteau A. 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) to temperature: Effects on germination, phenology, growth and freezing. European Journal of Agronomy 25: 299-308. https: //doi:10.1016/j.eja.2006.06.007.

6- Christiansen J.L., Jacobsen S.-E., and Jŕgensen S.T. 2010. Photoperiodic effect on flowering and seed development in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Plant Soil Science 1-6. https://doi.org/10.1080/09064710903295184.

7- Choukr-Allah R., Rao NK., Hirich A., Shahid M., Alshankiti A., Toderich K., Gill S., and Ur Rahman Butt K. 2016. Quinoa for marginal environments: toward Future Food and Nutritional Security in MENA and Central Asia Regions. Frontiers in Plant Science 7: 346. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00346.

8- Colak Y., Bozkurt A., Yazar A., Alghory and Tekin S. 2021. Yield and water productivity response of quinoa to various deficit irrigation regimes applied with surface and subsurface drip systems. The Journal of Agricultural Science. https://doi.org/10.1017/S0021859621000265. 1–12.

9- Geerts S., Raes D., Garcia M., Vacher J., Mamani R., Mendoza J., Huanca R., Morales B., Miranda R., Cusicanqui J. and Taboada C. 2008a. Introducing deficit irrigation to stablize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). European Journal of Agronomy 28: 427-436. https://doi:10.1016/j.agwat.2008.02.012.

10-Geerts S., Raes D., Garcia M., Condori O., Mamani J., Miranda R., Cusicanqui J., Taboada C., and Vacher J. 2008b. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano. Agricultural Water Management 95: 909-917. https:// doi:10.1016/j.fcr.2008.04.008.

11-Geerts S., Raes D., Garcia M., Mendoza J., and Huanca R. 2008c. Indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. Field Crops Research 108: 150-156. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.06.020.

12-Geerts S., Raes D., Garcia M., Taboada C., Miranda R., Cusicanqui J., Mhizha T., and Vacher J. 2009. Modelling the potential for closing quinoa yield gaps under varying water availability in the Bolivian Altiplano. Agricultural Water Management 96: 1652-1658. https://doi:10.2134/agronj2008.0029xs.

13-Heng L.K., Hsiao T.C., Evett S., Howell T., and Steduto P. 2009. Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. Agronomy Journal 101: 488–498. https://doi.org/10.1081/FRI-120018872.

14-Jacobsen S.E., Mujica A., and Jensen C.R. 2003. The Resistance of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to Adverse Abiotic Factors. Food Reviews International 19: 99-109.

15-Jamali S., Sharifan H., Hezarjaribi A., and Sepahvand N. 2016. The effect of different levels of salinity on germination and growth indices of two cultivars of Quinoa. Journal of Water and Soil Resources Conservation 6(1): 87-98. https://doi: 10.1111/jac.12069.

16-Lavini A., Pulvento C., d'Andria R., Riccardi M., Choukr-Allah R., Belhabib O., Yazar A., Ince Kaya Ç., Sezen SM.,

Qadir M., and Jacobsen SE. 2014 Quinoa's potential in the Mediterranean Region. Journal of Agronomy and Crop Science 200: 344–360. https://doi: 10.22059/ijfcs.2017.128439.653907.

17-Mamedi A., Tavakkol Afshari R., and Sepahvand N. 2017. Quantifying seed germination response of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) under temperature and drought stress regimes. Iranian Journal of Field Crop Science 48(3): 615-623. https://doi: 10.22059/ijfcs.2017.128439.653907.

18-Oelke E.A., Putnam D.H., Teynor D.M., and Oplinger E.S. 1992. Alternative field crops manual–quinoa. USA, University of Purdue. https://doi.org/10.1081/FRI-120018864.

19-Rojas W. 2003. Multivariate Analysis of Genetic Diversity of Bolivian Quinoa Germplasm. Food Reviews International 19: 9-23.

20-Raes D., Steduto P., Hsiao TC., and Fereres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.

21-Steduto P., Hsiao C., Hereres E., And Raes D. 2012. Crop yield response to water. FAO irrigation and drainage, No, 66.

22-Yazar A., Sezen SM., Bozkurt Çolak Y., Ince Kaya and Tekin S. 2017. Effect of planting times and saline irrigation of quinoa using drainage water on yield and yield components under the Mediterranean environmental contitions. International Journal of Research in Agriculture and Forestry 4: 8–16.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 333-349

Evaluation of Different Levels of Drip Irrigation Water on Yield and Yield Components in Canola

N. Salamati[*1], A. Danaie[2], V. Yaaghoobi[3]

Received: 23-11-2020
Revised: 13-07-2021
Accepted: 25-07-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Salamati N., Danaie A., and Yaaghoobi V. 2022. Evaluation of Different Levels of Drip Irrigation Water on Yield and Yield Components in Canola. Journal of Water and Soil 36(3): 333-349. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.67062.0

Introduction

Drought stress is the most important environmental factor limiting growth and development of plants worldwide. Growth reduction due to drought stress has been reported more than other environmental stresses. So far, many studies have been conducted on the relationship and correlation between important agronomic traits in rapeseed, which have introduced 1000-grain weight, number of seeds per pod and number of pods per plant as the most important traits with high correlation in yield. The results showed that the application of drought stress had an effect on the yield components of sesame and the cultivars that were more sensitive to drought stress had a greater decrease in their yield. The aims of this study were to investigate (1) the effect of consumed water volume as the independent variable on other variables of the study, and (2) the effect of total independent variables (yield components and other independent factors) on yield and water productivity (dependent variables). Finally, the most important independent variables affecting water productivity and the most sensitive variables to the amount of consumed water were determined.

Materials and Methods

In order to achieve aforementioned objectives of this study, an experiment was conducted during two growing season of 2011-2011 and 2010-2011 in Behbahan Agricultural Research Station. The experiment was conducted as randomized complete block design with 4 replications. The applied amount of water in drip irrigation was composed of four levels of 50, 75, 100 and 125% water requirement in main plots and two canola varieties Hyola 401 and RGS003 in sub plots were placed.

Results and Discussion

The results of the analysis of variance of the regression model showed that the higher absolute value of beta coefficients and t-statistic of each independent variable caused that variable to be introduced as the most sensitive independent variable affecting the dependent variable. Therefore, the independent variable of water volume, with beta coefficient of 0.860 and t-statistic of 13.246 had the greatest effect on plant height variable. In terms of yield, the studied variables (the number of pods per plant, the number of seeds per pod, and 1000-seed weight, consumed water volume, flowering period, growth period and plant height) showed 74.1% of variation (R^2 = 0.741) of dependent variable (Yield of canola). The consumed water volume with the highest absolute value of beta coefficient of 0.563 and t-statistic with 2.967 had the most significant effect on yield at the level of 1%. Among the dependent variables, the consumed water volume with the highest absolute value of beta -1.013 and t-statistic at -12.415 had the most significant effect on water productivity at the level of 1%. consumed of water volume with

1- Research Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: nadersalamati@yahoo.com)
2- Member of Scientific Board, Seed and Plant lmprovement Department, Khuzestan. Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran
3- Researcher, Department Research Extension and Social, Khuzestan, Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Ahvaz, Iran

the highest absolute value of beta coefficient of 0.563 and t-statistic with 2.967 had the most significant effect on performance at the level of 1%. The results of Pearson correlation coefficient showed that the highest correlation between the number of pods per plant and seed per pod with both plant height were calculated to be 0.763 and 0.849, respectively, indicating that increasing plant height was effective in increasing the number of pods per plant and seed per pod.

Conclusion

The results of analysis of variance of regression model showed the effect on volume of consumed water as an dependent variable through other variables (number of pods per plant, number of seeds per pod, yield, water productivity, 1000-seed weight, flowering period, growth period and plant height). Results showed a significant effect of all variables at the level of 1%, except for the variable of flowering period which had a significant effect but just at 5%. The volume of consumed water by r= 66.2% on grain yield variation in the pods, had the most significant effect on yield components. Therefore, seed number in the pods received the most negative effect from reducing water consumption due to drought stress. With increasing the growth period of canola, water productivity showed a significant decrease at 1%. The results of Pearson correlation coefficient showed that grain water productivity had a negative and significant correlation at the level of 1% with all variables. The highest correlation between water productivity (r = -0.939) was calculated with volume of consumed water, which indicates the importance of reducing water consumption in increasing canola water productivity.

Keywords: Consumed of Water volume, Evapotranspiration, Plant height, Variety

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص. ۳۴۹-۳۳۳

ارزیابی سطوح مختلف آب آبیاری قطره‌ای نواری بر عملکرد و اجزای عملکرد کلزا

نادر سلامتی[1*]- امیرخسرو دانایی[2]- وحید یعقوبی[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۳

چکیده

به منظور بررسی و ارزیابی سطوح مختلف آب آبیاری قطره‌ای بر عملکرد، اجزای عملکرد، بهره‌وری آب و مشخص نمودن مهم‌ترین متغیر مستقل که بیش‌ترین تغییرات در عملکرد و بهره‌وری آب را موجب گردیده از یک سو و بررسی اثر متغیر مستقل حجم آب مصرفی بر دیگر متغیرهای این پژوهش از سوی دیگر، آزمایشی در دو سال زراعی ۹۱-۱۳۹۰ و ۹۰-۱۳۸۹ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی بهبهان اجرا شد. آزمایش در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده با ۴ تکرار اجرا گردید. مقدار آب در آبیاری قطره‌ای نواری در چهار سطح ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیازآبی در کرت‌های اصلی و دو رقم Hyola 401 و RGS003 در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در مدل رگرسیون نشان داد که بیش‌تر بودن قدرمطلق ضرایب بتا و آماره t هر متغیر مستقل موجب شد تا آن متغیر به عنوان حساس‌ترین متغیر مستقل اثرگذار بر متغیر وابسته معرفی شود. لذا متغیر مستقل حجم آب مصرفی، با ضریب بتای ۰/۸۶۰ و آماره t به‌میزان ۱۳/۲۴۶ بیش‌ترین اثر را بر متغیر ارتفاع بوته داشت. در صفت عملکرد، متغیرهای مورد بررسی (تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، و وزن هزار دانه، حجم آب مصرفی، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته) ۷۴/۱ درصد (R^2=۰/۷۴۱) میزان نوسانات متغیر وابسته (عملکرد کلزا) را تبیین کردند. حجم آب مصرفی با بالاترین قدرمطلق ضریب بتای ۰/۵۶۳ و آماره t به‌میزان ۲/۹۶۷ بیش‌ترین اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد را بر عملکرد گذاشت. در بین متغیرهای وابسته، حجم آب مصرفی با بالاترین قدر مطلق ضریب بتای ۱/۰۱۳- و آماره t به‌میزان ۱۲/۴۱۵- بیش‌ترین اثر منفی و معنی‌دار در سطح ۱ درصد را بر بهره‌وری آب گذاشت. عملکرد با ضریب بتای ۰/۴۲۷ و آماره t به‌میزان ۸/۰۰۰ در رتبه‌ی دوم اثرگذاری بر بهره‌وری آب کلزا جای گرفت و این اثر در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. نتایج ضریب همبستگی پیرسون نشان داد که بیش‌ترین میزان همبستگی تعداد خورجین در بوته و دانه در خورجین هر دو با ارتفاع بوته به‌ترتیب به میزان‌های ۰/۷۶۳ و ۰/۸۴۹ محاسبه شدند که حاکی از موثر بودن افزایش ارتفاع بوته در افزایش تعداد خورجین در بوته و دانه در خورجین بود. تمامی صفات اجزای عملکرد همبستگی مثبتی با همدیگر داشتند که نشان می‌دهد کاهش هر یک از این صفات می‌تواند اثر زیان‌باری بر عملکرد کلزا در مزرعه داشته باشند. با توجه به اهمیت دانه‌های روغنی در کشور پیشنهاد می‌گردد از نتایج این تحقیق به منظور شناسایی پارامترهای متغیر اثرگذار بر پارامترهای وابسته از جمله بهره‌وری آب در کم‌آبیاری قطره‌ای گیاه کنجد نیز استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: ارتفاع بوته، تبخیر تعرق، حجم آب مصرفی، رقم

۱- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: nadersalamati@yahoo.com)
۲- مربی پژوهش، بخش تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران
۳- محقق، بخش تحقیقات اقتصادی، اجتماعی و ترویج کشاورزی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.67062.0

مقدمه

خشکی و تنش آب به همراه تغییر الگوهای بارندگی و حرارتی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولیدات کشاورزی می‌باشد که گیاه را از رسیدن به حداکثر توان محصول باز می‌دارد (Marjanovic-Jeromela *et al.*, 2007). تنش خشکی مهم‌ترین عامل محیطی محدودکننده رشد و نمو گیاهان در کل دنیا است. به طوری‌که کاهش رشد در اثر تنش خشکی بیش‌تر از سایر تنش‌های محیطی گزارش شده است (Afshari *et al.*, 1998). کشور ما نیز از تأثیرات سوء این پدیده اقلیمی در امان نبوده و در نیمی از زمین‌های قابل کشت، محصولات از کم‌آبی رنج می‌برند (Pasban Eslam, 2008). بنابراین استفاده بهینه از منابع آب از طریق اصلاح روش‌های آبیاری به همراه استفاده از ارقام متحمل به خشکی که بهره‌وری آب بالایی داشته باشند دو امر ضروری برای افزایش بهره‌وری از منابع موجود است (Kazi *et al.*, 2020). کلزا یکی از مهم‌ترین گیاهان روغنی است که نقش عمده‌ای در تأمین روغن خوراکی انسان داشته و از نظر تأمین روغن مصرفی در دنیا، مقام سوم را بعد از سویا و نخل روغنی دارد (Blum, 2012).

تاکنون مطالعات زیادی در زمینه ارتباط و همبستگی صفات مهم زراعی در گیاه کلزا انجام گرفته است که صفات وزن هزاردانه، تعداد دانه در خورجین و تعداد خورجین در بوته را مهم‌ترین صفات با همبستگی بالا در عملکرد معرفی کرده‌اند (Pasban Eslam , 2008، Rosta baghi *et al.*, 2012 و Tuncturk *et al.*, 2007). غانگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2011) همبستگی معنی‌داری بین عملکرد با تعداد خورجین در متر مربع و تعداد دانه در خورجین مشاهده کردند. آلگان و آیگان (Algan and Aygun, 2001) صفات تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، شاخص برداشت و وزن هزار دانه را مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد دانه در کلزا معرفی کردند. دانشمند و همکاران (Daneshmand *et al.*, 2008) گزارش نمودند که در گیاه کلزا اختلاف معنی‌داری در تعداد دانه در خورجین با ساقه‌های اصلی و فرعی، طول خورجین و وزن هزار دانه در سطوح مختلف آبیاری وجود داشت. کازی و همکاران (Kazi *et al.*, 2020) گزارش کردند بین سطوح آبیاری و عملکرد دانه کلزا همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد به طوری که ۵۴ درصد از تغییرات عملکرد دانه مربوط به تغییرات در سطوح آبیاری می‌باشد. نتایج به دست آمده از ارزیابی ژنوتیپ‌های پاییزه کلزا نشان داد که تنش خشکی آخر فصل با کاهش تعداد خورجین در بوته سبب کاهش عملکرد دانه شد (Pasban Eslam , 2008). گوش و موخوپادهای (Ghosh and Mukhopadhyay, 1994) در یک تحقیق بر روی اجزای عملکرد دانه در کلزا گزارش نمودند که وزن هزاردانه اثر مثبت روی عملکرد دارد. در تحقیقی دیگر نشان داده شد که عملکرد گیاه کلزا تابع تراکم، تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن دانه‌ها می‌باشد که تعداد خورجین در بوته مهم‌ترین عامل مؤثر در عملکرد است (Naeemi *et al.*, 2008). جرمولا و همکاران (Jeromela *et al.*, 2008) با بررسی هم بستگی و تجزیه علیت بین صفات در ارقام کلزا گزارش نمودند که هم بستگی مثبت و معنی‌داری بین عملکرد دانه در بوته، تعداد غلاف در بوته، درصد روغن دانه و وزن هزار دانه وجود دارد. ایوانووسکا (Ivanovska *et al.*, 2007) در کلزای بهاره گزارش نمودند، عملکرد دانه بیش‌ترین همبستگی را با تعداد خورجین در بوته و وزن هزار دانه دارند.

نتایج تحقیق شکوه‌فر و همکاران (Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012) نشان داد اعمال تنش بر اجزای عملکرد کنجد در سطح احتمال ۵ درصد تأثیر گذار بوده و ارقامی که حساسیت بیش‌تری به تنش داشتند (پاناما، TS-3 و ورامین ۲۸۲۲) در این شرایط کاهش عملکرد آن‌ها بیش‌تر بود. نتایج تحقیق اسکندری و همکاران (Eskandari *et al.*, 2010) نشان داد با افزایش شدت کمبود آب، ارتفاع بوته، تعداد برگ در بوته، عملکرد بیولوژیک و عملکرد دانه کنجد در واحد سطح کاهش یافتند. تمامی این صفات همبستگی مثبتی با همدیگر داشتند که نشان می‌دهد کاهش هر یک از این صفات می‌تواند اثر زیان‌باری بر عملکرد کنجد در مزرعه داشته باشد.

مهرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsan Zadeh, 2010) در تحقیقی نشان دادند که از میان اجزای عملکرد، تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول به طور معنی‌داری بر اثر تنش خشکی کاهش یافتند. به‌علاوه عملکرد دانه به طور معنی‌داری تحت تاثیر رژیم آبیاری قرار گرفت و کاهش یافت. آن‌ها نتیجه گرفتند که تحت شرایط تنش خشکی عملکرد دانه کنجد متأثر از اجزایی نظیر تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول کاهش می یابد. در پژوهشی دیگر نتایج تجزیه واریانس نشان داد که بین ارقام و رژیم های آبیاری از نظر عملکرد دانه و کارایی مصرف آب اختلاف معنی‌داری وجود داشت. در شرایط تنش کم‌آبیاری عملکرد دانه کاهش و کارایی مصرف آب افزایش یافت (Eskandari *et al.*, 2010). بیشترین عملکرد دانه در گیاه کنجد، در شرایط آبیاری کامل به دست آمد و با افزایش شدت تنش کم‌آبی از عملکرد دانه کاسته شد (Dargahi *et al.*, 2014، Kassab *et al.*, 2012 و Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012). سعیدی و همکاران (Saeidi *et al.*, 2012) گزارش کردند با افزایش تنش خشکی، عملکرد دانه کنجد کاهش می‌یابد. در آزمایش آن‌ها بیش‌ترین تعداد دانه در کپسول و بیش‌ترین تعداد کپسول در گیاه در ارقام داراب ۱۴ و سیرجان مشاهده شد. نتایج حاصل از تجزیه ضرائب همبستگی بین عملکرد دانه در بوته با صفات موجود نشان داد که در

هر دو رژیم رطوبتی، تعداد کپسول در بوته بیش‌ترین اثر مستقیم مثبت بر عملکرد دانه را داشته است.

افشاری و همکاران (Afshari *et al.*, 2020) به‌منظور بررسی عملکرد و کارایی مصرف آب در گندم (چمران ۲)، کلزا (هایولا ۵۰)، سیب‌زمینی (سانته) و ذرت (۷۰۴) تحت سطوح مختلف آبیاری، پژوهشی را در مرکز تحقیقات و کشاورزی جیرفت انجام دادند. میزان آبیاری در سه سطح ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاهان بود. صفات عملکرد، وزن بیوماس، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب برای گیاهان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثر سطوح آبیاری بر عملکرد دانه، وزن بیوماس و کارایی مصرف آب گیاهان مختلف در سطح ۱ درصد و شاخص برداشت در سطح ۵ درصد معنی‌دار بودند. با افزایش آب آبیاری، صفات عملکرد و وزن بیوماس در همه گیاهان به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. کارایی مصرف آب کلزا از ۱/۲۹ تا ۱/۸۴ کیلوگرم بر متر مکعب در نوسان بود. فرحزا و همکاران (Farahza *et al.*, 2020) با انجام پژوهشی در دشت مغان به ارزیابی وضعیت بهره‌وری آب محصولات زراعی با استفاده از شاخص‌های بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی پرداختند. بهره‌وری فیزیکی آب محصولات گندم، کلزا، سویا، برنج، ذرت علوفه‌ای، ذرت دانه‌ای، خربزه، یونجه، گوجه فرنگی، جو، شلیل، هندوانه، خیار و چغندرقند محاسبه شدند. بهره‌وری فیزیکی آب کلزا ۰/۶۷ و بهره‌وری اقتصادی آن معادل ۷۰۲ تومان بر مترمکعب محاسبه شدند. عباس‌پور و یزدان‌پناه (Abaspour and Yazdanpanah, 2021) به منظور بررسی تأثیر دور و روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی بر ویژگی‌های رشدی گیاه کلزا ، آزمایشی در ایستگاه مرکز تحقیقات کشاورزی حاجی‌آباد در استان هرمزگان انجام دادند. در این راستا، سه دور آبیاری شامل آبیاری پس از ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر تبخیر از سطح تشت تبخیر (به‌ترتیب I_1، I_2 و I_3) و دو روش آبیاری قطره‌ای (سطحی و زیرسطحی) انجام شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین و کم‌ترین عملکرد محصول (۱/۹۷ – ۳/۱۵ تن در هکتار)، وزن هزار دانه (۴/۸۲–۳/۳۸ گرم) و تعداد دانه در خورجین (۲۴/۱–۱۴/۵) به‌ترتیب در دور آبیاری I_1 و I_3 ایجاد شد. این در حالی بود که تیمار دور آبیاری I_2 افزایش ۹/۶ درصدی کارایی مصرف آب را نسبت به دور آبیاری I_1 را به‌همراه داشت.

کلزا به عنوان یکی از محصولات مهم تامین کننده روغن خوراکی در ایران مورد اهمیت قرار دارد. لذا در هنگام بروز خشکسالی با اجرای روش کم آبیاری می‌توان با رسیدن به عملکرد و بهره‌وری آب بهینه، با کمبود آب سازگار شد. بر اساس آمارنامه کشاورزی مربوط به سال زراعی ۱۳۹۷– ۱۳۹۶، سطح زیرکشت کلزا در کشور در اراضی آبی و دیم به‌ترتیب معادل ۱۵۵۶۲۲ و ۳۵۶۲۹ هکتار و عملکرد به‌ترتیب معادل ۱۷۷۷ و ۱۴۹۵ هکتار اعلام شد. همچنین سطح زیرکشت کلزا در استان خوزستان در اراضی آبی و دیم به‌ترتیب معادل ۱۵۴۲۱ و ۲۵۸۵ هکتار و عملکرد به‌ترتیب معادل ۱۹۵۲ و ۴۳۱ هکتار اعلام گردید (Anonymous, 2019). تا کنون تحقیقاتی در ارتباط با مطالعه اثرات هم‌زمان میزان آب مصرفی بر اجزای عملکرد، عملکرد و بهره‌وری آب و همچنین اثر همه عوامل مستقل بر عملکرد و بهره‌وری آب کلزا یا انجام نشده و یا نتایج چنین تحقیقاتی تا کنون منتشر نشده است. به منظور بررسی تأثیر مقدار آب در آبیاری قطره‌ای بر عملکرد، اجزای عملکرد، بهره‌وری آب، ابتدا اثر متغیر مستقل حجم آب مصرفی بر متغیرهای وابسته بررسی شده و متغیر وابسته‌ای که بیش‌ترین تاثیرپذیری مستقیم از مصرف آب را داشت مشخص شد. همچنین متغیر مستقلی که بیش‌ترین اثر آماری را بر بهره‌وری آب و عملکرد داشت نیز مشخص گردید. لذا این پژوهش با هدف بررسی اثر متغیر مستقل حجم آب مصرفی بر دیگر متغیرهای این پژوهش ازیک سو انجام شده و از سوی دیگر اثر کل متغیرهای مستقل (اجزای عملکرد و دیگر عوامل مستقل) بر عملکرد و بهره‌وری آب به عنوان متغیرهای وابسته مورد ارزیابی قرار گرفتند. در پایان مهم‌ترین متغیرهای مستقل اثر گذار بر عملکرد و بهروری آب مشخص و همچنین حساس‌ترین متغیرها به مقدار آب مصرفی تعیین شدند.

مواد و روش‌ها

۱ – آزمایش‌های مزرعه‌ای: به منظور بررسی تأثیر مقدار آب در آبیاری قطره‌ای بر دو رقم کلزا آزمایشی در ایستگاه تحقیقات کشاورزی بهبهان با طول جغرافیایی ۱۴: ۵۰° شرقی و ۳۶: ۳۰° عرض شمالی در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به صورت کرت‌های یک بار خرد شده با سه تکرار طی دو سال (۱۳۹۱ – ۱۳۸۹) اجرا گردید. محل آزمایش دارای اقلیم نیمه خشک، ارتفاع آن از سطح دریا ۳۴۵ متر و متوسط بارندگی سالانه ۳۴۹ میلی‌متر است. مقدار آب در آبیاری قطره‌ای نواری (Tape) در چهار سطح ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی در کرت‌های اصلی و دو رقم کلزا شامل هیبرید Hyola 401 و رقم RGS003 در کرت‌های فرعی مورد مقایسه قرار گرفتند. برای انجام آبیاری از لوله‌های قطره‌ای نواری با فاصله قطره‌چکان‌های ۲۰ سانتی‌متر با محدوده‌ی آبدهی از ۱/۳۸ تا ۲/۷ لیتر در ساعت و ماگزیمم فشار تحملی ۰/۲ مگاپاسکال استفاده شد (لوله‌های sunstream) برای اجرای آزمایش، ابتدا عملیات خاک‌ورزی لازم (شامل شخم، دیسک و ماله)، انجام شده و آن‌گاه براساس نتایج آزمایشات «تجزیه خاک» اقدام به کودپاشی و پخش یکنواخت علف‌کش ترفلان به میزان ۲/۵ لیتر در هکتار در سطح مزرعه شد. سپس کود و علف‌کش به‌وسیله دیسک سبک با خاک مخلوط گردیدند. کودهای فسفره و پتاسه بر اساس نتایج آزمون خاک قبل از کاشت به مقدار ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار پتاس از منبع سولفات پتاسیم و ۷۰ کیلوگرم فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل به خاک داده

شـد.کود نیتروژنه به میزان ۱۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص از منبع اوره در سـه نوبت یک‌چهارم در مرحله ۳ برگی (سـال اول ۲۰ آبان ماه و سـال دوم ۲۲ آبان ماه)، یک‌دوم در مرحله سـاقه دهی (سـال اول ۲۰ دی‌ماه و سال دوم ۲۴ دی‌ماه) و یک‌چهارم در مرحله غنچه‌دهی کامل (سـال اول ۱۸ بهمن و سال دوم ۲۳ بهمن‌ماه) مصرف گردید. کشت به روش دسـتی با تراکم ۵ کیلوگرم در هکتار روی دو طرف پشـته با فاصـله خطوط کاشـت ۳۰ سـانتی‌متر (عرض پشـته‌ها ۶۰ سانتی‌متر) انجام شـد. هر تیمار آبیاری در هر تکرار در ۲ پشـته (۴ خط کشت) به طول ۳۰ متر کشـــت گردیـد. در ســـال اول و دوم اجرای پروژه‌ی تحقیقاتی، تاریخ کاشـت و برداشـت به‌ترتیب ۱۵ آبان و ۳ اردیبهشت ثبت شد.

در هر ســـال قبل از کاشـــت، نمونه‌برداری از خاک جهت آزمون انجـام شـــد. از آب آبیـاری نمونه‌ی آب تهیه و برای اندازه‌گیری‌های خصـوصیات مورد نظر به آزمایشگاه ارسال گردید. نتایج آزمایشات آب و خاک در جدول ۱ و جدول ۲ نشـان داده شـده اسـت. در شـکل ۱ تصاویری از پروژه‌ی تحقیقاتی اجرا شده نشان داده شده است.

۲ – طرح آماری: آمار روزانه بارندگی و پارامترهای هواشـناسی از اداره هواشـناسـی سـینوپتیک بهبهان اسـتعلام گردید. برای مدیریت دقیق آبیاری، با اسـتفاده از آمار روزانه‌ی ایسـتـــگاه هواشـناســـی ســـینوپتیک بهبهان (دمای حداقل و حداکثر روزانه، رطوبت حداقل و حداکثر روزانه، سرعت باد و حداکثر ساعات آفتابی)، تبخیر– تعرق گیاه به‌صـورت روزانه بر اساس مدل پنمن – مانتیث محاسبه شد (Allen *et al.*, 1998). با پایش اطلاعات به صورت روزانه، مدت‌زمان آبیاری محاسـبه و از طریق نمونه‌برداری خاک قبل از آبیاری‌ها، رطوبت وزنی و سـپس رطوبت حجمی و در نهایت کمبود رطوبت خاک مشـخص گردید و با میزان تبخیر تعرق محاسـبه شـده از آمار روزانه هواشناسی صحت‌سنجی شد.

شکل ۱– تصاویری از پروژه‌ی تحقیقاتی اجرا شده

Figure 1- Pictures of the implemented research project

جدول ۱– نتایج تجزیه نمونه آب

Table 1- Water sample analysis results

Year	EC (µS/m)	pH	T.D.S Mg/lit	Anions (meq/l)			Cations (meq/l)		
				cl^-	$So4^{-2}$	HCO_3	Na^+	Mg^{+2}	Ca^{+2}
2010-11	1640	7.4	1140	8.8	8.0	3.2	8.0	3.2	8.8
2011-12	1790	7.4	1140	8.7	8.1	3.2	7.9	3.2	8.8

جدول ۲– نتایج تجزیه نمونه خاک آزمایش قبل از کاشت

Table 2- Sample analysis of soil samples before planting

Year سال	FC (Weigh moisture %)	*pb* (g/cm^3)	K^+ (mg/kg)	P (mg/kg)	کربن آلی Organic carbon (%)	pH	EC (dS/m)	عمق خاک Soil depth (cm)	بافت خاک Soil texture
2010-11	24	1.57	246	9.5	0.64	7.5	2.8	0-30	Silty clay loam
2011-12	24	1.57	250	9.2	0.66	7.5	3.0	0-30	Silty clay loam

به این ترتیب نیاز آبی ۱۰۰ درصد روزانه گیاه محاسبه گردید. آن‌گاه مقادیر ۵۰، ۷۵ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی برای اعمال تیمارها محاسبه شد. سپس با کنتورهای با دقت ۰/۰۰۰۱ متر مکعب میزان آب مصرفی قرائت گردید. دور آبیاری دو روز تعریف شد و برای تعیین ضرایب گیاهی بر اساس نشریه فائو ۵۶ اقدام گردید. تبخیر تعرق روزانه با استفاده از نرم‌افزار ETocalculator محاسبه شد.

آب مورد نیاز برای آبشویی مزارع مورد مطالعه بر اساس نشریه فائو ۲۹ در آبیاری قطره‌ای از رابطه زیر برآورد شدند

$$LR=ECw /(2Max\ ECe) \quad (۱)$$

که در آن، ECw هدایت الکتریکی آب آبیاری، ECe آستانه تحمل محصول و MaxECe شوری با عملکرد صفر است. با استفاده از فرمول (۱) نیاز آبشویی بر حسب درصد محاسبه گردید و سپس با در نظر گرفتن نیاز آبی محاسبه شده در طول فصل برای کلزا، نیاز آبشویی بر حسب میلی‌متر محاسبه شد. آستانه تحمل با ۱۰۰ درصد کاهش عملکرد (عملکرد صفر) برای محصولات مورد مطالعه از نشریه فائو ۲۹ استخراج شد. Max ECe برای کلزا معادل ۲۰ (dS/m) استخراج شد.

جدول ۳- نیاز آبی حاصل از تبخیر تعرق محاسبه شده برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز آبی و نیاز آبشویی (میلی‌متر) (از ۱۵ آبان تا ۳ اردیبهشت)

Table 3- Water requirement from transpiration evaporation calculated for the treatment of 100% water requirement and leaching requirement (mm) (from November 6 to April 23)

Year	آبان October-November	آذر November-December	دی December-January	بهمن January-February	اسفند February-March	فروردین March-April	اردیبهشت April-May	نیاز آبشویی leaching requirement	مجموع Total
2010-11	11.1	22.3	44.1	62.8	107.9	121.8	8.9	15.9	394.9
2011-12	14.4	19.9	41.9	69.2	117.4	102.2	102.2	7.2	388.6
میانگین Average	12.7	21.1	43.0	66.0	112.7	111.9	111.9	8.1	391.8

شکل ۲- بارندگی سال زراعی ۹۰-۸۹ (الف) و سال زراعی ۹۱-۹۰ (ب) (از ۱۵ آبان تا ۳ اردیبهشت)

Figure 2- Rainfall of the crop year 2010-11 (A) and crop year 2011-12 (B) (from November 6 to April 23)

شکل ۳- تبخیرتعرق روزانه محاسبه شده در سال زراعی ۹۰-۸۹ (الف) و در سال زراعی ۹۱-۹۰ (الف) (از ۱۵ آبان تا ۳ اردیبهشت)

Figure 3- Daily evapotranspiration calculated in the crop year 2010-11 (A) and crop year 2011-12 (B) (from November 6 to April 23)

راندمان آبیاری فصلی پیش‌بینی شده ۹۵٪ در نظر گرفته شد. مقدار آب مورد نیاز کلزا حاصل مجموع نیاز آبشویی (از رابطه ۱) و تبخیر تعرق روزانه در طول فصل کشت (از تاریخ ۱۵ آبان ماه تا ۳ اردیبهشت‌ماه) محاسبه گردید (جدول ۳). بارندگی روزانه در دو سال انجام آزمایش در شکل (۲- A و B) و تبخیر تعرق روزانه محاسبه شده با نرم‌افزار ETcalculator در شکل (۳- A و B) نشان داده شده‌اند.

در طول فصل زراعی طول دوره گل‌دهی ثبت شد و در پایان دوره رشد و قبل از برداشت صفاتی مانند تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، بهره‌وری آب و ارتفاع بوته اندازه‌گیری یا محاسبه گردیدند. در پایان اجرای آزمایش، تجزیه واریانس بر اساس آزمون طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی به‌صورت کرت‌های یک‌بار خرد شده برای صفات مزبور انجام گردید. تجزیه آماری توسط نرم‌افزار MSTATC انجام شد. برای تجزیه و تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی[1] به روش گام به گام[2] از نرم‌افزار SPSS16 بهره گرفته شد. تجزیه فوق به‌منظور تبیین میزان تغییرات متغیرهای مستقل و تعیین معادله‌ی تخمین عملکرد و بهره‌وری آب کلزا به‌عنوان متغیر وابسته انجام شد.

اثر صفات تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، حجم آب مصرفی، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته به عنوان پارامترهای وابسته بر عملکرد و بهره‌وری آب به‌عنوان پارمترهای مستقل بررسی شدند و این بررسی توسط آنالیز تجزیه واریانس رگرسیون و با نرم‌افزار SPSS16 انجام شد. اگر در جدول تجزیه واریانس رگرسیون، سطح معنی‌داری از ۵ درصد بیش‌تر بود با حذف پارامترهای مستقلی که نزدیک‌ترین آماره t به عدد صفر را داشتند با تجزیه رگرسیون مجدد این کار تا مرحله‌ای ادامه پیدا نمود تا سطح معنی‌داری جدول تجزیه واریانس مدل رگرسیون حداقل به زیر ۵ درصد برسد. متغیر مستقلی که ضریب t آن در جدول تجزیه واریانس رگرسیون به ۱/۹۶ یا ۲/۵۶ یا (۱/۹۶- یا ۲/۵۶-) رسید اثر آن متغیر مستقل بر متغیر وابسته به‌ترتیب در سطوح ۵ و ۱ درصد معنی‌دار بود. لذا متغیری که دارای بیش‌ترین قدرمطلق ضریب t در جدول تجزیه واریانس رگرسیون بود، بیش‌ترین اثر معنی دار را بر متغیر وابسته داشت. منفی یا مثبت بودن ضریب t به معنی غیرهمراستا یا هم‌راستا بودن روند تغییرات متغیر مستقل با متغیر وابسته می‌باشد. برای مقایسه آماری نتایج حاصل از پارامترهای اندازه‌گیری یا محاسبه شده از ضرایب همبستگی پیرسون استفاده شد. تجزیه و تحلیل نتایج، بر اساس معنی‌دار بودن ضرایب همبستگی متغیرهای مستقل، عملکرد و بهره‌وری آب در سطوح ۱ و ۵ درصد، انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس میانگین صفات نشان داد اثر سطوح آبیاری بر شاخص‌های تعداد خورجین در بوته، وزن هزار دانه، بهره‌وری آب، ارتفاع بوته و دوره گل‌دهی در سطح ۱ درصد معنی‌دار و بر تعداد دانه در خورجین و عملکرد در سطح ۵ درصد معنی دار بودند. ولی اثرات رقم و اثرات متقابل آبیاری و رقم بر همه شاخص‌فوق معنی‌دار نبود به‌جز ارتفاع بوته که در سطح ۱ درصد معنی‌دار بودند. معنی‌دار بودن اثر سطوح مختلف آبیاری بر شاخص‌های فوق با نتایج تحقیقات دانشمند و همکاران (Daneshmand *et al.*, 2008)، درگاهی و همکاران (Dargahi *et al.*, 2014)، کساب و همکاران (Kassab *et al.*, 2012) و شکوه‌فر و یعقوبی‌نژاد (Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012) مطابقت داشت (جدول ۴).

نتایج تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل حجم آب مصرفی در مدل رگرسیون در جدول ۵ و ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر مستقل حجم آب مصرفی نسبت به متغیرهای وابسته تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد، بهره‌وری آب، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در متغیر وابسته تعداد خورجین در بوته، متغیر مستقل حجم آب مصرفی، ۴۶/۴ درصد (R^2=۰/۴۶۴) میزان نوسانات متغیر وابسته (تعداد خورجین در بوته) را تبیین کرد و از طرفی معنی‌دار بودن رگرسیون و رابطه خطی بین متغیرها نیز مشخص شد (P<۰/۰۱) (جدول ۵). حجم آب مصرفی به‌ترتیب از صعودی به نزولی، به‌میزان‌های ۸۸/۲ درصد (R^2=۰/۸۸۲)، ۶۶/۲ درصد (R^2=۰/۶۶۲) و ۶۲/۸ درصد (R^2=۰/۶۲۸) از نوسانات متغیرهای وابسته بهره‌وری آب، تعداد دانه در خورجین و عملکرد را تبیین کردند. معنی‌دار بودن رگرسیون و رابطه خطی بین متغیرها نیز مشخص شد (P<۰/۰۱) (جدول ۵). کم‌ترین اثر حجم آب مصرفی بر متغیر دوره گل‌دهی با میزان ۹/۷ درصد (R^2=۰/۰۹۷)، محاسبه شد. رگرسیون و رابطه خطی بین متغیرها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). ضرایب معادلات مستخرجه از مدل نهایی رگرسیون یک متغیره برای متغیرهای وابسته تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، عملکرد، بهره‌وری آب، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته در جدول ۶ نشان داده شده است. حجم آب مصرفی، با ضریب بتای ۰/۸۶۰ و آماره t به‌میزان ۱۳/۲۴۶ بیش‌ترین اثر را بر متغیر ارتفاع بوته داشت.

1- Linear Multivariate Regression

2- Stepwise

جدول ٤- مقایسه میانگین مربعات و سطح معنی‌دار بودن عملکرد و اجزای عملکرد و بهره‌وری آب (تجزیه مرکب)

Table 4- Comparison of mean squares and significance level of yield and yield components and water use efficiency (composite analysis)

منابع تغییرات Sources of changes	درجه آزادی Degrees of freedom	تعداد خورجین در بوته Number of pods per plant	تعداد دانه در خورجین Number of seeds per pod	وزن هزار دانه The weight of one thousand seeds	عملکرد Yield	بهره‌وری آب Water use efficiency	ارتفاع بوته Bush height	دوره رشد Growth period	دوره گل‌دهی Flowering period
سال Year	1	60.1 n.s	9.0 n.s	0.000 n.s	680137.6 n.s	0.047 n.s	0.1 n.s	62.0 n.s	1.3 n.s
تکرار Repeat	6	15.5 n.s	5.9 n.s	0.098 n.s	7083.2 n.s	0.001 n.s	6.0 n.s	4.8 n.s	0.2 n.s
آبیاری Irrigation	3	865.2**	222.5**	1.104**	2312985.1*	0.854**	4023.6**	57.7 n.s	5.3**
سال* آبیاری Irrigation* Year	3	24.1 n.s	7.0 n.s	0.010 n.s	80501.0 n.s	0.002 n.s	0.9 n.s	17.2 n.s	0.1 n.s
خطا Error	18	32.6	3.3	0.088	37262.8	0.005	18.7	10.5	1.1
رقم Variety	1	885.1 n.s	30.3 n.s	0.396 n.s	696667.4 n.s	0.084 n.s	1774.5**	284.8 n.s	40.6 n.s
سال * رقم Variety* Year	1	7.6 n.s	2.3 n.s	0.004 n.s	5283.5 n.s	0.002 n.s	0.0 n.s	5.6 n.s	0.4 n.s
سطوح آبیاری * رقم Irrigation* Variety	3	83.2 n.s	2.9 n.s	0.049 n.s	10262.2 n.s	0.009 n.s	151.1**	22.3 n.s	0.9 n.s
سال* آبیاری * رقم Variety* Irrigation* Year	3	9.2 n.s	4.4 n.s	0.006 n.s	10546.3 n.s	0.003 n.s	1.5 n.s	9.6 n.s	0.4 n.s
خطا Error	24	37.8	3.5	0.093	21460.8	0.002	5.3	6.2	0.3 n.s
ضریب تغییرات Coefficient of variation		5.27	6.78	3.93	5.16	7.67	2.74	2.04	3.85

** : اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ * : اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد .

**:Significant difference at 1% level, *:Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference

جدول ۵- تجزیه و تحلیل واریانس متغیر مستقل حجم آب مصرفی در مدل رگرسیون برای متغیرهای وابسته

Table 5- Analysis of variance of independent variable consumed water volume in the regression model of water for dependent variables

متغیر وابسته The dependent variable	منابع تغییر Sources Change	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares	F محاسبه شده F Value	ضریب رگرسیون The regression coefficient	ضریب تبیین R-square	ضریب تبیین تعدیل شده Corrected R-square	سطح معنی‌داری Sig
Number of تعداد خورجین در بوته pods per plant	Model مدل	1	2542.513	53.583	0.681	0.464	0.455	0.000 **
	Error خطا	62	47.450					
	Total کل	63						
Number of تعداد دانه در خورجین seeds per pod	Model مدل	1	616.050	121.660	0.814	0.662	0.657	0.000 **
	Error خطا	62	5.064					
	Total کل	63						
The weight of one وزن هزار دانه thousand seeds	Model مدل	1	3.151	37.914	0.616	0.379	0.369	0.000 **
	Error خطا	62	.083					
	Total کل	63						
Yield عملکرد	Model مدل	1	6188872.171	104.713	0.793	0.628	0.622	0.000 **
	Error خطا	62	59103.062					
	Total کل	63						
Water use efficiency بهره‌وری آب	Model مدل	1	2.536	461.221	0.939	0.882	0.880	0.000 **
	Error خطا	62	.005					
	Total کل	63						
Flowering period دوره گل‌دهی	Model مدل	1	8.778	6.681	0.312	0.097	0.083	0.012*
	Error خطا	62	1.314					
	Total کل	63						
Growth period دوره رشد	Model مدل	1	118.828	7.998	0.338	0.114	0.100	0.000 **
	Error خطا	62	14.857					
	Total کل	63						
Bush height ارتفاع بوته	Model مدل	1	10939.503	175.457	0.860	0.739	0.735	0.000 **
	Error خطا	62	62.348					
	Total کل	63						

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

جدول ٦- ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیرهای وابسته

Table 6- Coefficients of variables in the regression equation model for dependent variables

متغیر وابسته The dependent variable	مدل Model	ضرایب غیر استاندارد Unstandardized Coefficients		ضرایب استاندارد Standardized Coefficients	t محاسبه شده t Value	سطح معنی‌داری Sig.
		ضریب B B coefficient	خطای معیار The standard error	Beta		
تعداد خورجین در بوته Number of pods per plant	عدد ثابت constant number	96.925	2.830	-	.681	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_1$	.006	.001	.681	7.113	0.000 **
تعداد دانه در خورجین Number of seeds per pod	عدد ثابت constant number	17.788	.924	-	19.242	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_2$	.003	.000	.814	11.030	0.000 **
وزن هزار دانه The weight of one thousand seeds	عدد ثابت constant number	2.769	.118	-	23.384	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_3$	.000	.000	.616	6.157	0.000 **
عملکرد Yield	عدد ثابت constant number	1865.690	99.868		18.682	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_4$	.284	.028	.793	10.233	0.000 **
بهره‌وری آب Water use efficiency	عدد ثابت constant number	1.515	.030		49.723	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_5$	.000	.000	-.939	-1.476	0.000 **
دوره گل‌دهی Flowering period	عدد ثابت constant number	25.731	.471		54.648	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_6$	.000	.000	.312	2.585	0.012 *
دوره رشد Growth period	عدد ثابت constant number	154.219	1.583		97.397	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_7$	.001	.000	.338	2.828	0.006 **
ارتفاع بوته Bush height	عدد ثابت constant number	116.900	3.244		36.040	0.000 **
	حجم آب مصرفی consumed water volume $=X_8$	.012	.001	.860	13.246	0.000 **

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

رتبه دوم با ضریب بتای ۰/۸۱۴ و آماره t به‌میزان ۱۱/۰۳۰ به متغیر تعداد دانه در خورجین و رتبه‌ی سوم به عملکرد دانه رسید که دارای ضریب بتایی معادل ۰/۷۹۳ و آماره t به‌میزان ۱۰/۲۳۳ بودند (جدول ۶). لذا حجم آب مصرفی بیش‌ترین اثر خود را در بین متغیرهای وابسته بر ارتفاع بوته و دانه در خورجین نشان داد. بنابراین کاهش مصرف آب بیش‌ترین اثر کاهشی را بر ارتفاع بوته و متغیر دانه در خورجین گذاشت. همان‌طور که نتایج این تحقیق نشان داد بیش‌ترین اثر کاهش حجم آب مصرفی بعد از دانه در خورجین در عملکرد محاسبه شد که با نتایج پژوهش‌های پاسبان اسلام (Pasban Eslam, 2008) و مهرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsan Zadeh, 2010) هم‌خوانی داشت. کاهش مصرف آب موجب کاهش دانه در خورجین، خورجین در بوته و وزن هزار دانه در سطوح مختلف تنش خشکی شده و به‌تبع آن موجب کاهش عملکرد دانه گردید که با نتایج پژوهش درگاهی و همکاران (Dargahi *et al.*, 2014)، کساب و همکاران (Kassab *et al.*, 2012)، سعیدی و همکاران (Saeidi *et al.*, 2012) و شکوه‌فر و یعقوبی‌نژاد (Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012) مطابقت داشت.

برای متغیر وابسته عملکرد، نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در مدل رگرسیون در جدول ۷ و ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در صفت عملکرد، متغیرهای مورد بررسی (تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، و وزن هزار دانه، حجم آب مصرفی، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته) ۷۴/۱ درصد (R^2=۰/۷۴۱) میزان نوسانات متغیر وابسته (عملکرد کلزا) را تبیین کردند و از طرفی معنی‌دار بودن رگرسیون و رابطه خطی بین متغیرها نیز مشخص شد (P<۰/۰۱) (جدول ۷). در بین متغیرهای وابسته، حجم آب مصرفی با بالاترین قدرمطلق ضریب بتای ۰/۵۶۳ و آماره t به‌میزان ۲/۹۶۷ بیش‌ترین اثر معنی‌دار در سطح ۱ درصد را بر عملکرد گذاشت. دوره گل‌دهی با ضریب بتای ۰/۲۰۳- و آماره t به‌میزان ۲/۲۹۱- اثر منفی و معنی‌داری در سطح ۵ درصد بر عملکرد داشت (جدول ۸). به‌عبارت دیگر افزایش حجم آب مصرفی موجب افزایش معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر عملکرد شده است. ارتفاع بوته با ضریب بتای ۰/۳۱۱ و آماره t به‌میزان ۱/۶۳۰ در رتبه دوم اثر گذاری بر عملکرد قرار داشت. ولی این اثر معنی‌دار نبود (جدول ۸).

دقت در این اعداد نشان داد که بیش‌تر بودن قدرمطلق ضرایب بتا و آماره t هر متغیر مستقل موجب شد تا آن متغیر به عنوان حساس‌ترین متغیر مستقل اثر گذار بر عملکرد معرفی شود. اثر کاهشی مصرف آب در کاهش ضریب بتا و آماره t خودنمایی کرد. لذا اثر کاهشی اجزای عملکرد با کاهش مصرف آب در کم‌تر شدن میزان ضریب بتا و آماره t جلوه‌گر شد. بنابراین کاهش مصرف آب موجب کاهش ضریب بتا و آماره t گردیده و این کاهش با کاهش عملکرد همراه بود که با نتایج پژوهش‌های پاسبان اسلام (Pasban Eslam, 2008) و مهرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsan Zadeh, 2010) هم‌خوانی داشت. کاهش مصرف آب موجب کاهش دانه در خورجین، خورجین در بوته و وزن هزار دانه در سطوح مختلف تنش خشکی شده و به‌تبع آن موجب کاهش عملکرد دانه گردید که با نتایج پژوهش درگاهی و همکاران (Dargahi *et al.*, 2014)، کساب و همکاران (Kassab *et al.*, 2012)، سعیدی و همکاران (Saeidi *et al.*, 2012) و شکوه‌فر و یعقوبی‌نژاد (Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012) مطابقت داشت.

کاهش حجم آب مصرفی در روش آبیاری قطره‌ای در سطوح مختلف نیاز آبی از ۷۵ درصد تا ۵۰ درصد نیاز آبی موجب شد تا اثرات منفی بر میزان متغیرهای مستقل (دانه در خورجین، خورجین در بوته و وزن هزار دانه) داشته باشد. اثرات کاهش اجزای عملکرد در کاهش عملکرد موثر بود. لذا کاهش مصرف آب در کلزا موجب کاهش عملکرد شده است که با نتایج تحقیقات مهرابی و احسان‌زاده (Mehrabi and Ehsan Zadeh, 2010)، درگاهی و همکاران (Dargahi *et al.*, 2014) و اسکندری و همکاران (Eskandari *et al.*, 2010) مطابقت داشت.

جدول ۷- تجزیه و تحلیل واریانس در مدل رگرسیون برای متغیرهای وابسته عملکرد

Table 7- Analysis of variance in regression model for yield dependent variable

منابع تغییر Sources Change	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares	F محاسبه شده F Value	ضریب رگرسیون The regression coefficient	ضریب تبیین R-square	ضریب تبیین تعدیل شده Corrected R-square	سطح معنی‌داری Sig.
Model مدل	7	1042747.552	22.863	0.861	0.741	0.708	0.000 **
Error خطا	56	45607.663					
Total کل	63						

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

جدول ۸- ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر و ابسته عملکرد

Table 8- Coefficients of variables in the regression equation for variables yield dependent

مدل Model	ضرایب غیر استاندارد Unstandardized Coefficients		ضرایب استاندارد Standardized Coefficients	t محاسبه شده t Value	سطح معنی‌داری Sig.
	ضریب B B coefficient	خطای معیار The standard error	Beta		
constant number عدد ثابت	3024.327	1690.663	-	1.789	0.079 n.s
Number of pods per plant تعداد خورجین در بوته=X_1	-1.334	4.594	-0.031	-0.290	0.773 n.s
Number of seeds per pod تعداد دانه در خورجین=X_2	3.085	14.195	0.030	0.217	0.829 n.s
The weight of one thousand seeds وزن هزار دانه=X_3	57.077	102.175	0.052	0.559	0.579 n.s
Volume of water consumption حجم آب مصرفی =X_4	-67.004	29.247	0.563	2.967	0.004 **
Flowering period دوره گل‌دهی=X_5	-2.960	7.865	-0.203	-2.291	0.026 *
Growth period دوره رشد =X_6	8.027	4.925	-0.030	-0.376	0.708 n.s
Bush height ارتفاع بوته=X_7	3024.327	1690.663	0.311	1.630	0.109 n.s

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

برای متغیر وابسته بهره‌وری آب، نتایج تجزیه و تحلیل واریانس در مدل رگرسیون در جدول ۹ و ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون در جدول ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که در صفت بهره‌وری آب، متغیرهای مستقل مورد بررسی (تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، و وزن هزار دانه، عملکرد، حجم آب مصرفی، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته) ۹۵/۹ درصد (R^2=۰/۹۵۹) میزان نوسانات متغیر وابسته (بهره‌وری آب کلزا) را تبیین کردند و از طرفی معنی‌دار بودن رگرسیون و رابطه خطی بین متغیرها نیز مشخص شد (P<۰/۰۱) (جدول ۹). در بین متغیرهای وابسته، حجم آب مصرفی با بالاترین قدرمطلق ضریب بتای ۱/۰۱۳- و آماره t به‌میزان ۱۲/۴۱۵- بیش‌ترین اثر منفی معنی‌دار در سطح ۱ درصد را بر بهره‌وری آب گذاشت. عملکرد با ضریب بتای ۰/۴۲۷ و آماره t به‌میزان ۸/۰۰۰ در رتبه‌ی دوم اثرگذاری بر بهره‌وری آب کلزا جای گرفت و این اثر در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۱۰).

دوره رشد با ضریب بتای ۰/۱۴۱- و آماره t به‌میزان ۴/۳۵۳- و ارتفاع بوته با ضریب بتای ۰/۲۷۹- و آماره t به‌میزان ۳/۵۷۵- هر دو اثر منفی و معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر بهره‌وری آب داشتند. به‌عبارت دیگر با افزایش دوره رشد کلزا و ارتفاع بوته بهره‌وری آب سیری نزولی در پیش گرفت. افزایش دوره رشد و ارتفاع بوته‌ی کلزا نیازمند آبیاری و به‌تبع آن افزایش حجم آب مصرفی است. افزایش آب مصرفی موجب کاهش بهره‌وری آب کلزا گردید. لذا کاهش آب مصرفی که موجب کاهش عملکرد کلزا شده از طرفی دیگر موجب افزایش بهره‌وری شد. بنابراین با کاهش آب مصرفی، دوره رشد کلزا کوتاه‌تر، ارتفاع بوته کاهش یافته و به‌تبع آن کاهش عملکرد و افزایش بهره‌وری آب اتفاق افتاد. بنابراین کاهش مصرف آب موجب کاهش ارتفاع بوته شده که با نتایج تحقیق اسکندری و همکاران (Eskandari *et al.*, 2010) هم‌خوانی داشت. اجزای عملکرد شامل تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه (به‌عنوان متغیرهای مستقل) اثر معنی‌داری بر بهره‌وری آب نداشتند (جدول ۱۰).

نتایج ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده برای صفات اندازه‌گیری شده در جدول ۱۱ نشان داد که:

عملکرد دانه همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح ۱ درصد با صفات تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، وزن هزار دانه، حجم آب مصرفی و ارتفاع بوته و همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۱ درصد با بهره‌وری آب داشتند. بیش‌ترین میزان همبستگی عملکرد دانه به‌ترتیب از صعودی به نزولی با صفات ارتفاع بوته، حجم آب مصرفی، تعداد دانه در خورجین، تعداد خورجین در بوته و وزن هزار دانه به‌ترتیب به میزان‌های ۰/۸۲۷، ۰/۷۹۳، ۰/۷۴۳، ۰/۶۵۰ و ۰/۶۰۲محاسبه شدند (جدول ۱۱). این میزان بالای همبستگی عملکرد با اجزای عملکرد، بیان‌گر نقش مؤثر اجزای عملکرد از جمله تعداد دانه در خورجین در افزایش عملکرد کلزا بود. اهمیت سیرصعودی وزن هزار دانه و اجزای عملکرد در افزایش عملکرد دانه و به‌تبع آن اعمال کم‌آبیاری و وقوع تنش خشکی در کاهش عملکرد و اجزای عملکرد

کلزا بـا نتایج تحقیقات نعیمی و همکاران (۲۰۰۸)، جرمولا و همکاران (۲۰۰۸) و ایوانووسـکا و همکاران (۲۰۰۷) مطابقت و هم‌خوانی داشت. همچنین بالاترین میزان همبستگی عملکرد با اجزای عملکرد با تعداد دانه در خورجین به میزان (r=۰/۷۴۳) محاسـبه شد. لذا می‌توان تعداد دانـه در خورجین را بـه‌عنوان مهم‌ترین جزء عملکرد کـه افزایش یـا کـاهش آن بـه‌ترتیـب بیش‌ترین میزان تـاثیر را در افزایش یا کاهش عملکرد داشت معرفی نمود.

خورجین در بوتـه، دانـه در خورجین، ارتفاع بوته، و وزن هزار دانه همگی به‌ترتیب همبستگی مثبت و معنی‌داری در سطح ۱ درصد با هم داشتند. بیش‌ترین میزان همبستگی ارتفاع بوته به میزان (r=۰/۸۶۰) با حجم آب مصـرفی محاسـبه شد که نشان دهنده نقش افزایشی حجم آب مصـرفی در روند صـعودی بسیار معنی‌دار ارتفاع بوته بود و رتبه‌ی بعدی به میزان (r=۰/۸۴۹) با دانه در خورجین محاسـبه شـد (جدول ۱۱). لذا افزایش حجم آب مصرفی موجب افزایش ارتفاع بوته و اجزای عملکرد از جملـه دانـه در خورجین گردیـده و متعـاقباً موجب افزایش عملکرد دانه شـد. لذا کاهش حجم آب مصرفی و به‌تبع آن بروز تنش خشـکی با اعمال کم‌آبیاری در کلزا همانند تحقیقات پاسـبان اسـلام (Pasban Eslam, 2008)، شکوه‌فر و یعقوبی‌نژاد (Shokoufar and Yaghoobinejad, 2012) و اسکندری و همکاران (Eskandari *et al.*, 2010) موجب کاهش عملکرد و اجزای عملکرد شد.

جدول ۹- تجزیه و تحلیل واریانس در مدل رگرسیون برای متغیر وابسته بهره‌وری آب

Table 9- Analysis of variance in regression model for water use efficiency dependent variable

منابع تغییر Sources Change	درجه آزادی Degrees of freedom	میانگین مربعات Mean squares	F محاسبه شده F Value	ضریب رگرسیون Regression coefficient	ضریب تبیین R-square	ضریب تبیین تعدیل شده Corrected R-square	سطح معنی‌داری Sig.
مدل Model	8	0.345	162.248	0.979	0.959	0.953	0.000 **
خطا Error	55	0.002					
کل Total	63						

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

جدول ۱۰- ضرایب متغیرها در معادله رگرسیون برای متغیر و ابسته بهره‌وری آب

Table 10- Coefficients of variables in the regression equation for variables water use efficiency dependent

مدل Model	ضرایب غیر استاندارد Unstandardized Coefficients		ضرایب استاندارد Standardized Coefficients	t محاسبه شده t Value	سطح معنی‌داری Sig.
	ضریب B B coefficient	خطای معیار The standard error	Beta		
عدد ثابت constant number	2.606	0.375	-	6.943	0.000 n.s
تعداد خورجین در بوته Number of pods per plant=X_1	0.001	0.001	0.041	0.955	0.344 n.s
تعداد دانه در خورجین Number of seeds per pod=X_2	0.000	0.003	-0.010	-0.178	0.859 n.s
وزن هزار دانه The weight of one thousand seeds=X_3	0.004	0.022	0.008	0.201	0.841 n.s
عملکرد Yield=X_4	0.000	0.000	0.427	8.000	0.000 **
حجم آب مصرفی Volume of water consumption =X_5	0.000	0.000	-1.013	-12.415	0.000 **
دوره گل‌دهی Flowering period=X_6	0.000	0.007	-0.004	-0.117	0.907 n.s
دوره رشد Growth period =X_7	-0.007	0.002	-0.141	-4.353	0.000 **
ارتفاع بوته Bush height=X_8	-0.004	0.001	-0.279	-3.575	0.001 **

**: اختلاف معنی‌دار در سطح ۱٪ *: اختلاف معنی‌دار در سطح ۵٪ n.s. اختلاف معنی‌داری وجود ندارد.

**:Significant difference at 1% level, *: Significant difference at 5% level, n.s: There was no significant difference.

جدول ۱۱- ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شده برای متغیرهای مختلف

Table 11- Pearson correlation coefficient calculated for different variables

N=64 5%=0.246 1%=0.320	تعداد خورجین در بوته Number of pods per plant	تعداد دانه در خورجین Number of seeds per pod	وزن هزار دانه (gr) The weight of one thousand seeds	عملکرد دانه Seed yield (kg/ha)	بهره‌وری آب (kg/m^3) Water use efficiency	حجم آب مصرفی Volume (m^3/ha) of consumed water	دوره گل‌دهی (day) Flowering period	دوره رشد(day) Growth period	ارتفاع بوته Bush (cm) height
Number of pods per plant تعداد خورجین در بوته	1.000	0.677**	0.574**	0.650**	-0.593**	0.681**	-0.057	0.052	0.763**
Number of seeds per pod تعداد دانه در خورجین		1.000	0.536**	0.743**	-0.746**	0.814**	0.057	0.165	0.849**
The weight of one thousand seeds (gr) وزن هزار دانه			1.000	0.602**	-0.543**	0.616**	-0.008	0.117	0.664**
(kg/ha) Seed yield عملکرد دانه				1.000	-0.598**	0.793**	-0.034	0.112	0.827**
Water use efficiency (kg/m^3) بهره‌وری آب					1.000	-0.939**	-0.400**	-0.461**	-0.782**
Volume of consumed water (m^3/ha) حجم آب مصرفی						1.000	0.312*	0.338**	0.860**
Flowering period (day) دوره گل‌دهی							1.000	0.422**	0.008
Growth period (day) دوره رشد								1.000	0.092
Bush height (cm) ارتفاع بوته									1.000

بیش‌ترین میزان همبستگی تعداد خورجین در بوته و دانه در خورجین هر دو با ارتفاع بوته به‌ترتیب به میزان‌های ۰/۷۶۳ و ۰/۸۴۹ محاسبه شدند که حاکی از موثر بودن افزایش ارتفاع بوته در افزایش تعداد خورجین در بوته و دانه در خورجین بود. بیش‌ترین میزان همبستگی وزن هزار دانه به میزان (r=۰/۷۴۳) با دانه در خورجین محاسبه شد که نشان دهنده نقش بسیار موثر تعداد دانه در خورجین در روند صعودی وزن هزاردانه و تواماً افزایش عملکرد دانه بود (جدول ۱۱). تمامی صفات اجزای عملکرد همبستگی مثبتی با همدیگر داشتند که نشان می‌دهد کاهش هر یک از این صفات می‌تواند اثر زیان‌باری بر عملکرد کلزا در مزرعه داشته باشد و مشابه تحقیقات آلگان و آیگان (Algan and Aygun, 2001)، روستاباغی و همکاران (Rosta Baghi *et al*., 2012)، کاهش هر یک از این صفات می‌تواند اثر زیان‌باری بر عملکرد کلزا در مزرعه داشته باشد.

حجم آب مصرفی همبستگی مثبت و معنی‌داری با صفات عملکرد دانه، ارتفاع بوته، دانه در خورجین، خورجین در بوته و وزن هزار دانه از خود نشان داد. دقت در اعداد همبستگی حجم آب مصرفی با اجزای عملکرد نیز قابل تامل بود. به‌طوری که این همبستگی به‌میزان (r=۰/۸۱۴) در تعداد دانه در خورجین به‌عنوان بیش‌ترین مقدار تا (r=۰/۶۱۶) در وزن هزار دانه به عنوان کم‌ترین میزان در نوسان بود. بنابراین همبستگی بسیار معنی‌دار حجم آب مصرفی با تعداد دانه در خورجین و وزن هزار دانه بیان‌گر اهمیت فوق‌العاده مدیریت کم‌آبیاری این محصول استرتژیک دارد. میزان کم نوسان همبستگی حجم آب مصرفی با اجزای عملکرد دانه از یک سو و در کل میزان همبستگی معنی‌دار آن با اجزای عملکرد از سوی دیگر، شاخصی بسیار مهم در اهمیت توجه به حجم آب مصرفی در کشت کلزا داشت. لذا همبستگی معنی دار حجم آب مصرفی با عملکرد و اجزای عملکرد دانه نشان دهنده حساس بودن گیاه کلزا به تنش کم‌آبی و توجه به مدیریت بهینه آب در کشت کلزا دارد (جدول ۱۱).

نتیجه‌گیری

میزان اثرگذاری متغیر مستقل حجم آب مصرفی بر اجزای عملکرد، ارتفاع بوته، عملکرد و بهره‌وری آب و همچنین مشخص شدن مهم‌ترین متغیر اثرگذار بر عملکرد و بهره‌وری آب از جمله دلایلی بود که پژوهش فوق به منظور پاسخ‌گویی به این سوالات اجرا شد. نتایج تجزیه واریانس مدل رگرسیون نشان داد حجم آب مصرفی به عنوان متغیر مستقل بر دیگر متغیرها (تعداد خورجین در بوته، تعداد دانه در خورجین، عملکرد، بهره‌وری آب، وزن هزار دانه، دوره گل‌دهی، دوره رشد و ارتفاع بوته) (به عنوان متغیر وابسته) اثر معنی‌داری در سطح ۱ درصد داشت به جز بر متغیر دوره گل‌دهی که این اثر در سطح ۵ درصد معنی‌دار شد. حجم آب مصرفی با تبیین ۶۶/۲ درصد تغییرات دانه در خورجین، بیش‌ترین اثر معنی‌دار را بر اجزای عملکرد گذاشت. لذا دانه در خورجین، بیش‌ترین تاثیر منفی را از کاهش مصرف آب ناشی تنش خشکی (بدلیل اعمال سطوح مختلف آبیاری) دریافت نمود. اثرات اجزای عملکرد بر عملکرد و بهره‌روی آب نسبت به دیگر متغیرهای مورد بررسی از جمله حجم آب مصرفی معنی‌دار نبود. با افزایش دوره رشد کلزا بهره‌وری آب کاهش معنی‌دار در سطح ۱ درصد را نشان داد. نتایج ضریب همبستگی پیرسون نشان داد بهره‌وری آب دانه همبستگی منفی و معنی‌داری در سطح ۱ درصد با همه متغیرها داشت. بیش‌ترین میزان همبستگی بهره‌وری آب به میزان (r=-۰/۹۳۹) با حجم آب مصرفی محاسبه شد که نشان دهنده اهمیت کاهش مصرف آب در افزایش بهره‌وری آب کلزا بود. با توجه به اهمیت دانه‌های روغنی در کشور پیشنهاد می‌گردد از نتایج این تحقیق به منظور شناسایی پارامترهای متغیر اثرگذار بر پارمترهای وابسته از جمله بهره‌وری آب در کم‌آبیاری قطره‌ای گیاه کنجد نیز استفاده شود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان به‌دلیل تقبل هزینه‌های مادی و حمایت‌های معنوی در انجام این تحقیق سپاسگزاری می‌شود.

منابع

1. Abaspour R., and Yazdanpanah N. 2021. Determining the optimal irrigation interval for canola plant in surface and subsurface drip irrigation methods in Hajiabad region. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 2(15): 444-454. (In Persian). https://dor.org/20.1001.1.20087942.1400.15.2.17.9.
2. Afshari A., Haghighatjo P., Karandish F., Mohammadrezapour O., and Kouhestani SH. 2020. The effect of deficit irrigation on yield and water use efficiency of several main crops in Jiroft. Iranian Journal of Soil and Water Research 51(8): 2137-2148. (In Persian with English abstract). https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.284116.668336.
3. Algan N., and Aygun H. 2001. Correlation between yield and yield components in some winter rape genotypes. The Journal of Ege University, Agricultural Faculty 38: 9-15.
4. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water

requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy.
5. Anonymous. 2019. Agricultural statistics of crops. Crop year 2017-18. Statistics and Information Unit of the Ministry of Jihad Agriculture. (In Persian)
6. Blum A. 2012. Plant breeding for water limited environments. Springer, New York, 2-57.
7. Daneshmand A.R., Shirani-Rad A.H., Nrmoouhammadi Gh., Zareei Gh., and Daneshian J. 2008. Effect of irrigation regimes and nitrogen levels on seed yield and seed quality of two rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. Iranian Journal of Crop Science 10(3): 244-261. (In Persian with English abstract)
8. Dargahi Y., Asghari A.S., Rasulzadeh A., Aghaeifard Kh., and Ahmadian M. 2014. Effect of water deficit stress on yield, water use efficiency and harvest index of sesame (*Sesamum indicum* L.) Varites. Journal of Crop Breeding and Horticulture 2(2): 171-183. (In Persian)
9. Eskandari H., ZehtabSalmasi S., and Ghasemi-Golozani K. 2010. Evaluation of water use efficiency and grain yield of sesame cultivars as a second crop under different irrigation regimes. Journal of Sustainable Agriculture Science 2(20): 39-51. (In Persian with English abstract)
10. Farahza MN., Nazari B., Akbari MR., Naeini MS., and Liaghat A. 2020. Assessing the physical and economic water productivity of annual crops in Moghan plain and analyzing the relationship between physical and economic water productivity. Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering 11(44): 166-179. (In Persian). https://dx.doi.org/10.22125/IWE.2020.120729.
11. Ghosh D.C., and Mukhopadhyay D. 1994. Growth and productivity of Indian rapeseed (*B. compestris* L.). Growth under short and mild winter condition of west Bengal. Indian Journal of Agricultural Research 28: 239-244.
12. Ivanovska S., Stojkovski C., Dimov Z., Jeromela A.M., Jankulovska M., and Jankuloski L. 2007. Interrelationship between yield and yield related of spring canola (*Brassica napus* L.) genotypes. Fenetika 39(3): 325-332.
13. Jeromela A.M., Marinkovic R., Mijic A., Zdunic Z., and Jankulovska M. 2008. Correlation and path analysis of quantitative traits in winter rapeseed (*Brassica napus* L.*)*. Journal of Agriculturae Conspectus Scientificus 73(1): 13-18.
14. Kassab OM., Mehanna H.M., and Boelill A. 2012. Drought impact on growth and yield of some sesame varieties. Applied Sciences Research 8(8): 4544-4551.
15. Kazi B.R., Oad F.C., G. Jamro H., Jamil L.A., and Lakho A.A. 2002. Correlation study between irrigation frequencies and brassica plant character. Journal of Applied Sciences 6: 625-627. https://dx.doi.org/10.3923/jas.2002.625.627.
16. Marjanovic-Jeromela A., Marinkovic R., Mijic A., Jankulovska M., and Zdunic Z. 2007. Interrelationship between oil yield and other quantitative traits in rapeseed (*Brassica napus* L.). Journal of Central European Agriculture 8(2): 165-170.
17. Mehrabi Z., and Ehsan Zadeh P. 2010. Investigation of the effect of drought stress on grain yield and yield components of four sesame cultivars February 16th,. Fifth National Conference on New Ideas in Agriculture. Islamic Azad University, Khorasgan Branch, Isfahan, Faculty of Agriculture. (In Persian)
18. Naeemi M., Akbari Gh A., Shirani Rad A.H., Modares Sanavi S.A.M., Sadat Nuri S.A., and Jabari H. 2008. Evaluation of drought tolerance in different Canola cultivars based on stress evaluation indices in terminal growth duration. Electronic Journal of Crop Science and Biotechnology 1: 83-98.
19. Pasban Eslam B. 2008. Effects of planting date on yield and its components of fall cultivars of rapeseed in late season cultivation. Research final report. No. 87.75. Research, Education and Extension Organization. Iran. (In Persian). https://dx.doi.org/10.22059/ijfcs.2013.30479.
20. Rosta baghi B., Dehghani H., Alizadeh B., and Sabaghnia N. 2012. Variation and evaluation of the relationship between yield and yield components of rapeseed using multivariate methods. Journal of Crop Production and Processing 2: 53-62. (In Persian)
21. Saeidi A., Tohidi Nezhad E., Ebrahimi F., Mohammadi-Nejad G., and Shirzadi M.H. 2012. Investigation of water stress on yield and some yield components of sesame genotypes in Jiroft region. Journal of Applied Sciences Research 8(1): 243-246.
22. Shokoufar A.R., and Yaghoobinejad S. 2012. The effect of drought stress on yield components of Sesame (*Sesumum indicum* L.) cultivars. Journal of Agriculture and Plant Breeding 8(4): 19-29. (In Persian with English abstract)
23. Tuncturk M., and Siftci V. 2007. Relationships between yield and some yield components in rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars by using correlation and path analysis. Pakistan Journal of Botany 39: 81-84.32.
24. Zhang H., Flottmann S., and Milroy S P. 2011. Yield formation of canola (*Brassica napus* L.) and associated traits in the high rainfall zone. Australian Research Assembly on Brassicas 17: 93-98.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 351-363

Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil

H. Shokati[1*], Z. Sojoodi[2], M. Mashal[3]

Received: 11-11-2021
Revised: 22-11-2021
Accepted: 11-07-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Shokati H., Sojoodi Z., and Mashal M. 2022. Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil. Journal of Water and Soil 36(3): 351-363. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.73460.1111

Introduction

Arid and semi-arid climates prevail in Iran. The precipitation is also sparsely distributed in most areas of the country. Therefore, there is a need for management measures to overcome the water crisis. One of these measures is designing rainwater harvesting systems that can meet some of the non-potable needs and reduce runoff in urban areas. The main components of rainwater harvesting systems in residential regions include the catchment area, storage tank, and water transfer system from the catchment area to the tank. The storage tank is the biggest investment in a rainwater harvesting system, as most buildings are not equipped with a storage system. Therefore, tank capacity should be determined optimally to minimize project implementation costs. The stored water volume and the project profit increases with increasing the tank volume. However, in this case, the price of the tank increases. Therefore, the tank capacity should be optimally designed to justify economic exploitation.

Materials and Methods

In order to evaluate the feasibility of using rainwater harvesting systems, the tanks' volume was optimized. Due to the higher rainfall of Ardabil relative to the average rainfall of the country, it is expected that this area has a good potential for the implementation of rainwater harvesting systems. Therefore, this region was selected as the study area under the scenario of a residential house with 100 and 200 m^2 catchment areas and four inhabitants. The amount of rainfall in the region is one of the primary parameters in determining the volume of rainwater collection tanks. Some of the precipitated water is always inaccessible due to evaporation from the surface. Nonetheless, since there is almost no sunlight during and immediately after rainfall, and also the received water enters the reservoirs shortly after precipitation, evaporation was assumed to be zero. Daily precipitation data for 42 years (from 1977 to 2019) were retrieved from the Ardabil Meteorological site. The daily water balance modeling method was used to analyze the rainwater harvesting systems due to the simplicity of interpretation, high accuracy and better general acceptance. Daily precipitation data were entered into this model and used as the primary source to meet the domestic demands. Simulation of rainwater harvesting systems was performed using daily precipitation data in MATLAB software, and the reliability of these systems was calculated for different tank volumes. Then, considering the price of drinking water and the current price of tanks in the market, the optimal volume of tanks was calculated using the Genetic Algorithm. Finally, the annual volume of water supply and the amount of water savings in case of using the optimal volumes of tanks were also estimated.

Results and Discussion

The results showed that the percentage of reliability is directly related to the volume of the tank, thus, the reliability percentage also increases with increasing the tank capacity. As the volume of the tank increases, the slope of the increasing reliability percentage decreases continuously, to the point that this slope becomes almost

1- Ph.D. Student in Irrigation and Drainage Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
(*- Corresponding Author Email: hadi.shokati@ut.ac.ir)
2- Ph.D. Student in Water Science and Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Aburaihan College, University of Tehran, Tehran, Iran

zero. Comparing the reliability percentage obtained for 100 and 200 m^2 rooftops indicated that 200 m^2 rooftop had a higher reliability percentage than 100 m^2 rooftop due to receiving much more rainfall and meeting the water need for a longer duration. By comparing the results of overflow ratio for 100 and 200 m^2 rooftops, it can also be concluded that using a fixed size tank, the overflow in 200 m^2 rooftop is higher, which is due to receiving more water volume than 100 m^2 rooftop. The results also showed that by using a 5 m^3 tank, 44.5 and 24 m^3 of water can be stored annually from the 200 and 100 m^2 catchment areas, respectively, these are equal to 28 and 19 m^3, respectively, if 1 m^3 tank is used. The optimal tank volumes for 100 and 200 m^3 rooftops are equal to 0.59 and 1.66 m^3, respectively. Since the tanks are made in specific volumes, the obtained volumes were rounded to the closest volumes available in the market. Thus, a 1.5 m^3 tank was used for a 200 m^2 rooftop and a 0.5 m^3 tank was applied for a 100 m^2 rooftop.

Conclusion

Application of a tank of 0.5 m^3 for the rooftop of 100 m^2 was the most profitable for saving 17% of water consumption, annually. Moreover, the optimal tank volume for the 200 m^2 rooftop was selected to be 1.5 m^3, saving about 32 % of water consumption per year. Water-saving percentages indicate the high potential of our study area for the implementation of rainwater harvesting systems.

Keywords: Genetic Algorithm, Optimization, Reliability, Simulation

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص ۳۶۳-۳۵۱

بهینه‌سازی و امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اردبیل

هادی شوکتی[1*]- زینب سجودی[2]- محمود مشعل[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

ایران از لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود که از میزان بارندگی نسبتاً پایینی برخوردار است. از طرفی، توزیع این میزان بارندگی در کشور نیز مناسب نبوده و اغلب در سواحل دریای خزر و نیمه غربی تا جنوب غرب کشور رخ می‌دهد. این عوامل، لزوم انجام اقدامات مدیریتی در جهت غلبه بر بحران آب را به دنبال دارد. یکی از راهکارهای عملی در راستای مدیریت منابع آب، اجرای سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد که باید به صورت بهینه طراحی شوند تا سامانه توجیه اقتصادی داشته باشد. در این مقاله با هدف ارزیابی و بهینه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران، داده‌های ۴۲ ساله بارش روزانه شهرستان اردبیل تحت سناریو یک خانه مسکونی با سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع و دارای چهار سکنه در نظر گرفته شد. شبیه‌سازی سامانه در نرم‌افزار متلب انجام و قابلیت اطمینان مخازن و نسبت سرریز برای حجم‌های مختلف مخازن محاسبه شد. در نهایت، بهینه‌سازی حجم مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. نتایج نشان داد که برای پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع، استفاده از مخزن ۰/۵ متر مکعبی بیشترین سودآوری را داشته و با نصب این مخزن، سالانه ۱۷ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین مخزن بهینه برای پشت‌بام ۲۰۰ متر مربع برابر با ۱/۵ متر مکعب انتخاب شد که با استفاده از آن می‌توان در هر سال حدود ۳۲ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. ارقام بدست آمده برای درصد صرفه جویی در مصرف آب حاکی از پتانسیل بالای شهرستان اردبیل برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، قابلیت اطمینان

مقدمه

ایران به لحاظ اقلیمی جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌گردد که از میزان بارندگی نسبتاً پایینی برخوردار می‌باشد. از طرفی، توزیع این میزان بارندگی در کشور نیز مناسب نبوده و اغلب در سواحل دریای خزر و نیمه غربی تا جنوب غرب کشور رخ می‌دهد. این عوامل، لزوم انجام اقدامات مدیریتی در جهت غلبه بر بحران آب را به دنبال دارد. یکی از این اقدامات، طراحی سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد که می‌تواند علاوه بر تأمین بخشی از نیازهای غیرشرب خانوارها، موجب کاهش رواناب در سطوح شهری نیز گردد. اجزای اصلی سامانه‌های استحصال آب باران در مناطق مسکونی شامل سطح جمع‌آوری(آبگیر)، مخزن ذخیره و سیستم انتقال آب از سطح جمع‌آوری به مخزن می‌باشند. مخازن ذخیره‌سازی بیشترین سرمایه‌گذاری در سیستم جمع‌آوری آب باران را دربر می‌گیرند، زیرا اغلب ساختمان‌ها از ابتدا مجهز به سیستم ذخیره‌سازی نیستند. بنابراین حجم مخزن باید به منظور کمینه‌سازی هزینه‌های اجرایی طرح، به صورت بهینه تعیین گردد. با افزایش حجم مخزن، حجم آب ذخیره شده و در نتیجه درآمد طرح افزایش می‌یابد، ولی از سویی دیگر، قیمت خرید مخزن نیز افزایش خواهد یافت. بنابراین حجمی از مخزن که هم به لحاظ اقتصادی مقرون به‌صرفه بوده و هم قابلیت ذخیره‌سازی بیشتری داشته باشد، نیازمند مطالعه می‌باشد. ظرفیت مخازن سامانه‌های استحصال آب باران را نمی‌توان فرموله کرد، زیرا به شدت تحت تأثیر متغیرهای مختلف محلی مانند بارندگی، سطوح آبگیر، تقاضا و تعداد ساکنین می‌باشد (Aladenola and Adeboye,

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: hadi.shokati@ut.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری علوم مهندسی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.73460.1111

; Eroksuz and Rahman, 2010; Ghisi, 2010; Londra 2010 *et al.*, 2015; Palla *et al.*, 2012). مطالعات مختلفی در راستای بهینه‌سازی حجم مخازن در سرتاسر دنیا صورت گرفته است. مطالعات قبلی صورت گرفته، از روش های مختلفی برای طراحی مخزن بهینه استفاده کرده‌اند. برخی از این مطالعات از جمله لی و همکاران (Lee *et al.*, 2000)، قیصی و همکاران (Ghisi *et al.*, 2007) و استفن و همکاران (Steffen *et al.*, 2013) معادلات رگرسیونی را توسعه دادند که استفاده از آن‌ها ساده می‌باشد، اما وابسته به داده‌های عددی بوده و بنابراین برای مناطق خاص به‌کار برده می‌شوند. علاوه بر تحقیقات مذکور، محققانی از جمله (Jones and Hunt, 2010)، (Assayed *et al.*, 2013)، (Hanson and Voge, 2014)، (Wang and Zimmerman, 2015) و (Rostad *et al.*, 2016) نیز تحقیقاتی را در زمینه محاسبه حجم بهینه مخازن استحصال آب باران صورت دادند. نتایج به‌دست آمده توسط این محققان، اغلب برای مناطق یا شهرهای خاص کاربرد داشته و به طور معمول، از داده‌های بارش محلی برای بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. فیوکس (Fewkes, 1999) به بررسی پتانسیل سامانه‌های استحصال آب باران برای مصارف خانگی در انگلستان پرداخت و مجموعه‌ای از منحنی‌های بدون بعد را برای طراحی تولید کرد که می‌توان براساس آن‌ها، حجم بهینه مخازن آب باران را با توجه به مساحت پشت‌بام و الگوهای تقاضای آب محاسبه کرد. لیاو و تسا (Liaw and Tsai, 2004) منحنی‌هایی را بوجود آوردند که با استفاده از آن‌ها می‌توان اندازه بهینه مخازن را انتخاب کرد که دارای سطح اطمینان بوده و همچنین تابع هزینه را به حداقل برساند. مهرآبادی و ثقفیان (Mehrabadi and Saghafian, 2012) به منظور بهینه‌سازی ابعاد مخازن در شهر تهران، ابتدا پارامترهای هیدرولوژیکی منطقه را مورد بررسی قرار داده و بر اساس آمار بارندگی یک دوره زمانی مشخص و برای تأمین درصدی از نیاز غیرشرب منازل، یک رابطه مشخص برای حجم مخزن تعریف کردند و بهینه‌سازی حجم مخازن را بر اساس میزان ورودی‌ها و خروجی‌ها به کمک برنامه کامپیوتری انجام دادند. طبق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، در مناطقی که بارندگی با توزیع زمانی مناسب دارند، می‌توان به بیشترین درصد تأمین نیاز غیرشرب ساکنین با ابعاد بهینه مخازن دست یافت به نحوی که ساخت آن‌ها هم توجیه اقتصادی داشته باشد. لوندرا و همکاران (Londra *et al.*, 2015) به منظور تعیین حجم بهینه مخازن آب باران، از دو روش بیلان روزانه آب[1] و روش تقاضای دوره خشک[2] برای ۷۵ منطقه یونان استفاده کردند تا ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد از کل نیازهای آب خانوارهای ۳ تا ۵ نفره را تأمین کنند.

1- Daily Water Balance Method
2- Dry Period Demand Method

مقایسه این دو روش نشان داد که روش تقاضای دوره خشک، به جز در موارد اندک، حجم مخازن را کوچک‌تر محاسبه می‌کند. همچنین نتیجه گرفتند که ظرفیت مخازن آب باران به شدت تحت تاثیر متغیرهای مختلف محلی قرار می‌گیرد و نمی‌توان آن را به صورت فرمول درآورد. شوکتی و همکاران (Shokati *et al.*, 2020) در تحقیقی با هدف بررسی پتانسیل استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران در اقلیم‌های مختلف ایران، چهار شهر رشت، ساری، تبریز و یزد را به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب کردند. قابلیت اطمینان مخازن ذخیره‌سازی و نسبت سرریز برای حجم‌های مختلف مخازن، بررسی شد. نتایج نشان داد که به ازای یک حجم ثابت مخزن، قابلیت اطمینان مخازن آب باران در رشت بیشتر از سایر مناطق بوده که دلیل این امر مقدار بارش بیشتر این شهر می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که شهر یزد به دلیل قرارگیری در منطقه گرم و خشک از پتانسیل پایینی برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران برخوردار است.

در این مقاله سعی گردید تا با هدف امکان‌سنجی استفاده از سامانه‌های استحصال آب باران، به بهینه‌سازی حجم مخزن سامانه‌های مذکور پرداخته شود. بدین منظور، شهرستان اردبیل تحت سناریوی یک خانه مسکونی با سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع با چهار سکنه، به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. شبیه‌سازی سامانه‌های استحصال آب باران با استفاده از داده‌های بارش روزانه و در محیط نرم‌افزار متلب[3] انجام و قابلیت اطمینان[4] سامانه‌های مذکور در ازای استفاده از حجم‌های مختلف مخزن برآورد گردید. سپس با توجه به قیمت آب شرب و قیمت رایج مخازن در بازار، حجم بهینه مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک[5] محاسبه شد. در نهایت، حجم سالانه تأمین آب و میزان صرفه‌جویی در مصرف آب در صورت استفاده از حجم‌های بهینه مخازن برآورد گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

با توجه به حجم بارندگی نسبتاً بالاتر شهرستان اردبیل نسبت به بارندگی متوسط کشور، انتظار می‌رود که این شهرستان پتانسیل خوبی برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران داشته باشد. لذا این شهرستان به عنوان منطقه مورد مطالعه در این تحقیق درنظر گرفته شد. شهرستان اردبیل در طول جغرافیایی ۴۸،۳۰ و عرض جغرافیایی ۳۸،۲۴ قرار دارد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهرستان اردبیل را نشان می‌دهد.

3- Matlab
4- Reliability
5- Genetic Algorithm

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

الزامات اولیه طراحی سامانه‌های استحصال آب باران

تهیه اطلاعات بارندگی

میزان بارش منطقه، از پارامترهای اساسی در تعیین حجم مخازن جمع‌آوری آب باران می‌باشد. در این تحقیق، از داده‌های بارش روزانه دوره ۴۲ ساله (۱۳۹۷-۱۳۵۶) ایستگاه هواشناسی اردبیل استفاده گردید. شکل ۲ میزان بارش سالانه در این ایستگاه را نشان می‌دهد. با توجه به اطلاعات بارش این ایستگاه، متوسط بارش سالانه در طول ۴۲ سال مورد بررسی برابر با ۲۷۸ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به نمودار میانگین متحرک بارش در شکل ۲ مشاهده می‌شود که روند بارش در طول ۴۲ سال اخیر کاهشی بوده است.

شکل ۲- روند بارش سالانه شهرستان اردبیل
Figure 2- Annual precipitation trend of Ardabil city

شکل ۳ میانگین ماهانه بارش شهرستان اردبیل را در بازه زمانی مورد بررسی نشان می‌دهد. همواره مقداری از بارش به دلیل تبخیر از سطح از دسترس خارج می‌گردد، اما با توجه به اینکه میزان بارش در ماه‌های گرم سال بسیار کم بوده (شکل ۳)، و همچنین با توجه به اینکه حین بارش و بلافاصله بعد از بارش، تقریباً تابش آفتاب وجود ندارد و آب دریافتی بلافاصله بعد از بارش وارد مخازن می‌گردد، لذا در این تحقیق فرض گردید که تبخیر از سطح برابر با صفر می‌باشد.

شکل ۳- میانگین بارش ماهانه شهرستان اردبیل (میلی‌متر)
Figure 3- Average monthly rainfall in Ardabil city (mm)

تعیین حجم تقاضای آب

یکی از اطلاعات اساسی مورد نیاز در طراحی سامانه‌های استحصال آب باران، برآورد میزان تقاضای داخلی آب می‌باشد. این میزان تقاضا را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه نمود:

$$D_t = N \times d_t \quad (۱)$$

در این معادله، D مجموع تقاضای داخلی آب (لیتر)، N تعداد سکنه و d سرانه مصرف آب (لیتر) می‌باشد. جدول ۱ سرانه مصرف آب کشور را بدون احتساب فضای سبز نشان می‌دهد.

محاسبه مجموع تقاضای داخلی با توجه به تغییرپذیری پارامترهای معادله مربوطه در طول زمان و از فردی به فرد دیگر پیچیده می‌باشد. با وجود همه این تفاوت‌ها در مصرف، باید میزان میانگین مصرف روزانه آب را برآورد کرد. در این مطالعه، سرانه آب غیرشرب مورد نیاز به طور متوسط ۸۰ لیتر در روز بر اساس مطالعه قبلی توسط مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013) و برای چهار سکنه در نظر گرفته شد.

مدل‌سازی مخازن سامانه‌های استحصال آب باران

تاکنون روش‌های مختلفی برای آنالیز سامانه‌های استحصال آب باران ارائه شده است که از بین تمامی این روش‌ها، روش مدل‌سازی بیلان روزانه آب به دلیل سادگی تفسیر، دقت بالا و نیز پذیرش عمومی بهتر، انتخاب مناسب‌تری می‌باشد (Bashar *et al.*, 2018). داده‌های بارش روزانه وارد این مدل شده و به عنوان منبع اولیه برای تأمین تقاضای ساکنین بکار گرفته می‌شوند. از این مدل در تحقیقات گذشته از جمله مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013)، امتیاز و همکاران (Imteaz *et al.*, 2014) و جینگ و همکاران (Jing *et al.*, 2017) نیز استفاده شده است. در این مدل، اگر در یک روز خاص، بارش باران به تنهایی قادر به تأمین تقاضای داخلی نباشد، از آب شهری نیز به عنوان مکمل استفاده می‌شود. مدل‌سازی سامانه استحصال آب باران در محیط نرم افزار متلب صورت می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی سامانه‌های مذکور، حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز به‌صورت زیر محاسبه می‌گردد:

جدول ۱- سرانه مصرف آب بدون احتساب فضای سبز (Office of Research and Technical Criteria, 1992)

Table 1- Average per capita water consumption excluding green space

نوع مصرف (Type of use)	سرانه مصرف آب (لیتر در روز) (Average per capita water consumption (L/day))
آشامیدن (Drinking)	2-5
پخت و پز (Cooking)	5-10
حمام (Bathroom)	25-50
لباسشویی (Laundry)	10-20
شستن ظرف (Dish washing)	5-15
توالت (Toilet)	20-30
شستن خانه (Washing the house)	3-10
تهویه (Ventilation)	2-5
سایر (Other)	3-5
مجموع (Total)	75-150

تعیین حجم رواناب از سطوح آبگیر

تعیین حجم آب هدایت شده در مخزن، از پارامترهای مهم در برآورد حجم بهینه مخازن می‌باشد. حجم آب استحصالی از سطح آبگیر در هر روز با رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Mehrabadi *et al.*, 2013):

$$I_t = R_t \times A \times \emptyset \qquad (۲)$$

در این معادله، I حجم روزانه رواناب قابل استحصال(لیتر)، R عمق روزانه بارش(میلی‌متر)، A مساحت سطح آبگیر(متر مربع) و $\emptyset$ ضریب رواناب (بدون بعد) می‌باشد. ضریب رواناب برای فصول مختلف سال براساس تحقیق قبلی صورت گرفته توسط دستورانی (Dastorani, 2018) برابر با ۰/۷۵ و ۰/۶۸ درنظر گرفته شد.

حجم آب موجود در مخزن در هر روز با استفاده از رابطه بیان می‌شود (۱۹):

$$V_t = I_t + V_{t-1} - O_t - SP_t \qquad (۳)$$

در این معادله، V_t حجم ذخیره آب مخزن در روز t (لیتر)، I_t حجم آب باران استحصال شده از سطح آبگیر در روز t (لیتر)، V_{t-1} حجم ذخیره آب در مخزن در روز t-1 (لیتر)، O_t حجم آب خروجی از مخزن برای تأمین نیاز غیرشرب ساکنین در روز t (لیتر) و SP_t حجم سرریز از مخزن در روز t (لیتر) می‌باشد.

حجم سرریز

اگر حجم آب هدایت شده به مخزن بیشتر از حجم مخزن باشد، آب اضافی سرریز شده که حجم این سرریز با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$SP_t = I_t + V_{t-1} - V_{max} - O_t \qquad (۴)$$

در این رابطه، V_{max} حجم مخزن بر حسب لیتر می‌باشد.

قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان بیانگر توانایی سامانه استحصال آب باران در پاسخگویی به تقاضای ساکنین می‌باشد که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Imteaz et al., 2012):

$$Re = \frac{N-U}{N} \times 100 \qquad (۵)$$

در رابطه فوق، U تعداد روزهایی از سال که نیاز غیرشرب ساکنین تأمین نمی‌شود و N تعداد روزهای سال می‌باشد.

بهینه‌سازی حجم مخزن

بهینه‌سازی عبارت است از تعیین مقادیر ورودی یک مسئله و پردازش آن‌ها در راستای دستیابی به حداقل یا حداکثر خروجی. ورودی‌ها همان متغیرهای تصمیم بوده و خروجی‌ها نیز هزینه و یا

شایستگی مربوطه می‌باشند. فرآیند پردازش با ارزیابی توابع هزینه، هدف و یا شایستگی انجام می‌گیرد. با توجه به ماهیت فرمول‌بندی مسئله بهینه‌سازی در این تحقیق، در فرآیند مدل‌سازی از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش‌های تکاملی، از دقت بالایی در حل مسائل مختلف برخوردار بوده و توسط محققین زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. چنان‌چه مسئله بهینه‌سازی یک تابع هدف داشته باشد و هدف حداکثر یا حداقل نمودن آن تابع باشد، بهینه‌سازی از نوع تک هدفه خواهد بود. در این تحقیق، تابع هدف مسئله، تک هدفه بوده و هدف آن بیشینه‌سازی سود می‌باشد. بنابراین باید کلیه جریان‌های نقدی سالانه طرح براساس یک نرخ تنزیل از قبل تعیین شده، به سال صفر(سال آغاز اجرای طرح) تنزیل گردد. بدین منظور، درآمدها و هزینه به کمک شاخص ارزش کنونی خالص (NPV)[1] به سال صفر تبدیل شده و حجمی از مخزن که بیشترین NPV را داشته باشد، به عنوان حجم بهینه مخزن انتخاب می‌گردد. تابع هدف مسئله به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$NPV = -IC + \sum_{t=1}^{T} \frac{B_t}{(1+i)^t} \qquad (۶)$$

در این معادله، IC هزینه اولیه خرید مخزن، Bt سود سالانه طرح، t سال مورد نظر و i نرخ بهره می‌باشد.

با توجه به هدف تحقیق که برای تأمین آب غیرشرب هست، لذا نیازی به سیستم انتقال و توزیع آب به داخل ساختمان نبوده و از آب ذخیره شده می‌توان در مصارفی همچون فضای سبز، شستن حیاط، ماشین و ... استفاده کرد. بنابراین در این تحقیق هزینه اجرای طرح عمدتاً مربوط به هزینه خرید مخزن می‌باشد که فقط در سال اول پرداخت می‌شود، در حالی که درآمد پروژه مربوط به ذخیره آب می‌باشد که تا پایان طول عمر سامانه در هر سال حاصل می‌شود. با توجه به روند افزایش سالانه قیمت آب، درآمد حاصل از پروژه نیز افزایش خواهد یافت. قیمت آب(درآمد) در سال مورد نظر از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$B_t = B_0 \times (1+g)^t \qquad (۷)$$

که در آن، B_0، قیمت آب در سال اول و g درصد افزایش سالانه قیمت آب می‌باشد. در این تحقیق، نرخ بهره ۱۲ درصد و طول عمر سامانه براساس طول عمر پیش‌بینی شده در کاتالوگ شرکت‌های سازنده مخازن برابر با ۴۰ سال در نظر گرفته شد. همچنین قیمت آب با توجه به قیمت فعلی و با لحاظ افزایش پلکانی قیمت آن برابر با ۱۵۰۰ تومان و درصد افزایش سالانه قیمت آن نیز با توجه به درصد افزایش قیمت آب در سال‌های قبل ۲۵ درصد درنظر گرفته شد. قیمت مخازن براساس قیمت‌های درج شده در کاتالوگ شرکت‌های فروشنده و مطابق جدول ۲ درنظر گرفته شدند.

1- Net Present Value

قیدها

در فرآیند بهینه‌سازی تابع هدف مسئله، قیودی نیز به شرح زیر اعمال گردید:

قید مربوط به حجم سرریز که بیان می‌کند حجم سرریز باید کمتر از حجم بارندگی می‌باشد و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$0 \le SP_t < I_t \qquad (۸)$$

قید مربوط به حجم آب موجود در مخزن در هر زمان که بیان می‌کند این حجم نمی‌تواند از حجم مخزن بیشتر و از حجم آب باقی‌مانده از روز قبل کمتر باشد.

$$V_{t-1} \le V_t \le V_{max} \qquad (۹)$$

نتایج و بحث

نتایج قابلیت اطمینان

شکل ۴ نتایج درصد قابلیت اطمینان سامانه‌های استحصال آب باران را برای شهرستان اردبیل و در ازای استفاده از مخازن با حجم‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که درصد قابلیت اطمینان رابطه مستقیمی با حجم مخزن دارد، به طوری که با افزایش حجم مخزن، درصد قابلیت اطمینان نیز افزایش می‌یابد. با افزایش حجم مخزن، پیوسته از شیب روند افزایشی درصد قابلیت اطمینان کاسته می‌شود، تا جایی که این شیب تقریبا برابر با صفر می‌گردد. این نتیجه با نتایج تحقیقات مهرآبادی و همکاران (Mehrabadi *et al.*, 2013)، بشار و همکاران (Bashar *et al.*, 2018) و لانی و همکاران (Lani *et al.*, 2018) مطابقت دارد.

همچنین با مقایسه مقادیر درصد قابلیت اطمینان به دست آمده برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مترمربع، مشاهده می‌شود که پشت‌بام ۲۰۰ متری به دلیل دریافت حجم بارش بیشتر نسبت به پشت‌بام ۱۰۰ متری، درصد قابلیت اطمینان بیشتری داشته و در درصد بیشتری از روزهای سال قادر به تأمین نیاز غیرشرب ساکنین خواهد بود، به طوری که با استفاده از یک مخزن ۵ متر مکعبی، در حدود ۳۰ درصد از روزهای سال می‌تواند این نیاز را برطرف کند که این میزان در پشت‌بام ۱۰۰ متر مربعی برابر با ۱۳ درصد است.

نتایج سرریز از مخزن

شکل ۵ نتایج نسبت سرریز از مخازن را در شهرستان اردبیل برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع نشان می‌دهد. نسبت سرریز بیانگر حجم سرریز از مخزن نسبت به کل حجم آب دریافتی می‌باشد که با

افزایش حجم مخزن، این نسبت کاهش می‌یابد. دلیل این امر، گنجایش بیشتر مخازن حجیم می‌باشد که موجب می‌شود آب بیشتری در اختیار ساکنین قرار گیرد. با توجه به شکل ۵ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش حجم مخزن، نسبت سرریز از مخزن روند نزولی پیدا می‌کند که این نتیجه با نتایج حاصل از تحقیقات بشار و همکاران (Bashar *et al.*, 2018) و لانی و همکاران (Lani *et al.*, 2018) همخوانی دارد. با مقایسه نتایج نسبت سرریز برای پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ مربع، مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از یک مخزن ثابت، نسبت سرریز در پشت‌بام ۲۰۰ متر مربع بیشتر بوده که به دلیل دریافت حجم آب بیشتر نسبت به پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع می‌باشد.

شکل‌های ۶ و ۷ حجم سالانه سرریز از پشت‌بام‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربع را برای حجم‌های مختلف مخزن نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، مشاهده می‌شود که با افزایش حجم مخزن، میزان سرریز کاهش پیدا می‌کند. همچنین با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ با نمودار میزان بارش (شکل ۲) مشاهده می‌گردد که حجم سرریز با میزان بارش رابطه مستقیم داشته و روند تغییرات آن مشابه تغییرات میزان بارش می‌باشد.

جدول ۲- قیمت مخازن (R27www)

Table 2- Tank prices

حجم مخزن (متر مکعب) (Tank capacity (m^3))	قیمت (ریال) (Price (Rials))
0.5	13070000
1	24660000
1.5	37400000
2	47600000
2.5	60670000
3	72260000
3.5	85330000
4	102150000
4.5	115220000
5	137230000

شکل ۴- نتایج قابلیت اطمینان مخزن

Figure 4- Results of tank reliability

شکل ۵- نتایج نسبت سرریز مخزن

Figure 5- Results of tank overflow ratio

شکل ۶- حجم سالانه سرریز از پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی در ازای حجم‌های مختلف مخزن

Figure 6- Annual overflow volume from the rooftop of 100 m^2 for different tank volumes

شکل ۷- حجم سالانه سرریز از پشت‌بام ۲۰۰ متر مربعی در ازای حجم‌های مختلف مخزن

Figure 7- Annual overflow volume from the rooftop of 200 m² for different tank volumes

حجم آب تأمین شده سالانه

شکل ۸ حجم سالانه تأمین آب را در ازای استفاده از مخازن با حجم‌های مختلف برای دو سطح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ متر مربعی نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که به ازای یک تقاضای ثابت، با افزایش مساحت سطح آبگیر، حجم تأمین آب نیز افزایش می‌یابد. با استفاده از مخزن ۵ متر مکعبی می‌توان سالانه از سطح آبگیر ۲۰۰ و ۱۰۰ مترمربعی به ترتیب ۴۴/۵ و ۲۴ متر مکعب آب ذخیره‌سازی نمود که در صورت استفاده از مخزن ۰/۵ متر مکعبی این میزان به ترتیب برابر با ۲۸ و ۱۹ مترمکعب خواهد بود.

شکل ۸- حجم سالانه تامین نیاز آب شرب

Figure 8- Annual volume of meeting the potable water demands

نتایج بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی حجم مخزن، ابتدا رابطه‌ای بین حجم مخزن و حجم آبی که آن مخزن در صورت استفاده می‌تواند تأمین کند، ایجاد شد. سپس قیمت مخزن (هزینه) و قیمت آب قابل ذخیره توسط آن (درآمد) با لحاظ طول عمر سامانه و افزایش سالانه قیمت آب و نرخ بهره مقایسه شدند. در نهایت، با استفاده از الگوریتم ژنتیک در محیط نرم‌افزار متلب و با توجه به قیود و روابط ذکر شده در بخش‌های قبلی، بهینه‌ترین حجم‌های مخزن انتخاب شدند. جدول ۳ نتایج بهینه‌سازی حجم مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد که در آن حجم‌های بهینه برای سطوح آبگیر ۱۰۰ و ۲۰۰ مترمربع به ترتیب برابر با ۰/۵۹۲ و ۱/۶۶۴ مترمکعب بدست آمدند، اما با توجه به این‌که مخازن در حجم‌های مشخص و معین ساخته می‌شوند، بنابراین حجم‌های به دست آمده به نزدیک‌ترین حجم‌های موجود در بازار گرد شده‌اند. بدین ترتیب، برای پشت‌بام ۲۰۰ متر مربع از مخزن ۱/۵ مترمکعب و برای پشت‌بام ۱۰۰ متر مربع از مخزن ۰/۵ متر مکعب استفاده خواهد شد که با استفاده از این مخازن برای پشت‌بام‌های ۲۰۰ و ۱۰۰ متر مربع، سالانه به ترتیب ۳۲ و ۱۷ درصد در مصرف آب غیرشرب ساکنین صرفه‌جویی خواهد شد. ارقام بدست آمده برای درصد صرفه جویی در مصرف آب حاکی از پتانسیل بالای شهرستان اردبیل برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران است.

جدول ۳- نتایج بهینه سازی حجم مخزن

Table 3- Tank volume optimization results

مساحت پشت‌بام (Rooftop area)	100 m^2	200 m^2
حجم بهینه (متر مکعب) (Optimal volume)	0.592	1.664
حجم قابل خرید (متر مکعب) (Purchasable volume)	0.5	1.5
درصد صرفه‌جویی (Percentage of savings)	17	32

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ارزیابی عملکرد سامانه‌های استحصال آب باران در شهرستان اردبیل در ازای استفاده از حجم‌های مختلف مخزن و پشت‌بام‌های با مساحت‌های مختلف مورد مطالعه قرار گرفت و در پایان، حجم بهینه مخزن که بیشترین سودآوری را داشته باشد، انتخاب شد. بر این اساس، نتایج نشان داد که برای پشت‌بام ۲۰۰ متر مربعی، استفاده از مخزن ۱/۵ متر مکعبی بیشترین سودآوری را داشته و با نصب این مخزن، سالانه ۳۲ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی خواهد شد. همچنین حجم بهینه مخزن برای پشت‌بام ۱۰۰ مترمربعی برابر با ۰/۵ مترمکعب بدست آمد که با استفاده از آن می‌توان سالانه حدود ۱۷ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. ارقام بدست آمده نشان از پتانسیل بالای شهرستان اردبیل برای اجرای سامانه‌های استحصال آب باران می‌باشد.

منابع

1. Aladenola O.O., and Adeboye O.B. 2010. Assessing the potential for rainwater harvesting. Water Resources Management 24(10): 2129-2137. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9542-y.
2. Assayed A., Hatokay Z., Al-Zoubi R., Azzam S., Qbailat M., Al-Ulayyan A., Bushnaq S., and Maroni R. 2013. On-site rainwater harvesting to achieve household water security among rural and peri-urban communities in Jordan. Resources, Conservation and Recycling 73: 72-77. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.010.
3. Bashar M.Z.I., Karim M.R., and Imteaz M.A. 2018. Reliability and economic analysis of urban rainwater harvesting: A comparative study within six major cities of Bangladesh. Resources, Conservation and Recycling 133: 146-154. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.025.
4. Dastorani M.T. 2018. Quantitative and qualitative study of water that can be harvested in residential houses. P.551-562. 7th National Conference on Rainwater Harvesting systems, 20-21 Feb. 2019. Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian). https://scwmwh.areeo.ac.ir/article_14647.html.
5. Eroksuz E., and Rahman A. 2010. Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. Resources, Conservation and Recycling 54(12): 1449-1452. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.010.
6. Fewkes A. 1999. The use of rainwater for WC flushing: the field testing of a collection system. Building and Environment 34(6): 765-772. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(98)00063-8.
7. Ghisi E., Bressan D.L., and Martini M. 2007. Rainwater tank capacity and potential for potable water savings by using rainwater in the residential sector of southeastern Brazil. Building and Environment 42(4): 1654-1666. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.02.007.
8. Ghisi E. 2010. Parameters influencing the sizing of rainwater tanks for use in houses. Water Resources Management 24(10): 2381-2403. https://doi.org/10.1007/s11269-009-9557-4.

9. Hanson L.S., and Voge R.M. 2014. Generalized storage–reliability–yield relationships for rainwater harvesting systems. Environmental Research Letters 9(7): 075007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/7/075007.
10. Imteaz M.A., Adeboye O.B., Rayburg S., and Shanableh A. 2012. Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. Resources, Conservation and Recycling 62: 51-55. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.007.
11. Imteaz M.A., Matos C., and Shanableh A. 2014. Impacts of climatic variability on rainwater tank outcomes for an inland city, Canberra. International Journal of Hydrology Science and Technology 4(3): 177-191. https://doi.org/10.1504/ijhst.2014.067730.
12. Jing X., Zhang S., Zhang J., Wang Y., and Wang Y. 2017. Assessing efficiency and economic viability of rainwater harvesting systems for meeting non-potable water demands in four climatic zones of China. Resources, Conservation and Recycling 126: 74-85. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.027.
13. Jones M.P., and Hunt W.F. 2010. Performance of rainwater harvesting systems in the southeastern United States. Resources, Conservation and Recycling 54(10): 623-629. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.11.002.
14. Lani N.H.M., Syafiuddin A., Yusop Z., and bin Mat Amin M.Z. 2018. Performance of small and large scales rainwater harvesting systems in commercial buildings under different reliability and future water tariff scenarios. Science of The Total Environment 636: 1171-1179. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.418.
15. Lee K.T., Lee C.D., Yang M.S., and Yu C.C. 2000. SW-soil and water: probabilistic design of storage capacity for rainwater cistern systems. Journal of Agricultural Engineering Research 77(3): 343-348. https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0597.
16. Liaw C.H., and Tsai Y.L. 2004. Optimum storage volume of rooftop rain water harvesting systems for domestic use 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 40(4): 901-912. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01054.x.
17. Londra P.A., Theocharis A.T., Baltas E., and Tsihrintzis V.A. 2015. Optimal sizing of rainwater harvesting tanks for domestic use in Greece. Water Resources Management 29(12): 4357-4377. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1064-1.
18. Mehrabadi M.H.R., and Saghafian B. 2012. Optimization of reservoirs of residential houses in cities. P. 1-9. Proceeding of 9th *International Congress on Civil Engineering*, 8-10 May. 2012. Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. (In Persian). https://civilica.com/doc/165886/.
19. Mehrabadi M.H.R., Saghafian B., and Fashi F.H. 2013b. Assessment of residential rainwater harvesting efficiency for meeting non-potable water demands in three climate conditions. Resources, Conservation and Recycling 73: 86-93. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.01.015.
20. Mehrabadi M.H.R., Saghafian B., and Sadeghian M.S. 2013a. Evaluation of the performance of rooftop surfaces of residential buildings in meeting the non-potable needs of residents in coastal cities of the country. Water Resources Engineering 6(19): 1-16. (In Persian with Engliah abstract). https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=213763.
21. Office of Research and Technical Criteria, Principles and Criteria for Designing Urban Water Supply Projects, Journal 3-117, Planning and Budget Organization. 1992.
22. Palla A., Gnecco I., Lanza L.G., and La Barbera P. 2012. Performance analysis of domestic rainwater harvesting systems under various European climate zones. Resources, Conservation and Recycling 62: 71-80. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.006.
23. Rostad N., Foti R., and Montalto F.A. 2016. Harvesting rooftop runoff to flush toilets: Drawing conclusions from four major US cities. Resources, Conservation and Recycling 108: 97-106. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.009.
24. Shokati H., Kouchakzadeh M., and Fashi F.H. 2020. Assessing reliability of rainwater harvesting systems for meeting water demands in different climatic zones of Iran. Modeling Earth Systems and Environment 6(1): 109-114. https://doi.org/10.1007/s40808-019-00662-3.
25. Steffen J., Jensen M., Pomeroy C.A., and Burian S.J. 2013. Water supply and stormwater management benefits of residential rainwater harvesting in US cities. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 49(4): 810-824. https://doi.org/10.1111/jawr.12038.
26. Wang R., and Zimmerman J.B. 2015. Economic and environmental assessment of office building rainwater harvesting systems in various US cities. Environmental Science & Technology 49(3): 1768-1778. https://doi.org/10.1021/es5046887.
27. www.makhzaneab.com.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 365-375

Evaluation of Nutritional Status of Hamedan Province Grape Fields by Compositional Nutrient Diagnosis Method

R. Motalebifard[1*]

Received: 29-01-2022
Revised: 28-02-2022
Accepted: 14-06-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Motalebifard R. 2022. Evaluation of Nutritional Status of Hamedan Province Grape Fields by Compositional Nutrient Diagnosis Method. Journal of Water and Soil 36(3): 365-375. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.74703.1137

Introduction

Grape is one of the most important horticultural products in the world and Iran which has been noticed due to its cultivation area, high economic and nutritional values. Annually, about 68 million tons of grape are produced in the world. Iran, with 309,000 ha cultivation area and about 3.3 million tons share of production, is the 11th largest producer of this fruit in the world. Recent studies have shown that plant nutrition and soil fertility have significant effect in the reduced yield quality in the grape fields of our country. Plant nutrition as an influential factor is a function of the interaction of nutrients and environmental conditions. Assessing the nutritional status of plants is necessary to achieve the relationship between nutrients availability in the soil, the amount of elements in the plant and yield. Plant analysis method is used to optimize fertilizer application and diagnose plant nutrition disorders. The plant analysis method is useful for evaluating plant nutrition if an appropriate method to be used to diagnose and interpret the results. Tissue nutrient status can be diagnosed by the Critical Value Approach (CVA), the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS), and Compositional Nutrient Diagnosis (CND). Only DRIS and CND provide nutrient imbalance indexes, although no threshold value has been validated yet for diagnostic purposes. CND method expresses interactions by considering the ratio of one element to all elements. In this method, high and low functional groups are separated with great accuracy with the help of mathematical and statistical methods and the application of the cumulative function of variance ratio of nutrients and chi-square distribution function. A critical CND imbalance index was derived from the chi-square distribution function. Due to the importance of grape production in the country and the lack of required nutritional norms, this study was conducted to investigate the nutritional status of grape fields using the CND method.

Materials and Methods

In order to evaluate the nutritional status of grape fields in the Hamedan province, this study was conducted in the cropping years of 2017-2020. Every year, 40 different orchards were selected in each of the regions. The orchards were selected in such a way that they had different ranges of yield and soil properties. A database containing laboratory and field data was created for each grape field. The geographical location was recorded for the orchards. In each orchard, plant (leaf) samples were prepared and analyzed based on suitable laboratory methods. At the end of the season, the yield and its components were determined by visiting each orchard. Concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron, zinc, manganese, and copper were measured in grape leaves. The project database was completed and CND indices were calculated for each nutrient element. The selected grape fields were divided into two groups with high and low yield based on yield. The CND norms and indexes were computed according to computation steps of Parent and Dafir. The Cate–Nelson ANOVA procedure was used to partition yield data between two groups by maximizing the between-

1- Assistant Professor of Soil and Water Research Department, East-Azarbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Tabriz, Iran
(*- Coressponding Author Email: motalebifard@gmail.com)

groups sums of squares to determine the threshold values for CND indexes required to compute the critical CND r^2 value. We used 83 observations for developing the nutrient norms.

Results and Discussion

The results of the indices calculated by the method of CND showed that the grape fields were deficient in nitrogen and potassium among the macronutrients and iron and manganese among the micronutrient elements. There was a correlation (0.25) between nutritional balance index and yield that was significant at 1 percent probability level. Potassium index was negative in 83% of low yield orchards. After potassium, nitrogen had a negative index in 58% of medium and low yield orchards. Phosphorus had the most positive index among macronutrients and was positive in most orchards. Among the micronutrients, manganese, iron, and zinc indices were negative in 59%, 49% and 73% of the orchards, respectively. The presence of calcareous conditions in the soils of the region can be the reason for this deficiency. The boron index was positive in some orchards and negative in some other orchards. Furthermore, in total, the index of unknown factors was negative in 41% of grape fields in Hamadan province.

Conclusion

The results indicated that management of evaluated orchards was not suitable and application of chemical fertilizers was unbalanced. The results of this study can be used in grape fields to increase yield and product quality. Therefore, it is recommended to use deficient elements in the fertilization program to improve yield.

Keywords: Grape, Nutrients, Nutritional status, Optimum level

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص ۳۷۵-۳۶۵

ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور استان همدان با استفاده از روش تشخیص چندگانه (CND)

رحیم مطلبی فرد[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۴

چکیده

روش تجزیه گیاه به منظور بهینه کردن مصرف کودها و تشخیص اختلالات تغذیه گیاهی استفاده می‌شود. روش تجزیه گیاه برای ارزیابی تغذیه گیاهان مفید است مشروط بر اینکه به روش مناسبی برای تشخیص و تفسیر نتایج بهره گرفته شود. به منظور ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور استان همدان این پروژه در سه سال زراعی ۹۹-۱۳۹۶ به اجرا در آمد. در هر سال تعداد ۴۰ باغ مختلف در هر کدام از مناطق انتخاب گردید. انتخاب باغات به شکلی بود که دارای دامنه متفاوتی از خصوصیات خاک باشند. یک بانک اطلاعاتی حاوی داده‌های آزمایشگاهی و صحرائی برای هر باغ در سه استان ایجاد گردید. موقعیت جغرافیایی باغات ثبت شد. در هر باغ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله بافت، کربن آلی، شوری و آهک ارزیابی و نمونه گیاه (برگ) تهیه و مورد تجزیه آزمایشگاهی قرار گرفت. در پایان فصل عملکرد و اجزاء آن در هر باغ مشخص گردید. غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، منگنز و مس در برگ انگور اندازه گرفته شد. بانک اطلاعات پروژه برای سال‌های اول و دوم تکمیل و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و شاخص CND برای هر عنصر محاسبه گردید. بر اساس عملکرد، باغات انگور منتخب به دو گروه با عملکرد بالا و پایین دسته‌بندی شدند. نتایج شاخص‌های محاسبه شده به روش تشخیص چندگانه نشان داد که در بین عناصر غذایی پرمصرف، نیتروژن و پتاسیم و در بین عناصر کم‌مصرف، آهن و منگنز منفی‌ترین شاخص را به خود اختصاص دادند و کمبودشان در مقایسه با بقیه عناصر شدیدتر بود. ترتیب نیاز غذایی به‌صورت K>-Mn>-Fe>-N >-Mg=-Zn>Cu>Ca>B>P- بود. نتایج به‌دست آمده از این پژوهش می‌تواند به منظور افزایش عملکرد و بهبود کیفیت انگور در مناطق مشابه از نظر اقلیمی و خاکی با منطقه اجرا به شکل کاربردی مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: انگور، حد مطلوب، عناصر غذایی، وضعیت تغذیه‌ای

مقدمه

انگور از مهم‌ترین محصولات باغی در دنیاست که به دلیل سطح زیرکشت و ارزش اقتصادی و تغذیه‌ای بالا مورد توجه است. سالانه حدود ۶۸ میلیون تن انگور در جهان تولید می‌شود که ایران با تولید حدود ۳/۳ میلیون تن، یازدهمین تولیدکننده این میوه در جهان به شمار می‌رود. انگور جزو مهمترین محصولات باغی کشور می‌باشد و با ۳/۳ میلیون تن تولید بعد از سیب و پرتقال بیشترین مقدار تولید را به خود اختصاص داده است به‌طوری که حدود ۱۴ درصد از کل تولیدات باغی را دارا می‌باشد (Anonymous, 2013). سطح زیر کشت انگور در کشور ۳۰۹ هزار هکتار می‌باشد بیشترین سطح زیر کشت انگور مربوط به استان‌های فارس، قزوین، خراسان‌رضوی، همدان و آذربایجان‌غربی به‌ترتیب با ۶۴، ۳۱، ۲۸، ۲۲ و ۲۲ هزار هکتار می‌باشد. عملکرد انگور در کشور در مقایسه با سایر کشورهای تولید کننده انگور پایین بوده و به‌طور متوسط ۱۳۸۰۰ کیلوگرم در هکتار است. بیشترین عملکرد در واحد سطح انگور در کشور مربوط به استان‌های سمنان، کهکیلویه و بویر احمد و یزد به ترتیب با ۲۸۰۰۰،

۱- استادیار پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان‌شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email:motalebifard@gmail.com)
DOI: 10.22067/JSW.2022.74703.1137

۲۲۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. متوسط عملکرد در استان همدان نیز ۱۷۸۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. (Anonymous, 2013). همین اختلاف عملکرد در واحد سطح در بین استان‌های مختلف کشور بیانگر نقش بسیار شاخص مسائل مدیریتی و از جمله تغذیه گیاه در تولید انگور دارند. تغذیه گیاه به عنوان یک عامل تاثیرگذار، تابعی از اثرات متقابل عناصر غذایی و شرایط محیطی است. ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای گیاهان جهت دست‌یابی به ارتباط میان عناصر غذایی قابل استفاده در خاک، میزان عناصر موجود در گیاه و عملکرد ضروری است (Pereira *et al.*, 2011). به این منظور روش آزمون خاک، تجزیه گیاه، تشخیص علایم ظاهری و یا تلفیقی از آن‌ها استفاده می‌شود که هر کدام دارای معایب و محاسنی هستند (Sajjadi, 1992). برگ، اصلی‌ترین و مهم‌ترین محل متابولیسم گیاه است و غلظت عناصر غذایی در برگ در مراحل خاصی از رشد و تکامل گیاه، قادر است عملکرد آن را تحت تأثیر قرار دهد (Baldock and Schulte, 1996). تجزیه برگ و تفسیر نتایج آن اطلاعات خوبی از وضعیت تغذیه گیاه فراهم کرده و براساس آن توصیه‌های کودی مناسب انجام می‌پذیرد.

از روش‌های مختلفی نظیر غلظت بحرانی[1] (CVC)، تلفیقی تشخیص و توصیه[2] (DRIS)، انحراف از حد بهینه[3] (DOP) و تشخیص چندگانه[4] (CND) برای ارزیابی وضعیت گیاهان استفاده می‌شود. در هر یک از این روش‌ها نرم‌هایی برای هر یک از عناصر تعیین می‌گردد. هر کدام از این روش‌ها دارای معایب و محاسنی هستند. با بررسی تغییرات غلظت عناصر غذایی در عملکردهای پایین و بالا در شرایط منطقه‌ای، می‌توان وضعیت تغذیه‌ای منطقه مورد مطالعه را ارزیابی و استراتژی کودی تعیین نمود. روش تشخیص چندگانه عناصر (CND) با در نظر گرفتن نسبت یک عنصر به همه عناصر اثرات متقابل عناصر را بیان می‌دارد (Parent and Dafir, 1992). در این روش با کمک گرفتن از روش ریاضی و آماری و کاربرد تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی و تابع توزیع مربع کای، گروه‌های عملکردی زیاد و کم با دقت زیاد تفکیک می‌شوند (cbKhiari *et al.*, 2001a). بدین معنی که تمایز جامعه عملکرد به دو گروه زیاد و کم، بر اساس ترسیم تابع تجمعی بین عملکرد و نسبت واریانس شاخص‌های عناصر غذایی می‌باشد. این تابع عملکرد و عنصر غذایی شکل کاوی دارد. با تعیین نقاط عطف منحنی، گروه‌های عملکردی با دقت زیادی تفکیک می‌شود (Khiari et al., cb2001a). سپس شاخص‌های عناصر غذایی CND به روش گام به گام تعیین می‌گردد. این روش نسبت به روش‌های دیگر برتری‌هایی مانند نیاز کمتر به داده، سنجش وضعیت هر عنصر غذایی نسبت به میانگین هندسی بقیه عناصر، تفکیک دو گروه عملکردی زیاد و کم بر مبنای محاسبات ریاضی و آماری، کاربرد تابع تجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی و دقت بالاتر را دارا می‌باشد.

خیاری و همکاران (Khiari *et al.*, 2001a) با استفاده از روش CND توانستند شاخص عناصر غذایی و نرم‌های استاندارد CND را برای عناصر N، P، K، Ca و Mg جهت ارزیابی وضعیت تغذیه ذرت در مرحله رشد V_4 تا V_8 تعیین نمایند و ارتباط بسیار خوبی را (۰/۹۶ = R^2) بین شاخص تعادل عناصر غذایی روش دریس[5] (NII) با شاخص تعادل عناصر غذایی بروش CND یعنی (r^2) برای مرحله رشدی مذکور گزارش نمودند. در همین تحقیق شاخص عنصر نیتروژن در سه روش CVC، DRIS و CND مورد مقایسه قرار گرفت که ضریب تبیین (R^2) بین شاخص‌های نیتروژن با عملکرد دانه ذرت به ترتیب ۰/۰۳، ۰/۴۱ و ۰/۴۸ بدست آمد که بیانگر برتری نسبی روش CND به سایر روش‌ها است. همچنین نرم‌های CND برای محصولات دیگر نظیر پیاز توسط پارنت و خیاری (Parent and Khiari, 2003) تعیین شده است. استفاده از تکنیک CND توسط پارنت و همکاران (Parent *et al.*, 1994) برای تفسیر نتایج تجزیه گیاه و عملکرد سیب‌زمینی نیز استفاده گردید. ایشان همبستگی بسیار خوبی بین دو روش دریس و CND بدست آوردند (۰/۹۸ تا ۰/۹۵=r) و اظهار داشتند تفسیر و توصیه کودی با روش غلظت بحرانی در ۶۶/۷ درصد موارد و با روش CND در ۸۷/۵ درصد موارد صحیح ارزیابی شد. همچنین خیاری و همکاران (Khiari *et al.*, 2001b) برای تعیین وضعیت تغذیه‌ای فسفر در سیب‌زمینی از CND استفاده کردند. جانشامورتی و همکاران (Ganeshamurthy *et al.*, 2019) نیز از این روش برای کوددهی عناصر پرمصرف و تعیین نرم‌های ده عنصر غذایی سیب‌زمینی استفاده نمودند.

بصیرت و همکاران (Basirat *et al.*, 2018) وضعیت تغذیه‌ای باغات پرتقال استان فارس را با استفاده از روش CND و تجزیه آماری چند متغییره مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بیش از ۵۰ درصد باغات مورد ارزیابی مقادیر نیتروژن، کلسیم و منگنز کمتر از عدد مرجع داشتند. همچنین نتایج تجزیه آماری چندمتغیره و تجزیه به مولفه‌های اصلی نشان داد که عناصر نیتروژن، کلسیم، آهن و روی به ترتیب بیشترین اثر را بر تغییرات عملکرد داشتند. مشابه این مطالعه ارزیابی دیگری بر روی محصول پرتقال و در استان کهکیلویه و بویر احمد توسط چاکرالحسینی و همکاران (Chakerolhosseini *et al.*,

1- Critical Nutrient Concentration
2- Diagnosis and recommendation integrated system
3- Deviation from Optimum Percenatge
4- Compositional Nutrient Diagnosis
5- NII: Nutrient Imbalance Index

2016) انجام و اعداد مرجع برای ده عنصر غذایی تعیین گردید.

با بررسی منابع صورت گرفته پژوهش‌هایی در مورد تعیین وضعیت تغذیه‌ای انگور در کشور با روش‌های مختلف انجام شده است. گودرزی (Ghodarzi, 2005) وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور سی‌سخت کهکیلویه و بویر احمد را به روش انحراف از درصد بهینه (DOP) مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که همه باغات با عملکرد پایین دجار عدم تعادل تغذیه‌ای بودند و مقدار شاخص در آنها بالا بود. همچنین شایع‌ترین عناصر دچار کمبود پتاسیم، روی و آهن بودند.

در تحقیق انجام شده دیگر توسط طاهری و همکاران (Taheri, 2017) در شهرستان خدابنده، مشخص گردید که کمبود پتاسیم و مس و بیش‌بود بور و فسفر در تمام باغها، بیش‌بود نیتروژن و کمبود روی در عمده باغها و زیاد بود منگنز و روی در تعدادی از باغها وجود داشته است. جمع‌بندی نتایج نشان داد که ترتیب نیاز غذایی عناصر در باغات انگور منطقه برای سه عنصر اصلی به شکل K>N>P بوده است.

بصیرت و همکاران (Basirat *et al.*, 2016) ارقام مرجع عناصر غذایی را برای رقم شاهرودی انگور در استان سمنان تعیین نمودند. ایشان برای ارزیابی وضعیت تغذیه‌ای انگور از روش CND استفاده نمودند. نتایج نشان داد در باغات انگور شاهرود کمبود کلسیم و نیتروژن در مقایسه با دیگر عناصر غذایی بارزتر بود.

صمدی و مجیدی (Samadi and Majidi, 2010) وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور سفید بیدانه را در استان آذربایجان‌غربی با استفاده از دو روش DRIS و DOP ارزیابی نمودند. نتایج نشان داد که مصرف زیاد کودهای پتاسیمی و بالا بودن پتاسیم در اراضی کشت انگور موجب بهم خوردن تعادل کلسیم و منیزم در گیاه شده به طوری کلسیم منفی‌ترین شاخص دریس را نشان داد. دامنه کفایت غلظت عناصر غذایی مستخرج از روش دریس نشان داد که در تمامی تاکستان‌های با عملکرد پایین عنصر منیزیم منفی‌ترین شاخص پرمصرف و روی بیشترین کمبود عناصر کم مصرف را به خود اختصاص دادند. منطقه ملایر استان همدان یکی از مهمترین مناطق تولید انگور بی‌دانه در کشور است ولی متأسفانه در مورد وضعیت تغذیه‌ای این محصول پژوهش مناسبی در سطح ملی و منطقه‌ای انجام نگرفته است. هیچ پژوهشی در مورد غلظت مناسب عناصر غذایی و وضعیت تغذیه‌ای انگور بی‌دانه در ملایر وجود ندارد. در توجه به اهمیت و گستردگی تولید این محصول در منطقه و نبود نرم‌های تغذیه‌ای مورد نیاز، این پژوهش با هدف بررسی وضعیت تغذیه‌ای باغات انگور با استفاده از روش CND انجام گردید. همچنین نرم‌ها، شاخص‌ها و شاخص تعادل تغذیه‌ای CND نیز برای این محصول تعیین گردید.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر روی محصول انگور در طی سال‌های ۹۹-۱۳۹۷ و به مدت سه سال در استان همدان اجرا شد. در هر سال تعداد ۴۰ باغ مختلف انتخاب شدند. تمام باغها در استان در شهرستان ملایر قرار داشتند. باغها در هر منطقه طوری انتخاب شدند که دارای عملکردهای متفاوت باشند یعنی شامل باغهای با عملکرد مطلوب، با عملکرد متوسط و عملکرد پایین بودند. در عین حال از لحاظ مولفه‌های خاک و سن باغ نوسان سن نداشته و وضعیت عمومی یکسانی داشتند اما محدودیت های غالب منطقه را نیز داشته و همگی از رقم کشمش بوده و از لحاظ عملکرد متفاوت بودند. موقعیت جغرافیایی باغها ثبت و داده‌های هواشناسی برای ارزیابی تناسب اقلیمی جمع‌آوری شد.

برای هر باغ پرسشنامه‌ای تکمیل گردید که در آن اطلاعات مدیریتی باغ از قبیل عملکرد سال‌های قبل، نوع کودهای شیمیایی مصرفی، سابقه مصرف کودهای حیوانی و بیولوژیک، تعداد دفعات آبیاری، سن درختان باغ، وضعیت هرس، استفاده از سموم شیمیایی و آفات و بیماری‌های شایع باغ و .... درج گردید. در هر باغ تعداد ۳۰ درختچه انگور ۱۲ تا ۱۵ ساله بطور تصادفی و پراکنده اما از لحاظ رقم، سن و تیپ یکسان انتخاب شد.

در هر سال، عملکرد هر باغ اندازه‌گیری و اجزاء عملکرد آن نیز یادداشت‌برداری شد. در سال‌های اول و دوم و سوم نمونه‌برداری از برگ برای تعیین غلظت عناصر غذایی و عملکرد باغات انجام گرفت. نمونه گیاهی از کامل‌ترین برگ‌های انتهایی تهیه و قسمتی از آن در آون با دمای ۷۰ درجه سلسیوس به‌مدت ۴۸ ساعت خشک و غلظت عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، آهن، روی، منگنز، مس و بور در اندام هوایی پس از خشک‌سوزانی همراه با مخلوط اسید کلریدریک و اسید نیتریک (Westerman, 1990) تعیین گردید. فسفر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر (Jones, 2001) و آهن، روی، مس و منگنز توسط دستگاه جذب اتمی (Ryan *et al.*, 2001) انجام شد.

روش تشخیص چندگانه عناصر

مبانی ریاضی و آماری این روش توسط پرنت و دافیر (Parent and Dafir, 1992) بیان شده است. ترکیبات بافت گیاهی حاوی عناصر غذایی (N, P, K...) و یک بخش باقیمانده (Rd) می‌باشد مجموع ترکیبات گیاهی بر مبنای عدد ۱۰۰ است و مجموع نسبت لگاریتمی عناصر با احتساب مقدار باقیمانده ترکیبات (Rd) برابر صفر خواهد بود.

$$N+P+K+\ldots+Rd=100 \quad (۱)$$

$$Rd = 100 - (N + P + K \ldots) \quad (۲)$$

در این روش ابتدا عملکردها از زیاد به کم ردیف شدند. سپس میانگین هندسی عناصر غذایی و نسبت لگاریتم طبیعی عناصر با روابط زیر محاسبه گردید:

$$G = (N \times P \times K \times \cdots \times Rd)^{\frac{1}{d+1}} \quad (۳)$$

در این معادله d تعداد عناصر غذایی مورد بررسی در این پژوهش، G میانگین هندسی عناصر غذایی و Rd بخش باقیمانده می‌باشد.

$$Zi = \log[xi/G] \quad (۴)$$

واریانس، نسبت واریانس و تابع تجمعی نسبت واریانس برای گروه‌های عملکردی محاسبه گردید. واریانس با استفاده از نرم‌افزار اکسل محاسبه و نسبت واریانس با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد.

(۵)

$$f_i(V_X) = \frac{\text{Variance of } V_X \text{ of } n_1 \text{ observations}}{\text{Variance of } V_X \text{ of } n_2 \text{ observations}}$$

اولین تابع نسبت واریانس محاسبه شده از دو عملکرد بالا در یک خط با بیشترین بازده قرار می‌گیرد بنابراین سه خط پایینی خالی می‌ماند. تابع تجمعی نسبت واریانس هم از رابطه زیر محاسبه شد. در این معادله n_1-1 شماره نسبت واریانس و n کل مشاهدات می‌باشد.

$$F_i^c(V_X) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_X)}{\sum_{i=1}^{n-3} f_i(V_X)} \times 100 \quad (۶)$$

سپس رابطه تابع تجمعی نسبت واریانس، با عملکرد ترسیم گردید. از طریق میانگین‌گیری از نقاط عطف منحنی‌ها، گروه‌های عملکردی کم و زیاد از هم تفکیک شدند.

فرم بیان (Z_i) در جامعه با عملکرد بالا، بیانگر غلظت مطلوب است و به عنوان ارقام مرجع یا نرم‌های CND (Z_i^*) محسوب می‌شود. بنابراین با استاندارد کردن غلظت هر عنصر غذایی گیاه مورد مطالعه با نرم‌های CND، شاخص عناصر غذایی CND بدست آمد (معادله ۱۰).

$$I_{zi} = \frac{Z_i - Z_i^*}{SD_{zi}^*} \quad (۷)$$

در این معادله I_{zi} شاخص عنصر غذایی، Z_i^* فرم بیان در جامعه با عملکرد بالا و Z_i مربوط به نمونه مجهول می‌باشد.

شاخص تعادل تغذیه‌ای CND (r^2) با استفاده از معادله ۸ محاسبه گردید.

$$r^2 = I_N^2 + I_P^2 + I_K^2 + \cdots + I_{Rd}^2 \quad (۸)$$

نتایج و بحث

داده‌های عملکرد و غلظت عناصر غذایی مربوط به ۸۳ باغ بر اساس میزان عملکرد از زیاد به کم ردیف شد. سپس مقادیر میانگین هندسی (G) و نسبت لگاریتمی (Vx) ۱۰ عنصر غذایی محاسبه گردید. در ادامه مقادیرتجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی یعنی F_i^c (V_N)، F_i^c (V_P)، F_i^c (V_K)، F_i^c (V_{Ca})، F_i^c (V_{Mg})، F_i^c (V_{Fe})، F_i^c (V_{Zn})، F_i^c (V_{Mn})، F_i^c (V_{Cu})، F_i^c (V_B) و F_i^c (V_R) برای کلیه عناصر محاسبه و ترسیم گردید که به‌صورت ۱۱ معادله درجه ۳ برای ۱۰ عنصر و یک قسمت باقیمانده (R_d) برازش داده شد (جدول ۱). نقاط عطف منحنی‌ها برای ده عنصر غذایی و ترکیبات باقیمانده برای انگور بر حسب کیلوگرم در هکتار محاسبه شدند و مطابق جدول ۱ عبارت بودند از: F_i^c (V_N)=۳۸۸۸۸، F_i^c (V_P)=۳۳۳۳۳، F_i^c =۳۳۳۳۳ (V_K)، F_i^c (V_{Ca})=۳۳۳۳۳، F_i^c (V_{Mg})=۳۳۳۳۳، F_i^c (V_{Fe})=۳۲۸۵۷، F_i^c (V_{Cu})=۳۳۳۳۳، F_i^c (V_{Zn})=۳۰۰۰۰، F_i^c (V_{Mn})=۲۷۷۷۸، F_i^c (V_B)=۱۳۳۳۳ و F_i^c (V_R)=۳۳۳۳. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود مدل درجه ۳ برای تمام عناصر غذایی و باقیمانده در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار بود. عملکرد انگور ۳۷۶۱۹ کیلوگرم در هکتار به‌عنوان عملکرد حدواسط برای تفکیک دو گروه با عملکرد بالا و پایین محاسبه گردید (Khiari *et al.*, 2001b). بر اساس روش ذکر شده توسط خیاری و همکاران (Khiari *et al.*, 2001b) حداکثر عملکرد در نقاط عطف مشاهده شده در منحنی‌های مقادیرتجمعی نسبت واریانس عناصر غذایی به عنوان عملکرد حد واسط انتخاب شد. همانگونه که مشاهده می‌شود حداکثر عملکرد در پتاسیم مشاهده شده است. در مجموع و با این تفکیک ۱۹ باغ در جامعه با عملکرد بالا و ۶۴ باغ در گروه با عملکرد پایین قرار گرفتند.

برآورد اعداد مرجع عناصر غذایی به روش تشخیص چندگانه

با توجه به اینکه غلظت عناصر در جامعه با عملکرد بالا به‌عنوان اعداد مرجع و حد بهینه عناصر غذایی در نظر گرفته می‌شوند (Khiari *et al.*, 2001a) در نتیجه با در نظر گرفتن عملکرد ۳۷۶۱۹ کیلوگرم در هکتار، مقادیر V^*_N، V^*_P، V^*_K، V^*_{Ca}، V^*_{Mg}، V^*_{Fe}، V^*_{Mn}، V^*_{Zn}، V^*_{Cu} و V^*_B به عنوان اعداد مرجع تعیین شدند که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- برآورد عملکرد حد واسط انگور با روش توابع تجمعی واریانس نسبت لگاریتمی عناصر غذایی

Table 1- Grape intermediate yield estimation by cumulative variance of nutrients logarithmic ratio

عناصر غذایی Nutrients	عملکرد تعیین شده Determined yield	$F_i^c (V_X)=aY^3 +bY^2 +cY +d$	R^2
N	9523	$Y=7E-13x^3 -2E-08x^2 -0.003x +110$	0.99^{**}
P	33333	$Y=2E-12x^3 -2E-07x^2 +0.0027x +87.8$	0.99^{**}
K	37619	$Y=7E-13x^3 -1E-8x^2 -0.0034x +108$	0.98^{**}
Ca	33333	$Y=1E-12x^3 -1E-07x^2 +0.0004x +96.3$	0.99^{**}
Mg	14815	$Y=-9E-13x^3 -4E-08x^2 -0.0026x +130.1$	0.98^{**}
Fe	16667	$Y=-2E-12x^3 -1E-07x^2 +0.0009x +98.5$	0.99^{**}
Cu	29167	$Y=8E-13x^3 -7E-08x^2 +0.001x +26.1$	0.98^{**}
Zn	16667	$Y=2E-12x^3 -1E-07x^2 +0.0007x +92.7$	0.98^{**}
Mn	33333	$Y=2E-12x^3 -2E-07x^2 +0.0016x +98.8$	0.99^{**}
B	33333	$Y=-1E-12x^3 +1E-07x^2 -0.0078x +151.9$	0.98^{**}
قسمت باقیمانده Filling vlue	33333	$Y=2E-12x^3 -2E-07x^2 +0.0028x +82.1$	0.97^{**}

جدول ۲- نرم‌های CND و انحراف معیار آن برای ده عناصر غذایی و ترکیبات باقیمانده در باغات مورد مطالعه

Table 2- CND norms and its SD for nutrients and residual compounds in the studied grape fields

عنصر غذایی Nutrient	نرم CND CND Norm	میانگین نرم CND Average CND norm	انحراف معیار نرم CND SD of CND norm	میانگین غلظت در جامعه با عملکرد مطلوب Average concentration in grape fields with high yield (%)	انحراف معیار SD
N	V^*_N	3.24	0.15	2.82	0.44
P	V^*_P	1.005	0.33	0.32	0.11
K	V^*_K	2.45	0.12	1.27	0.13
Ca	V^*_{Ca}	3.09	0.21	2.46	0.52
Mg	V^*_{Mg}	0.93	0.23	0.29	0.05
		mg kg^{-1}			
Fe	V^*_{Fe}	-2.13	0.35	126	41
Zn	V^*_{Zn}	-3.61	0.42	32.7	16
Mn	V^*_{Mn}	-2.5	0.44	99.1	46
Cu	V^*_{Cu}	-4.44	0.26	13.3	3.6
B	V^*_B	-4.68	0.12	10.3	1.3

ارتباط شاخص تعادل عناصر غذایی (r^2) با عملکرد انگور

این شاخص به عنوان معیاری برای ارزیابی وضعیت تعادل تغذیه‌ای می‌باشد و می‌تواند صفر و یا بزرگ‌تر از صفر باشد. در این شاخص تعادل تغذیه‌ای نیز هرچه مجموع توان دوم شاخص‌های CND بزرگ‌تر از صفر باشد عدم تعادل تغذیه‌ای بیشتر می‌شود. در این روش شاخص تعادل تغذیه‌ای از جمع قدر مطلق کلیه عناصر غذایی به‌دست می‌آید (I_N، I_P، I_K،...) که رابطه‌ی معکوسی با میزان عملکرد دارد (Basirat *et al.*, 2018). مقدار بحرانی به روش آماری کیت-نلسون محاسبه و مقدار آن برای عملکرد حداکثر ۳۷۶۱۹ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. شاخص عناصر غذایی (I^2_x) با استفاده از روش تصویری کیت–نلسون و عملکرد بحرانی آن عنصر و بر اساس تابع توزیع آماری کای اسکوئر (K^2) با درجه آزادی d+1 و فرمول مربوط در اکسل محاسبه و مقدار آن ۸/۰۱ برای عملکرد ۳۷۶۱۹ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد (شکل ۱) که با عدد به‌دست آمده از جدول ۳ (۷/۵۳) خیلی نزدیک است. حدود بحرانی بالا و پایین با جذر گرفتن از I_x محاسبه شد (جدول ۳). دامنه‌های بحرانی ارائه شده در این جدول را می‌توان به عنوان یک "دامنه‌ی کفایت" برای شاخص‌های عناصر غذایی در نظر گرفت که اعداد خارج از این دامنه بیانگر وضعیت بحرانی و داخل دامنه نشانه‌ی وضعیت خوب و بسنده است. مثلاً شاخص بحرانی ۰/۹۵ برای نیتروژن در دامنه‌ی ۰/۹۵ تا ۰/۹۵- قرار می‌گیرد که بیانگر وضعیت عادی این عنصر برای انگور می‌باشد. بطورکلی، بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۳ مشاهده می‌شود که شاخص I^2_x برای عناصر مورد مطالعه همراه با حد بحرانی پایین و بالای هر عنصر غذایی به‌دست آمده است. در محدوده بین این حدود تعادل برای این عناصر در باغات وجود دارد.

جدول ۳- شاخص عناصر غذایی و دامنه کفایت و بحرانی برای ۱۰ عنصر غذایی در باغات انگور

Table 3- Nutrients index and sufficiency and critical range for 10 nutrients in grape fileds

نوع شاخص Index type	شاخص عناصر غذایی Nutrients index (I^2x)	حد بحرانی بالا Upper critical level	حد بحرانی پایین Lower critical level	عملکرد بحرانی Critical yield
I^2_N	0.9	0.95	-0.95	9524
I^2_P	1.1	1.05	-1.05	33333
I^2_K	1.95	1.4	-1.4	37619
I^2_{Ca}	0.15	0.39	-0.39	33333
I^2_{Mg}	0.7	0.84	-0.84	14815
I^2_{Fe}	0.18	0.42	-0.42	16667
I^2_{Cu}	0.4	0.63	-0.63	29167
I^2_{Zn}	0.15	0.39	-0.39	16666
I^2_{Mn}	0.2	0.45	-0.45	33333
I^2_B	1.8	1.34	-1.34	33333
جمع SUM (r^2)	7.53			37619

شکل ۱- رابطه بین عملکرد ($kg\ ha^{-1}$) و CND r^2 در انگور همدان

(خط افقی عملکرد ۳۷۶۱۹ کیلوگرم در هکتار و خط عمودی شاخص ۸/۰۱ می‌باشد)

Figure 1- Relationship between yield ($kg\ ha^{-1}$) and CND r^2 in grape fields of Hamedan

شکل ۱ نشان‌دهنده رابطه عملکرد در دو گروه عملکرد بالا و پایین با شاخص تعادل عناصر غذایی است و نشان می‌دهد که در عملکردهای کمتر از ۳۷۰۰۰ کیلوگرم در هکتار تعادل تغذیه‌ای دچار اختلال شده است و شاخص تعادل تغذیه‌ای افزایش یافته است (Basirat *et al.*, 2018). در عملکردهای بیشتر از ۳۷۰۰۰ کیلوگرم در هکتار شاخص تعادل عناصر غذایی به سمت مقادیر زیر ۱۰ و در عملکردهای زیر ۲۵۰۰۰ کیلوگرم در هکتار شاخص تعادل عناصر غذایی به بالای ۲۰ افزایش یافت. نتایج نشان داد که ضریب تبیین بین عملکرد و شاخص تعادل تغذیه‌ای در روش CND حدود ۰/۳ بود که بیانگر همبستگی بهتر نتایج این روش در مقایسه با روش انحراف از درصد بهینه (۰/۲۴) بود.

تفسیر نتایج تعدادی از باغات با عملکرد پایین با روش تشخیص چندگانه

بر اساس میانگین شاخص‌های CND ترتیب اولویت عناصر غذایی مورد نیاز در باغات با عملکرد پایین برای عناصر غذایی پرمصرف و کم مصرف به ترتیب به صورت K>N>Mg>Ca>P و Mn>Fe>Zn>Cu>B به دست آمد (جدول ۴). شاخص پتاسیم در ۸۳ درصد از باغات با عملکرد پایین، منفی بود. بعد از عنصر پتاسیم، نیتروژن در ۵۸ درصد از باغات دارای عملکرد متوسط و پایین دارای شاخص منفی بود. به دلیل عدم توجه به مصرف متناسب کودهای پتاسیمی در باغات، کمبود آن حداقل در نیمی از باغات کمبود آن بروز کرده است. بعد از پتاسیم، عنصر نیتروژن بیشترین کمبود را به خود اختصاص داد. با توجه به نقش نیتروژن در رشد رویشی، گلدهی و تشکیل و درشت شدن غده می‌توان گفت که در خاک‌های منطقه

معمولاً ماندگاری مواد آلی خاک به سبب تجزیه سریع کم می‌باشد و خاک‌های منطقه عمدتاً دارای مواد آلی پایین می‌باشند (جدول ۴) و چون بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه از طریق مواد آلی خاک تأمین می‌شود، ممکن است نیتروژن برای مدت زمان کمتری در دسترس محصول باشد. از طرف دیگر، سبک بودن بافت خاک سبب می‌شود بخش قابل توجهی از کودهای نیتروژنی مورد استفاده در باغات، آبشویی شده و از دسترس گیاه خارج شوند. بنابراین، برنامه مدیریتی خاک و زراعتی می‌تواند مقدار ماده آلی خاک را افزایش دهد و قابلیت استفاده نیتروژن را در انگور تغییر دهد. در بین عناصر پرمصرف فسفر مثبت‌ترین شاخص را دارا بود و در اکثر باغات مثبت بود. در بین عناصر کم مصرف شاخص‌های منگنز، آهن و روی به‌ترتیب در ۵۹، ۴۹ و ۷۳ درصد از باغات منفی بودند، وجود شرایط آهکی در خاک‌های منطقه می‌تواند دلیل این کمبود باشد. تهویه خوب، pH بالا، وجود Ca و Mg، جذب آهن را کاهش می‌دهد (Malakouti and Riazi-Hamadani, 1992). شاخص بور در برخی باغات مثبت و در برخی از باغات دیگر منفی بود. شناخت دامنه اثر فرآیندهای کنترل کننده فعالیت بور در محلول خاک برای حفظ کیفیت آب و مدیریت حاصلخیزی خاک مهم است. مجیدی و راهنمایی (Majidi and Rahnemaie, 2016) گزارش کردند که ظرفیت تبادل کاتیونی و کربنات کلسیم فعال خاک، از مهمترین عوامل ابقای بور در خاک‌های آهکی هستند و رابطه مثبتی با درجه برگشت پذیری بور در خاک نشان دادند.

همچنین در مجموع شاخص عوامل ناشناخته در ۴۱ درصد باغات انگور استان همدان منفی بود. عواملی مانند سیستم آبیاری، شیوع و بروز بیماری‌های گیاهی و حمله آفات، تغییرات ناگهانی دما، هرس و مبارزه با علف‌های هرز جزو عواملی هستند که ممکن است به عنوان عامل ناشناخته در کاهش عملکرد انگور نقش ایفا کرده باشند. بطور جزئی نیز وضعیت تغذیه‌ای هر باغ جداگانه ارزیابی شد و بیشترین اهمیت آن در این است که وضعیت هر عنصر با توجه به همه عناصر پرمصرف (نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، منیزیم) و کم‌مصرف (آهن، منگنز، روی، مس، بور) یعنی با لحاظ اثرات متقابل ۱۱ عنصر غذایی برآورد شده است در حالی‌که در روش غلظت بحرانی این اثرات بخوبی لحاظ نشده است.

نتیجه‌گیری

– میانگین عملکرد در کل باغات ۲۹۱۳۰ کیلوگرم بر هکتار و انحراف معیار آن ۱۱۹۵۵ محاسبه گردید. میانگین عملکرد در باغات با عملکرد بالا ۵۱۳۳۰ و در جامعه با عملکرد متوسط و پایین ۲۶۴۲۹ کیلوگرم بر هکتار بود که اختلاف بین عملکرد این جوامع از لحاظ آماری معنی‌دار بود.

در بین عناصر پرمصرف، شاخص عنصر نیتروژن در تمام باغات با عملکرد متوسط و پایین منفی بود و در ۳۳ درصد باغات منفی‌ترین شاخص را دارا بود و شاخص عنصر فسفر در ۵۳ درصد از باغات دارای عملکرد متوسط و پایین مثبت بود و منیزیم بعد از فسفر مثبت‌ترین شاخص‌ها را دارا بود. با توجه به نقش نیتروژن در رشد رویشی، گلدهی و تشکیل و درشت شدن غده می‌توان گفت که در خاک‌های منطقه معمولاً ماندگاری مواد آلی خاک به سبب تجزیه سریع کم می‌باشد و خاک‌های منطقه عمدتاً دارای مواد آلی پایین می‌باشند و چون بخشی از نیتروژن مورد نیاز گیاه از طریق مواد آلی خاک تأمین می‌شود، ممکن است نیتروژن برای مدت زمان کمتری در دسترس محصول باشد. در بین عناصر کم مصرف شاخص‌های آهن و بور به ترتیب در ۷۱ و ۷۹ درصد از باغات منفی بودند.

جدول ۴- شاخص‌های CND، عملکرد و اولویت نیاز عناصر غذایی پرمصرف و کم‌مصرف در باغات انگور با عملکرد پایین

Table 4- CND indices, yield and macro and micro nutrients requirement preference in grape fields with lower yield

عملکرد Yield	شاخص‌ها Indexes										اولویت نیاز عناصر غذایی Nutrients requirement rank		
	I_N	I_P	I_k	I_{Ca}	I_{Mg}	I_{Fe}	I_{Cu}	I_{Zn}	I_{Mn}	I_B	عناصر پرنیاز Macronutrients	عناصر کم نیاز Micronutrients	r2
35000	-0.28	-1.05	-0.83	-0.64	-1.14	0.54	1.47	-1.68	0.36	2.80	Mg>P>K>Ca>N	Zn>Mn>Fe>Cu>B	12.6
33000	0.65	1.12	2.4	-0.33	1.14	0.21	-1.57	0.81	-1.03	-1.29	Ca>N>P>Mg>K	Cu>B>Mn>Fe>Zn	18.5
30000	0.79	1.29	-3.77	-0.79	-0.57	1.11	-0.38	0.40	-0.53	-1.39	K>Ca>Mg>N>P	B>Mn>Cu>Zn>Fe	21.9
26000	0.94	1.53	1.05	-0.30	1.88	-0.25	-1.73	1.39	-2.09	0.22	Ca>N>K>P>Mg	Mn>Cu>Fe>B>Zn	29.3
25000	0.30	1.76	-4.64	-0.45	-0.18	-0.77	-0.33	1.33	-0.36	0.41	K>Ca>Mg>N>P	Fe>Mn>Cu>B>Zn	30.1
22000	0.82	1.15	-5.6	-0.36	1.59	-1.25	-0.92	0.38	-0.34	0.59	K>Ca>N>P>Mg	Fe>Cu>Mn>Zn>B	43.9
20000	0.20	1.23	-4.28	-0.92	1.27	-1.12	-1.89	-0.63	-0.29	4.73	K>Ca>N>P>Mg	Cu>Fe>Zn>Mn>B	42.8
18000	0.12	1.42	-6.69	0.46	0.43	-1.06	-0.52	1.47	-1.59	2.02	K>N>Mg>Ca>P	Mn>Fe>Cu>Zn>B	63
10000	-2.13	-1.28	-5.89	1.02	-0.94	2.72	1.49	-0.97	0.25	1.15	K>N>P>Mg>Ca	Zn>Mn>B>Cu>Fe	59.4
8000	-0.49	2.1	-5.9	-0.15	-0.81	-0.41	-0.45	-0.45	-0.13	-0.20	K>Mg>N>Ca>P	Cu>Zn>Fe>B>Mn	50.7
میانگین Average	-0.02	0.49	-2.47	0.06	-0.01	-0.06	0.01	-0.01	-0.19	0.13	K>N>Mg>Ca>P	Mn>Fe>Zn>Cu>B	

این در حالی است که شاخص مس در ۶۳ درصد باغات مثبت شد. در این استان شرایط آهکی خاک‌ها، قابلیت فراهمی عناصر کم‌مصرف را از خاک به ریشه گیاهان با مشکل مواجه نموده است.

به دلیل لحاظ نمودن اثرات متقابل کلیه عناصر روش CND می‌تواند جامعیت بیشتری نسبت به روشهای دیگر مانند DOP داشته باشد. لذا پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی به این روش و نتایج حاصل از آن برای تشخیص اختلالات تغذیه‌ای و توصیه‌های کودی توجه کافی صورت گیرد و با توجه به اینکه در مناطق اجرا عوامل ناشناخته درصد قابل توجهی از عوامل مؤثر در عملکرد را دارا بودند، انجام تحقیقات مشترک بین علوم خاک‌شناسی و زراعت برای دست یافتن به الگوهای کشت مناسب به منظور افزایش کارایی عناصر و اجرای یک مدیریت تلفیقی در مزرعه ضروری می‌باشد و تنها انجام آنالیزهای آماری ساده برای گرفتن تصمیم‌های نهایی و کلان کافی نمی‌باشد. همچنین نتایج حاصله در باغات انگور گویای اختلاف در روش مدیریت آن‌ها و کاربرد نامتعادل کودهای شیمیایی می‌باشد.

منابع

1. Anonymous. 2013. Agricultural statistics. First volume: Crops Jihade-Agriculture Ministry, Tehran, Iran.
2. Baldock J.O., and Schulte E.E. 1996. Plant analysis with standardized scores combined with DRIS and Sufficiency ranges approaches in corn. Agronomy Journal 88: 448-456. https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800030015x.
3. Basirat M., Akhiani A., and Daryashenas A. 2016. Estimating sufficiency norms in compositional nutrient diagnosis (CND1) method for Shahroudi table grape. Iranian Journal of Soil Research 30(1): 1-11. (In Persian with English abstract)
4. Basirat M., Hanghightnia H., and Mousavi S.M. 2018. Evaluation and determination of the nutritional status of valencia orange orchards in south of fars province. Journal of Water and Soil 32(1): 143-154. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v32i1.67597.
5. Chakerolhosseini M.R., Khorassani R., Fotovat A., and Basirat M. 2016. Determination of norms and limitation of nutrients for orange by the compositional nutrient diagnosis method. Journal of Soil Management and Sustainable Production 6(3): 161-172. (In Persian with English abstract)
6. Ganeshamurthy A.N., Govindakrishnan P., Raghupathi H.B., and Mahendra Kumar M.B. 2019. Compositional nutrient diagnosis (CND) norms and indices for potato (*Solanum tuberosum* L.). Journal of Horticultural Science 14(2): 142-148. https://doi.org/10.24154/JHS.2019.v14i02.009.
7. Ghodarzi A.K. 2005. Nutritional balance evaluation of Sisakht region vineyard in Kohkiloyeh and Boyerahmad province by DOP method. Soil and Water Science 19(1): 33-34. (In Persian)
8. Jones J. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, LLC. USA.
9. Khiari L., Parent L.E., and Tremblay N. 2001a. Critical compositional nutrient indexes for sweet corn at early growth stage. Agronomy Journal 93: 809-814. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934809x.
10. Khiari L., Parent L.E., and Tremblay N. 2001b. The Phosphorus compositional nutrient diagnosis range for potato. Agronomy Journal 93: 815-819. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934815x.
11. Khiari L., Parent L.E., and Tremblay N. 2001c. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. Agronomy Journal 93: 802-808. https://doi.org/10.2134/agronj2001.934802x.
12. Majidi A., Rahnemaie R. 2015. Effects of physicochemical properties of calcareous soils on boron adsorption-desorption reactions. Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Sciences) 29(3): 321-333. (In Persian with English abstract)
13. Malakouti M.J., and Riazi-Hamadani A. 1992. Soil fertility and fertilizers (Translated), University Publication Center. Ministry of Culture and Higher Education. Pub. No. 598, pp. 800.
14. Parent L.E., and Dafir M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. Journal of American Society for Horticultural Science 117: 239-242. https://doi.org/10.21273/JASHS.117.2.239.
15. Parent L.E., and Khiari L. 2003. The compositional nutrient diagnosis of onions .xxxvi international horticultural congress: Toward ecologically sound fertilization strategies for field vegetable production. http://www.actahort.org.
16. Parent L.E., Cambouris A.N., and Muhawenimana A. 1994. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. Soil Science Society of American Journal 58: 1432-1438. https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050022x.
17. Pereira B.F., Stoffella P.J., and Melfi A.J. 2011. Reclaimed wastewater: Effects on citrus nutrition. Journal of Agricultural Water Management 98: 1828-1833. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.009.
18. Ryan J.R., Stefan G., and Rashid A. 2001. Soil and Plant Analysis Laboratory Manual (2nd ed). ICARDA. Aleppo, Syria, PP.172.
19. Sajjadi A.S. 1992. Diagnisis and recommendation integrated system. Report number of 847. Soil and Water

Research Institute, Tehran, Iran. (In Persian)
20. Samadi A., and Majidi A. 2010. Determination of DRIS indices and comparison of them with DOP method in curly white grape. Iranian Journal of Soil Research (Formerly Soil and Water Sciences) 24(2): 89-105. (In Persian eith English abstract)
21. Taheri M. 2017. Evaluation of vineyards nutritional status using nutrition indices in Khodabande region. Iranian Journal of Horticultural Science 47(4): 703-715. (In Persian with English abstract). http://dx.doi.org/10.22059/ijhs.2017.123762.764.
22. Westerman L.Z. 1990. Soil Testing and Plant Analysis. Soil Science Social America Book Sereach 5. Madison, WI, USA.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 391-377

Effect of Zinc Oxide Nano-Particles (ZnO) on some Physical and Chemical Properties of Soils with Different Textures

S. Rezaei[1], H. Bayat[2*]

Received: 22-02-2022
Revised: 07-03-2022
Accepted: 13-06-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Rezaei S., and Bayat H. 2022. Effect of Zinc Oxide Nano-Particles (ZnO) on some Physical and Chemical Properties of Soils with Different Textures. Journal of Water and Soil 36(3):. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.75234.1143

Introduction

Given the energy crisis in the world, increasing environmental pollution, clean, renewable energy and the reduction of environmental pollution are needed. Soil is the main source of agricultural production. Therefore, maintaining soil health and fertility is very important for sustainable food production. Nanotechnology is a good way to reduce soil issues in agriculture, a promising method to improve soil properties and significant capacity to increase yield. Nanotechnology is one of the newest technologies that is used in all fields of science and research due to its high potential and unique features, including natural resources and soil protection. Nanoparticles have the ability to change some physical, mechanical and chemical properties of soil due to their very high specific surface area and activity. Nanoparticles increase the cation exchange capacity of soil and soil porosity. Among all nanoparticles, zinc oxide (ZnO) is one of the most widely used nanoparticles. Zinc oxide nanoparticles due to their high specific surface area can act as a bonding agent between particles and stabilize the soil structure by flocculating soil particles. Although many studies have used zinc oxide nanoparticles (ZnO) in the field of heavy metal contamination in soil, aqueous solutions and plants, the effect of one nanoparticle on soils with different textures has been less reported. Therefore, objective of this study was to investigate the effect of zinc oxide nanoparticles on some physical and chemical properties of soils with different textures.

Materials and Methods

In this study, three soil samples with different textures, including sandy loam, loam and clay were collected from three locations as Malayer, Abbasabad and Nahavand, in Hamedan province, respectively. Samples were taken from soil surface (0-20 cm depth). The soil samples were transferred to the Soil Physics Laboratory. After air drying, they were passed through a 4 mm sieve and mixed with specific weight percentages of zinc oxide (ZnO) nanoparticles (zero, 0.5, 1 and 3 % W/W) in three replications. After preparing the treated samples, the soils were homogeneously poured into plastic containers measuring 18 × 5.5 × 18 cm with a specific bulk density related to the field. The treated soils in plastic containers, were wetted and dried with municipal water for 120 consecutive incubation period. After 120 days from the start of incubation, the samples were taken from the containers. Some physical and chemical properties including pH, cation exchange capacity, organic matter, calcium carbonate and electrical conductivity were measured.

Results and Discussion

The results showed that the use of nanoparticles increased the cation exchange capacity in two textures of loamy and clay soils. The increment was significant compared to the control in loamy soil at two levels of 1 and 3% and in clay soil in all three levels of 0.5, 1 and 3%. Electrical conductivity increased and decreased ($P < 0.05$) at 3% level for loamy soil and at 3% for sandy loam and clay soils, respectively. In contrast, the application of nanoparticles led to a decrease in pH and organic matter content ($P < 0.05$) in sandy loam and clay soils, respectively. At the level of zero and 0.5%, the order of pH was: sandy loam> clay> loamy soil, with significant differences. But at the level of 1%, the order of pH was: sandy loamy> loamy> clay, with significant differences.

1 and 2- Masters Degree of Soil Science and Associate Professor, Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: h.bayat@basu.ac.ir)

At 3% level, the order of pH was: loamy> sandy loam> clay, with significant differences. At all levels of zero, 0.5, 1 and 3% of zinc oxide nanoparticles, the amount of organic matter was significantly in loamy> clay> sandy loam. Application of different levels of zinc oxide nanoparticles in clay soil reduced the percentage of calcium carbonate ($P < 0.05$) (at the 3% by weight level), but had no effect on the amount of this variable in sandy loam and loamy soils. At all levels of zero, 0.5, 1 and 3%, the amount of soil calcium carbonate was significantly in the following order: clay> sandy loam> loam.

Conclusion

According to the results obtained in this study, it can be concluded that the use of nanoparticles can be a good solution to reduce the harmful environmental effects of chemical fertilizers. In addition to the positive effect of zinc oxide nanoparticles on physical and chemical parameters in different textures, the selection of the most optimal level of zinc oxide nanoparticles should be economically applicable. This requires further studies to determine the significant effects of nanoparticles on the physicochemical properties of the soils in different conditions to determine the optimal amount of nanoparticles, in order to save costs.

Keywords: Metal oxides, Zinc oxide, Nanoparticles, Cation exchange capacity, Organic matter

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص. ۳۹۱-۳۷۷

تاثیر نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) بر برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با بافت متفاوت

سحر رضایی[۱]- حسین بیات[۲]*

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۳

چکیده

فناوری نانو در کشاورزی می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های نوید بخش، کمک شایانی به بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش قابل توجه محصول نماید. نانو ذرات به دلیل دارا بودن سطح ویژه بسیار زیاد، فعال و واکنش‌پذیر، توانایی تغییر در برخی از ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی خاک را دارند. با این وجود، تاثیر نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) بر بسیاری از ویژگی‌های خاک تا کنون بررسی نشده است. بنابراین، هدف این مطالعه بررسی تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با بافت متفاوت بود. برای این منظور، نمونه‌برداری از ۳ خاک با بافت‌های لوم‌شنی، لومی و رسی انجام شد و با درصدهای وزنی مشخصی (صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد وزنی) از نانوذرات اکسیدروی در سه تکرار مخلوط گردید. خاک‌های تیمار شده درون ظروف پلاستیکی، به مدت ۱۲۰ روز تحت شرایط اشباع و خشک شدن متوالی قرار گرفتند. سپس اثرات احتمالی نانو ذرات اکسیدروی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانو اکسیدروی سبب افزایش مقدار گنجایش تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی ($P < 0.05$) در بافت‌های مختلف خاک گردید. در مقابل، کاربرد نانو ذرات اکسیدروی سبب کاهش pH ($P < 0.05$) در بعضی سطوح از خاک‌های لوم‌شنی و رسی گردید. هم‌چنین کاربرد سطوح مختلف نانو اکسیدروی در خاک رسی موجب کاهش درصد کربنات کلسیم معادل ($P < 0.05$) گردید، اما تأثیری بر مقدار این متغیر در خاک‌های لوم‌شنی و لومی نداشت. به‌طورکلی نانوذرات با دارا بودن خواص فیزیکوشیمیایی خاص می‌توانند برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را تحت تأثیر قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: اکسید روی، اکسیدهای فلزی، ظرفیت تبادل کاتیونی، ماده آلی، نانو ذرات

مقدمه

خاک از منابع اصلی تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود. لذا، حفظ سلامتی و حاصلخیزی آن برای تولید پایدار غذا اهمیت زیادی دارد. میزان عناصر غذایی و رطوبت موجود در خاک همیشه باید در حد مطلوب بوده و میزان مواد آلاینده (سموم، فلزات سنگین و غیره) به حداقل ممکن کاهش یابد. در این راستا، فناوری نانو در کشاورزی می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های نوید بخش، کمک شایانی به بهبود ویژگی‌های خاک و افزایش قابل توجه محصول نماید (Servin *et al.*, 2015). فناوری نانو یکی از جدیدترین فناوری‌های موجود است که به علت پتانسیل بالا و ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن در تمام زمینه‌های علوم و تحقیقات از جمله منابع طبیعی و حفاظت خاک کاربرد دارد (Boroghani *et al.*, 2014). استفاده از این فناوری در زمینه کشاورزی منافع زیادی را با ارائه پتانسیل بالا برای افزایش قابل ملاحظه بهره‌وری کشاورزی با هزینه و ضایعات کمتر ایجاد کرده است (Kah, 2015). اخیراً استفاده از نانو ذرات به‌صورت اصلاح‌کننده‌های کودی و هم‌چنین بهسازهای خاک‌های آلوده به عناصر شیمیایی مختلف رو به افزایش است (Zareei and Kolahchi, 2016). ذرات نانو اغلب ویژگی‌های زیستی، فیزیکی و شیمیایی خاک، ازجمله جذب و نگه‌داشت عناصر غذایی، را به‌طور

۱ و ۲- به‌ترتیب دانش آموخته کارشناسی ارشد و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان
(*- نویسنده مسئول : Email: h.bayat@basu.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.75234.1143

معنی‌داری تغییر می‌دهند (Tassi, 2012، Kim *et al.*, 2016، Mohammadi and Niazian, 2013).

نانوذرات به‌دلیل سطح ویژه بالایی که دارند موجب افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک و افزایش تخلخل خاک می‌شوند (Ben- Moshe *et al.*, 2013). ساماروجوا و همکاران (Samarajeewa *et al.*, 2017) اشاره نمودند که افزایش غلظت نانو نقره موجب افزایش pH خاک گردید. غلظت زیاد کاتیون‌ها به‌ویژه کاتیون‌های قلیایی موجب افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود (Salardini, 2009). به موجب این امر، ولایی (Valaei, 2014) دریافت که نانو ذرات اکسید آهن و منیزیم به دلیل افزایش غلظت کاتیون‌ها در محلول خاک، باعث افزایش معنی‌دار قابلیت هدایت الکتریکی خاک شدند. طاها (Taha, 2015) در پژوهش اثرات نانو مس و نانو آلومینیوم بر پتانسیل و هدایت هیدرولیکی یک خاک ترکیب شده با بنتونیت با شاخص‌های پلاستیکی متفاوت، گزارش کردند که هدایت هیدرولیکی اشباع با افزایش نانو ذرات (به جزء نمونه خاک حاوی ۰/۵ درصد وزنی نانو مس) کاهش یافت.

در میان تمامی ذرات نانو، اکسیدروی (ZnO) یکی از پرکاربردترین نانو ذرات به حساب می‌آید (Zhang *et al.*, 2007). نانو ذرات اکسیدروی با توجه به سطح ویژه بالا می‌توانند به‌عنوان عامل پیوند دهنده بین ذرات عمل کرده و با ایجاد هم‌آوری بین ذرات خاک، باعث پایداری ساختمان خاک گردند (Nanda *et al.*, 2003). بررسی‌ها نشان داده که سمیت نانوذرات به‌ویژه نانوذرات فلزی به ویژگی‌های فیزیکی ذرات از جمله اندازه، شکل، پوشش سطحی، زیست سازگاری، واکنش پذیری و روش ساخت نانوذرات بستگی دارد (Suresh *et al.*, 2013).

نانو اکسیدروی در حذف عناصر سنگین مانند کادمیوم، مس، نیکل و سرب از محلول‌های آبی (Mahdavi *et al.*, 2012)، حذف فسفات از محلول‌های آبی (Abdoli, 2015)، حذف آلودگی فسفات از آب‌های آلوده (Agha Alizadeh *et al.*, 2012) و هم‌چنین حذف نیترات از محلول‌های آب و خاک (Mahdavi *et al.*, 2018) مورد استفاده قرار گرفته است. تاکنون تأثیر نانو ذرات TiO_2، ZnO، Ag، کربن، اکسید آهن و منیزیم، فولرین و زئولیت بیشتر در خاک‌های شنی و لومی مورد تحقیق قرار گرفته است. باوجود این‌که در پژوهش‌های زیادی از نانو ذرات اکسیدروی در زمینه‌ی آلودگی فلزات سنگین در خاک، محلول‌های آبی و گیاه استفاده شده است، تأثیر یک نانو ذره بر خاک‌هایی با بافت متفاوت، کمتر گزارش شده است. بنابراین با در نظر گرفتن نقش نانو ذرات در اصلاح خاک‌ها در نقاط مختلف کشور و دنیا و هم‌چنین تأثیر این ذرات بر سلامت انسان و محیط‌زیست، بررسی اثر نانو ذرات اکسیدروی در هر سه نمونه خاک شنی، لومی و رسی ضروری به نظر می‌رسد. هم‌چنین با توجه به موارد عنوان شده ملاحظه می‌گردد که در خصوص تأثیر مواد نانو بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تحقیقات کافی صورت نگرفته است. پس با استناد به پژوهش‌هایی که تأثیر نانو ذرات اکسیدروی را بر برخی خواص خاک مورد بررسی قرار داده‌اند و با توجه به مرتبط بودن خواص خاک با یکدیگر، احتمالاً نانو ذرات بر سایر ویژگی‌های خاک تأثیر دارند که تاکنون بررسی نشده‌اند، یا بررسی اندکی در مورد آن‌ها صورت گرفته است و احتمال می‌رود که استفاده از ترکیبات نانو، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک ازجمله گنجایش تبادل کاتیونی، pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و درصد ماده آلی خاک را تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی تأثیر کاربرد نانوذرات اکسیدروی بر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌هایی با بافت متفاوت، از نظر علمی و نه لزوما اقتصادی، بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک‌ها

برای انجام این پژوهش، ۳ نمونه خاک با بافت لوم‌شنی، لوم و رسی به‌ترتیب از ۳ منطقه ملایر، عباس‌آباد و نهاوند، واقع در استان همدان تهیه گردید. چون هدف یافتن خاک‌هایی با بافت ریز، متوسط و درشت بود و همه این‌ها در یک منطقه یافت نشد، بنابراین به ناچار نمونه‌برداری از مناطق مختلف صورت گرفت. از نظر مواد مادری، خاک‌های منطقه ملایر و نهاوند به ترتیب از مواد مادری شیستی[1] با فرسایش آبی متوسط و از رسوبات آبرفتی تشکیل شده‌اند (Soil Survey staff، 1999). محل نمونه‌برداری، رده‌بندی و سایر ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

نمونه‌برداری با اطلاع از ویژگی‌های خاک منطقه، از عمق ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک و در فصل بهار انجام شد. آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در۳ تکرار و در مجموع ۳۶ نمونه آزمایشی (پس از اعمال تیمارها به نمونه‌های سه بافت خاک) طراحی گردید. فاکتورها شامل بافت خاک در ۳ سطح لوم‌شنی، لومی و رسی و درصد وزنی نانو ذرات اکسیدروی در ۴ سطح صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد بود. ۵۲۵ گرم خاک هوا خشک شده وزن شد و سپس با درصدهای وزنی مذکور از نانو ذرات اکسیدروی مخلوط گردید. مخلوط شدن خاک با نانو ذرات طی دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول خاک هوا خشک شده به چند قسمت تقسیم و به نسبت وزن هر قسمت به آن نانو ذرات اکسیدروی اضافه شد و تا به دست آوردن یک ترکیب همگن باهم مخلوط شدند. تغییر رنگ حاصل‌شده، نشان از به دست آمدن ترکیبی همگن بود.

1- Schist

جدول ۱- مشخصات محل‌های نمونه‌برداری خاک‌های مورد بررسی
Table 1- Characteristics of sampling sites of soils under consideration

	محل نمونه‌برداری Sampling location		
	ملایر Malayer	عباس آباد Abbas Abad	نهاوند Nahavand
محل نمونه‌برداری (Sampling location)	روستای مالیچه Maliche village	مزرعه عباس آباد Abbas Abad Farm	روستای کرک سفلی Kirk Sofla village
طول و عرض جغرافیایی (Latitude & Longitude)	48° 36′ 24″E 34° 15′ 2″N	48° 28′ 40″ E 34° 47′ 26″N	48 ° 17′ 14″E 34 ° 9′ 58″N
رژیم رطوبتی (Moisture regime)	Xeric	Xeric	Xeric
رژیم حرارتی (Thermal regime)	Mezic	Mezic	Mezic
رده‌بندی (Classification)	Regosols	Inceptisols	Cambisols
وضعیت کاربری (Land use)	کشت جو دیم Cultivation of barley	آیش Bayer	کشت عدس دیم Cultivation of rainfed lentils
ارتفاع از سطح دریا (متر) Height above sea level (m)	1852	1814	1652
میانگین بارش سالانه (میلی متر) Average annual rainfall (mm)	385	323	376
میانگین دمای سالانه (درجه سلسیوس) Average annual temperature (degrees Celsius)	8.5	11.3	12.5

در مرحله دوم، قسمت‌های جدا شده با هم ترکیب شد و مجددا با هم مخلوط شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌های تیمار شده، خاک‌ها به‌صورت همگن و با جرم مخصوص ظاهری مربوط به مزرعه در داخل ظروف پلاستیکی به ابعاد ۱۸ × ۵/۵ × ۸ سانتی‌متر ریخته شدند. در مجموع ۳۶ ظرف (۴ (سطح نانو ذره) × ۳ (تکرار) = ۱۲ ظرف برای هر بافت خاک) برای کل نمونه‌ها آماده گردید.

خاک‌های تیمار شده درون ظروف پلاستیکی، برای گذراندن دوره انکوباسیون ۱۲۰ روزه به‌طور متوالی با آب شهری تر و خشک شدند. بدین صورت که نمونه‌ها از بالا اشباع شدند و بعد از خشک شدن خاک تیمار شده تا حد نقطه پژمردگی دائم، دوباره خاک‌های تیمار شده اشباع می‌شدند. این اشباع شدن و خشک شدن متوالی تا پایان ۱۲۰ روز ادامه یافت. بعد از گذشت ۱۲۰ روز از شروع انکوباسیون، نمونه‌برداری از ظروف انجام شد. بر روی نمونه‌های برداشت‌شده از ظرف‌ها پس از اعمال تیمارها، ظرفیت تبادل کاتیونی، pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و درصد ماده آلی خاک اندازه‌گیری شد.

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه با استفاده از روش‌های معمول اندازه‌گیری شدند. بدین منظور بافت خاک به روش هیدرومتر (Gee and Or, 2002)، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات آمونیوم (Bower *et al.*, 1952) و کربنات کلسیم معادل خاک به روش تیتراسیون برگشتی (Page *et al.*, 1982) اندازه‌گیری شدند. هم‌چنین pH خاک با آب مقطر در عصاره ۱ به ۵ با استفاده از دستگاه pH متر (NeoMet مدل 77P) (Thomas, 1996)، و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱ به ۵ توسط دستگاه هدایت‌سنج (JENWAY مدل ۴۵۱۰) (Rhoades, 1996) اندازه‌گیری شدند. مقدار ماده آلی با روش (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد.

نانو ذرات ZnO از شرکت بازرگانی نوترینو تهران با درجه خلوص ۹۹/۹ درصد تهیه شد. به منظور بررسی دقیق ویژگی‌های نانو ذره مورد مطالعه از تکنیک‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، پراش اشعه ایکس (XRD) و تکنیک BET، در آزمایشگاه بیم گستر تهران انجام گردید. تعیین pH_{ZPC} نانوذرات اکسیدروی با استفاده از روش غوطه‌وری (Fiol and Villaescusa, 2009) انجام گردید. برخی ویژگی‌های کلی نانو ذرات اکسید روی در جدول ۳ آمده است.

جدول ۲- برخی از ویژگی‌های خاک‌های مورد بررسی

Table 2- Some characteristics of soils under consideration

	واحد Unit	بافت خاک Texture		
		Sandy Loam	Loam	Clay
Sand	(%)	60.4	45.12	15.68
Clay	(%)	19.6	23.6	43.6
Silt	(%)	20	31.28	40.72
ρ_b	(g cm^{-3})	1.39	1.06	1.08
ρ_s	(g cm^{-3})	2.43	2.25	2.36
TP	(v/v %)	0.43	0.53	0.54
MWD	(mm)	0.29	1.14	0.38
سنگریزه Gravel	(%)	26.5	2.06	6.96
CEC	(cmol$_c$ kg^{-1})	21.13	29.30	30.59
pH	-	8.62	7.15	8.07
EC	(dS m^{-1})	0.0235	0.0625	0.1329
OM	(%)	0.34	4.71	1.34
$CaCO_3$	(%)	14.5	5	33.75

ρ_b، جرم مخصوص ظاهری ؛ ρs، جرم مخصوص حقیقی؛ TP، تخلخل کل؛ MWD، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها؛ CEC، گنجایش تبادل کاتیونی خاک؛ pH، واکنش خاک؛ EC، قابلیت هدایت الکتریکی؛ OM، ماده آلی؛ $CaCO_3$ و کربنات کلسیم معادل.

ρ_b: bulk density, TP: Total porosity, MWD: Mean weight diameter of aggregates, CEC: cation exchange capacity, pH: Potential hydrogen, EC: electrical conductivity, OM: Organic matter and $CaCO_3$: Calcium carbonate.

تجزیه وتحلیل آماری با استفاده از نرم‌افزار SAS. 9.2 انجام شد. مقایسه میانگین‌ها از طریق آزمون دانکن در سطح ۵ درصد مورد تجزیه گرفت. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، شناسایی داده‌های پرت انجام شد. نرمال بودن توزیع خطا با استفاده از آزمون‌های کولموگروف- اسمیرنوف[1] و شاپیرو- ویلک[2] (Razali and Wah, 2011) بررسی شد، که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع خطای مدل بود (داده‌ها نشان داده نشده است). برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel نسخه 2013 استفاده شد.

نتایج و بحث

برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه، در جدول ۲ آورده شده است.

گنجایش تبادل کاتیونی خاک لوم‌شنی در محدوده متوسط و برای خاک‌های لومی و رسی در محدوده بالا قرار گرفت (Metson, 1961). بر اساس pH اندازه‌گیری شده، خاک لوم‌شنی در کلاس خاک‌های کاملا قلیایی، خاک لومی در کلاس خاک‌های خنثی و خاک رسی در کلاس خاک‌های به طور متوسط قلیایی قرار گرفت (Bruce and Rayment, 1982). قابلیت هدایت الکتریکی هر سه خاک مورد مطالعه در محدوده خاک‌های با شوری کم قرار داشت. از نظر ماده آلی، خاک لوم‌شنی جزو خاک‌های با ماده آلی خیلی کم، خاک لومی دارای ماده آلی بالا و خاک رسی نیز جزو خاک‌های با ماده آلی کم محسوب شدند (Charman and Roper, 2007). همچنین خاک‌های لوم‌شنی و رسی از نظر میزان آهک در طبقه‌بندی خاک‌های آهکی و خاک لومی در محدوده آهک کم قرار گرفتند (Horneck *et al.*, 2011).

برای بررسی دقیق خصوصیات ذرات نانو از تکنیک‌های SEM (شکل ۱)، BET و XRD (شکل ۲) استفاده شده است و خصوصیات و ویژگی‌های ذرات نانو تعیین گردید.

همچنین برخی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نانو ذرات مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

همچنین بررسی‌ها نشان داد که نانو ذرات اکسیدروی دارای رنگ ظاهری سفید شیری، شکل ظاهری ذرات تقریباً کروی (Journal of Nanoparticle Research)، pH در محدوده نسبتا قلیایی، قابلیت هدایت الکتریکی بالا، سطح ویژه ۴۳/۹۳ مترمربع بر گرم، اندازه ذره ۳۰-۲۰ نانومتر، درجه خلوص ۹۹/۹ درصد و چگالی ظاهری ۶/۶۰۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب، می‌باشد.

1- Kolmogorov- Smirnov

2- Shapiro Wilk

شکل ۱- تصاویر SEM ذرات اکسید روی

Figure 1-

شکل ۲ - تصاویر XRD نانوذرات اکسید روی

Figure 2-

جدول ۳- ویژگی‌های نانو ذره مورد مطالعه

Table 3- Properties of nanoparticles under consideration

نانو ذره Nanoparticles	فرمول Formula	pH	EC (dS m^{-1})	نقطه با بار صفر Point of Zero Charge	اندازه ذرات Particle size (nm)	اندازه منافذ Pore size (nm)	سطح ویژه Specific surface area (m^2 g^{-1})	درجه خلوص Purity (٪)	تخلخل Porosity (cm^3 cm^{-3})
اکسیدروی Zinc oxide	ZnO	7.78	0.0558	7.23	20 - 30	41.41	43.93	99.9	0.45

تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر ظرفیت تبادل کاتیونی

نتایج تجزیه واریانس کلیه متغیرهای مورداستفاده در این پژوهش در جدول ۴ نشـان داده شـده است. نتایج تجزیه واریانس اطلاعات به دست آمده نشان داد که تأثیر نوع بافت خاک، سطوح کاربرد نانو ذره و هم‌چنین برهم‌کنش دو طرفه نوع بافت خاک × سطوح کاربرد نانو ذره در سـطح ۱ درصـد آمـاری بر متغیر گنجایش تبادل کاتیونی خاک

معنی‌دار شدند (جدول ۴).

مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد نانوذره بر ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نشان داد که استفاده از نانو ذرات موجب افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی در ۲ بافت خاک لومی و رسی شد، که این افزایش در خاک لومی در دو سطح ۱ و ۳ درصد و در خاک رسی در هر سه سطح ۰/۵، ۱ و ۳ درصد نسبت به شاهد معنی‌دار بود (شکل ۳- a).

نانو ذرات اکسیدروی با توجه به سطح ویژه بسیار بالا (۴۳/۹ متر مربع در گرم)، موجب افزایش تعداد گروه‌های عاملی همانند هیدروکسیل در واحد جرم (Ostan, 2004) و در نتیجه افزایش CEC خاک لومی و رسی خواهد شد. از سوی دیگر در خاک لومی نانواکسیدروی موجب افزایش pH خاک شد (شکل ۳-b). با افزایش pH به علت بارهای وابسته به pH، میزان بار منفی افزایش یافته و در نتیجه گنجایش تبادل کاتیونی خاک افزایش می‌یابد (Sparks, 2003). کنعانی زاده و همکاران (Kananizadeh *et al.*, 2011) اثر کاربرد نانو ذرات رس مونت موریلونایت را بر خاک‌های رسی منطقه کهریزک تهران مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه دست یافتند که افزودن ۴ درصد نانو رس موجب کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شده است. آن‌ها عنوان کردند که مقادیر یون‌های تک ظرفیتی و CEC در ترکیب رس‌های خاک کهریزک با ۴ درصد نانو رس، کمترین مقدار بوده و نانو رس موجب کمک به پراکنده ماندن این ترکیب شده است.

نتایج مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که در خاک لومشنی، گنجایش تبادل کاتیونی با افزایش سطوح کاربرد نانو ذرات اکسیدروی نسبت به تیمار شاهد افزایش معنی‌داری نداشت، اما در تیمار ۱ درصد وزنی کمترین مقدار بود و با تیمار شاهد تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) داشت. مواد آلی و جزء رس خاک از منابع اصلی بار منفی خاک به شمار می‌روند (Sparks, 2003). به همین علت، در خاک لومشنی چون میزان رس و ماده آلی کم‌تر است، بنابراین میزان تغییرات ظرفیت تبادل کاتیونی خاک نسبت به خاک‌های لومی و رسی کمتر می‌باشد (Mirkhani *et al.*, 2005). مواد آلی اهمیت فراوانی در افزایش گنجایش تبادل کاتیونی خاک دارند. تیمار نانو اکسیدروی موجب کاهش مقدار ماده آلی (معنی‌دار در هر سه سطح نانوذره نسبت به شاهد) و pH (معنی دار در سطوح ۱ و ۳ درصد نانوذره نسبت به شاهد) خاک لومشنی (شکل ۴ و شکل ۳- b) شد. به همین علت در این خاک افزودن نانو ذره موجب کاهش گنجایش تبادل کاتیونی شد.

در تمامی سطوح کاربرد نانو ذره (صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد) گنجایش تبادل کاتیونی خاک‌های لومی و رسی تقریباً نزدیک به هم بودند و نسبت به خاک لومشنی از میزان بالاتری برخوردار بودند. میزان pH و ماده آلی خاک‌های لومی و رسی نسبت به خاک شنی بالاتر بوده و به‌تبع آن گنجایش تبادل کاتیونی بالاتری نیز نسبت به خاک لومشنی دارند. با افزایش درصد رس، مواد آلی و pH، میزان بارهای منفی کلوییدهای خاک افزایش یافته و در نتیجه میزان گنجایش تبادل کاتیونی خاک نیز افزایش پیدا می‌کند (Mirkhani *et al.*, 2005).

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر تیمارها بر گنجایش تبادل کاتیونی، pH، قابلیت هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و مقدار ماده آلی خاک

Table 4- Results of variance analysis of effects of treatments on cation exchange capacity, pH, electrical conductivity, calcium carbonate and organic matter

منابع تغییرات Source of variations	درجه آزادی Degree of freedom	CEC	pH	EC	$CaCO_3$	OM
		P-value				
بافت خاک (Soil texture)	2	< 0.0001	< 0.0001	<0.0001	< 0.0001	< 0.0001
سطوح کاربرد نانو ذره (Nanoparticle application levels)	3	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.1399	< 0.0001
نوع بافت × سطح کاربرد نانو ذره (Texture × Nanoparticle application levels)	6	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
ضریب تغییرات Coefficient of variation	-	2.4311	0.1479	3.9205	6.5128	2.6913

CEC: گنجایش تبادل کاتیونی خاک؛ pH: واکنش خاک؛ EC: قابلیت هدایت الکتریکی خاک؛ $CaCO_3$: کربنات کلسیم معادل خاک و OM: مقدار ماده آلی خاک.

CEC: cation exchange capacity, pH: Potential hydrogen, EC: electrical conductivity, $CaCO_3$: Calcium carbonate and OM: organic matter.

شکل ۳- اثر متقابل نوع بافت خاک و سطوح کاربرد نانو ذرات اکسیدروی (ZnO) بر (a) گنجایش تبادل کاتیونی، (b) pH، (c) قابلیت هدایت الکتریکی و (d) درصد کربنات کلسیم معادل خاک

در هر شکل وجود حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آماری آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد داده‌ها است.

Figure 3- Interaction effect of type of soil texture and application levels of zinc oxide nanoparticles on (a) soil cation exchange capacity (b) Potential hydrogen (c) electrical conductivity and (d) Percentage of soil calcium carbonate

Similar letters on the columns indicate no significant difference at $P < 0.05$ based on Duncan's multiple mean comparison. The vertical line on bars shows the data's standard deviation.

نقطه با بار صـــفر[1] عدد یا نقطه‌ای از pH بوده که در آن مجموع بارهای الکتریکی برابر صـفر می‌باشـد. چنانچه pH اندازه‌گیری شـده تیمار کمتر از نقطه با بارصفر باشد، سطح دارای خالص بار مثبت و اگر بزرگتر باشـد سـطح دارای خالص بار منفی می‌باشـد (Essington, 2003، Mahdavi *et al*., 2015). تیمارهای نانو اکسیدروی در خاک لومی و رسـی به ترتیب با داشتن pH حدود (۷/۹ – ۸/۱۷) و (۷/۹ – ۸/۰۸) که بیش‌تر از pH نقطه با بار صـــفر نانو اکســـیدروی (۷/۲۳= PZC) است، خالص بار سطح را منفی کرده و موجب افزایش گنجایش تبادل کاتیونی در ســـطوح مختلف این خاک‌ها شـــده اســـت. در pH بیش‌تر از نقطه صفر بارالکتریکی (PZC)، سطوح جذب کننده به دلیل تفکیک گروه‌های عاملی سطحی، دارای بار منفی شده و باعث افزایش جذب کاتیون‌ها می‌گردند (Liang *et al*., 2005).

1- Point of Zero Charge

از نظر مقایسه، در سطح صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد مقدار CEC در خاک‌های لومی و رسی به‌طورمعنی‌داری بیش‌تر از خاک لوم‌شنی و در خاک رسی نیز در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد به طور معنی‌داری بیش‌تر از خاک لومی بود. دلیل این امر را می‌توان به مقدار بالای ماده آلی در خاک‌های لومی و رسی نسبت به خاک شنی و هم‌چنین مقادیر بالای درصد رس در خاک رسی نسبت به دو خاک دیگر و تجمع بارهای منفی در این خاک نسبت داد. ولی در سطح صفر و ۳ درصد، تفاوت معنی‌داری بین CEC خاک رسی و لومی مشاهده نشد. یعنی افزایش نانوذرات در سطوح ۰/۵ و ۱ درصد در خاک رسی در افزایش CEC نسبت به سطح ۳ درصد مؤثرتر بوده است. نتایج این پژوهش نشان از این داشت که افزودن نانو ذرات به خاک موجب افزایش معنی‌دار گنجایش تبادل کاتیونی خاک در بعضی سطوح بافت‌ها شده‌است که مطابق یافته‌های بن و همکاران (Ben- Moshe *et al.*, 2013) و بیات و همکاران (Bayat *et al.*, 2019) می‌باشد.

تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر pH خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع بافت خاک، سطوح کاربرد نانو ذره و هم‌چنین برهم‌کنش دو طرفه نوع بافت خاک × سطوح کاربرد نانو ذره در سطح ۱ درصد آماری بر pH خاک معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد نانو ذره بر pH خاک نشان داد که استفاده از نانو ذرات در سطح ۳ درصد در بافت لوم شنی و در سطح ۱ و ۳ درصد در بافت رسی موجب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) pH خاک شد، ولی در خاک لومی همه سطوح کاربرد نانو ذره موجب افزایش معنی دار ($P < 0.05$) pH خاک نسبت به شاهد شدند، که تفاوت بین همه آن‌ها نیز با همدیگر معنی‌دار ($P < 0.05$) بود (شکل ۳- b).

کاربرد نانو ذرات مهندسی شده، با افزایش انتشار یون‌ها درخاک، pH خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Conway and Keller, 2016). Lal (2008) گزارش کرد که با استفاده از مواد نانو، pH و حاصلخیزی خاک افزایش یافته و ساختار فیزیکی خاک بهبود یافت. جیمبرت و همکاران (Gimbert *et al.*, 2007) بیان کردند که تجمع نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم در محلول خاک همبستگی منفی با ویژگی‌های خاک ازجمله ماده آلی محلول و مقدار رس و همبستگی مثبت با قدرت یونی، پتانسیل زتا و pH خاک دارد.

با کوچک شدن ذرات در اندازه نانو بر میزان حلالیت ذرات افزوده شده و به همین دلیل میزان عنصر روی در محلول خاک افزایش می‌یابد. با توجه به پتانسیل یونی متوسط نانو ذرات روی، این ذرات هیدرولیز شده و موجب رسوب هیدروکسید روی در محلول خاک، آزاد شدن پروتون در محلول خاک و در نهایت کاهش pH خاک و ایجاد شرایط اسیدی می‌گردند (Bohn *et al.*, 2002). به‌همین علت در خاک لوم‌شنی و رسی در سطوح ذکر شده استفاده از نانو ذره اکسیدروی باعث کاهش pH گردید. از سوی دیگر تغییرات ماده آلی خاک می‌تواند موجب کاهش یا افزایش pH خاک شود. این عمل مربوط به تکامل مواد آلی و سطح تجزیه آن‌ها می‌باشد. مولکول‌های آلی توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه می‌شوند و سبب تولید CO_2، اسیدهای آلی و انتشار اولیه آمونیاک می‌شوند که موجب کاهش pH خاک می‌گردد (Moradi *et al.*, 2017).

علت افزایش pH در سطوح ۱ و ۳ درصد وزنی نانو اکسیدروی در خاک لومی احتمالاً به دلیل اثر رقت یعنی افزودن ۱ و ۳ درصد اکسید نانو و همین‌طور مصرف شدن پروتون‌های موجود در محلول خاک یا سطوح تبادلی در واکنش با نانو اکسید باشد. همچنین احتمالا یکی از دلایل افزایش pH در سطوح ۱ و ۳ درصد در خاک لومی نیز مربوط به pH خود نانو ذرات اکسیدروی (pH= ۷/۷۸) باشد که با توجه به درصدهای بیش‌تر نانوذره در سطوح ۱ و ۳ درصد موجب تأثیر بر افزایش pH شده باشد اما در نسبت‌های پایین‌تر نتوانسته تأثیر قابل توجهی داشته‌باشد. لازم به ذکر است به دلیل اینکه در اندازه‌گیری‌های انجام شده pH، انحراف استاندارد بسیار کمی وجود دارد، یعنی تکرارها بسیار به یکدیگر نزدیک هستند، تفاوت‌های در حد ۰/۰۵ واحد pH از نظر آماری معنی‌دار می‌شوند در حالیکه در عمل و واقعیت این تفاوت‌های اندک ممکن است اهمیت چندانی نداشته باشد.

بیان و همکاران (Bian *et al.*, 2011) بیان کردند که تجمع نانو ذرات ZnO وابستگی به pH را، با توجه به مقادیر گزارش شده برای نقطه بار صفر، نشان می‌دهد. با توجه به pH_{ZPC} ذرات نانو اکسیدروی و مطالب گفته شده در قسمت گنجایش تبادل کاتیونی، pH محلول خاک حاوی نانو ذرات بیش‌تر از pH نقطه صفر بار الکتریکی ذرات نانو بوده در نهایت موجب تجمع خالص بار سطح منفی (Moradi *et al.*, 2017). و افزایش جذب کاتیون‌ها و افزایش pH خاک می‌گردد (Liang *et al.*, 2005). هم‌چنین با توجه به اینکه pH خود نانو ذره (pH= ۷/۷۸) از pH_{ZPC} (PZC =۷/۲۳) بیش‌تر بوده، احتمالا به‌طور مؤثرتر موجب تجمع بار منفی و افزایش pH خاک می‌گردد.

در سطح صفر و ۰/۵ درصد مقدار pH به طور معنی‌داری به‌ترتیب خاک لوم‌شنی > رسی > لومی بود. با توجه به اینکه درصد ماده آلی در خاک لوم‌شنی > رسی > لومی می‌باشد، بنابراین تجزیه ماده آلی و تولید CO_2 در خاک لوم‌شنی کمتر شده و هم‌چنین با توجه به مقدار کمتر و تجزیه کمتر ماده آلی و تولید CO_2 کمتر (Moradi *et al.*, 2017). در خاک لوم‌شنی، شاهد افزایش pH این خاک در سطوح صفر و ۰/۵ درصد وزنی نسبت به دو خاک دیگر هستیم. اما در سطح ۱ درصد مقدار pH به طور معنی‌داری به‌ترتیب خاک لوم‌شنی > لومی > رسی بود. به علت مقادیر ناچیز محتوای ماده آلی در خاک لوم‌شنی، طبیعتا در سطح ۱ درصد نیز باید با افزایش مقدار pH در این خاک

مواجه باشیم. اما در خاک لومی با توجه به محتوای بالای ماده آلی و گنجایش تبادل کاتیونی در این سطح، افزایش pH در سطح ۱ درصد امری منطقی می‌باشد. در سطح ۳ درصد مقدار pH به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب خاک لومی > لوم‌شنی > رسی بود. علت افزایش معنی‌دار pH در سطح ۳ درصد خاک لومی نسبت به دو خاک دیگر را می‌توان به ویژگی قلیایی نانو ذرات اکسیدروی و تأثیر قابل توجه آن بر pH خاک لومی در سطح ۳ درصد نسبت به دو خاک دیگر دانست و علت افزایش pH خاک لوم‌شنی نسبت به خاک رسی در این سطح نیز به دلیل مقدار ناچیز محتوای ماده‌آلی در خاک لوم‌شنی نسبت به خاک رسی بوده‌است. هم‌چنین در مقایسه بین تمامی سطوح خاک لوم‌شنی و رسی، همان‌طور که مشاهده می‌شود خاک لوم‌شنی در تمامی سطوح از مقدار محتوای ماده آلی کمتری نسبت به خاک رسی برخوردار می‌باشد (شکل ۴) و به علت تجزیه کمتر و تولید کمتر CO_2، از کاهش کمتر pH خاک نیز برخوردار می‌باشد.

تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر بافت خاک، سطوح کاربرد نانو ذره و هم‌چنین برهم‌کنش دو طرفه نوع بافت خاک × سطوح کاربرد نانو ذره در سطح ۱ درصد آماری بر مقدار قابلیت هدایت الکتریکی خاک معنی‌دار شد (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد نانو ذره بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک نشان داد که استفاده از نانو ذرات در خاک‌های لوم‌شنی و رسی در همه سطوح کاربرد نانو ذره و در بافت لومی تنها در سطح ۳ درصد موجب افزایش معنی‌دار ($P < 0.05$) قابلیت هدایت الکتریکی نسبت به شاهد شد (شکل ۳- c).

علت افزایش قابلیت هدایت الکتریکی را می‌توان با انحلال آهک خاک به دلیل شرایط اسیدی ایجاد شده ناشی از هیدرولیز ذرات Zn در محلول خاک مرتبط دانست، که موجب افزایش شوری خاک می‌گردد (Bohn *et al.*, 2002) و با توجه به کاهش pH در بعضی از سطح‌های خاک‌های لوم‌شنی و رسی، مورد پذیرش می‌باشد. هم‌چنین ماده آلی خاک دارای بار وابسته به pH می‌باشد که با افزایش اسیدیته خاک، خالص بار الکتریکی منفی خاک زیاد شده و قابلیت هدایت الکتریکی خاک افزایش می‌یابد (Ostan, 2004). با توجه به مقدار بالای pH خاک برای تیمار ۳ درصد وزنی خاک لومی (شکل ۳-b)، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی برای خاک لومی مورد قبول می‌باشد. هم‌چنین با توجه به قابلیت هدایت الکتریکی نانو ذره اکسیدروی (EC= ۰/۰۵۵۸ dS/m)، یکی از دلایل افزایش مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در هر سه خاک می‌تواند مربوط به تأثیر قابلیت هدایت الکتریکی خود نانو ذره باشد که در خاک لومی این تأثیر بیش‌تر بوده‌است. ولایی (Valaei, 2014) نیز گزارش کرد که افزودن تیمار نانو ذرات به خاک به دلیل افزایش غلظت کاتیون‌ها در محلول خاک، باعث افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک می‌شود.

در تمامی سطوح صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در خاک لومی به طورمعنی‌داری بیش‌تر از خاک رسی و در خاک رسی نیز بیش‌تر از خاک لوم شنی (بجز سطح ۰/۵ درصد) می‌باشد. در سطوح صفر و ۰/۵ درصد مقدار pH خاک لومی به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های لوم‌شنی و رسی بود و با توجه به خاصیت اسیدی خاک لومی در سطوح صفر و ۰/۵ درصد و با توجه به انحلال بیش‌تر آهک در این سطوح، شاهد افزایش معنی‌دار مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در خاک لومی نسبت به دو خاک دیگر بودیم. هم‌چنین محتوای ماده آلی در تمامی سطوح نانو ذره به طور معنی‌داری به‌ترتیب خاک لومی> رسی > لوم‌شنی بود.

تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر درصد کربنات کلسیم معادل خاک

نتایج تجزیه واریانس‌ها نشان داد که تأثیر بافت خاک و هم‌چنین برهم‌کنش دو طرفه بافت خاک و سطوح کاربرد نانو ذره در سطح ۱ درصد آماری بر درصد کربنات کلسیم معادل خاک معنی‌دار شد. اما تأثیر سطوح کاربرد نانو ذره به تنهایی بر این متغیر اثر معنی‌داری در سطح ۵ درصد آماری نداشت (جدول ۱). مقایسه میانگین اثر سطوح مختلف کاربرد نانو ذره بر کربنات کلسیم خاک نشان داد که تنها استفاده ۳ درصد از نانو ذرات موجب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) مقدار کربنات کلسیم معادل در خاک رسی شد، ولی هیچ‌کدام از سطوح نانو ذره تأثیر معنی‌داری ($P < 0.05$) بر مقدار این متغیر در خاک لوم‌شنی و لومی نداشتند (شکل ۳- d).

علت عدم تغییر میزان کربنات کلسیم معادل در خاک‌های لوم‌شنی و لومی احتمالا می‌تواند مرتبط با شرایط نگه‌داری نمونه‌ها در طی بازه زمانی دوره خشک و مرطوب شدن متناوب بوده باشد. در بازه زمانی مشخص شده به این علت که هیچ ورودی یا خروجی کربنات کلسیم به ظروف حاوی خاکهای تیمار شده رخ نداده است، بنابراین عدم تغییر این متغیر امری بدیهی و منطقی می‌باشد.

از طرف دیگر، کربنات کلسیم جزو نمک‌های معکوس است به این معنی که با افزایش دما و هم‌چنین با افزایش pH مقدار آن کاهش پیدا می‌کند و بالعکس (Lindsay, 1979). از این رو، احتمالا علت کاهش کربنات کلسیم معادل در خاک رسی در تیمار ۳ درصد نانو اکسیدروی کاهش pH این خاک باشد، که منجر به افزایش حلالیت کربنات کلسیم و در نهایت کاهش مقدار آن در خاک می‌گردد. یعنی با کاهش pH و اسیدی شدن محلول خاک، مقادیر کاتیون‌های تبادلی کلسیم و منیزیم خاک کاهش پیدا می‌کند (Sparks, 2003). کاهش pH خاک به سبب ماهیت اسیدی خاک رسی در تیمار ۳ درصد وزنی (شکل ۳- b)، موجب انحلال کربنات کلسیم معادل و رهاسازی CO_2

در محلول خاک شـــده، که این افزایش غلظت CO_2 علت کاهش pH خاک نیز به شـمار می‌رود. احتمالا علت دیگر کاهش کربنات کلسـیم میتواند مربوط به اثر رقت (مخلوط کردن خاک با ذرات نانو) بوده باشد، که البته با توجه به نسـبت‌های پایین به کار رفته از نانو ذرات در این پژوهش، این دلیل از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشـد. این یافته‌ها با نتایج ولایی (Valaei, 2014) مطابقت داشت.

در تمامی سـطوح صـفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد، مقدار کربنات کلسیم خاک به‌طور معنی‌داری به‌ترتیب، رسـی > لوم شـنی > لومی بود. بنـابراین اضـافـه کردن نانو ذرات تاثیر قابل توجهی بر روند کربنات کلسـیم موجود در خاک‌ها نداشـته اسـت. در سـه خاک مورد نظر در تمامی سـطوح مقدار کربنات کلسـیم کم شـده و یا تفاوت معنی‌داری نداشـتند که با توجه به بسته بودن سیستم در طی دوره انکوباسیون و این‌کـه هیچ‌گونه تعامل کربنات کلسـیم با محیط بیرون وجود ندارد، بدون تغییر بودن و یا کاهش اندک آن امری بدیهی می‌باشد.

تأثیر نانو ذرات اکسیدروی بر مقدار ماده آلی خاک

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر بافت خاک، سطوح کـاربرد نـانو ذره و هم‌چنین برهم‌کنش دو طرفـه نوع بـافت خاک و سـطوح کاربرد در سـطح ۱ درصـد آماری بر متغیر ماده آلی خاک معنی‌دار شـد (جدول ۱). نتایج مقایسـه میانگین اثر سـطوح مختلف کاربرد نانو ذره بر محتوای ماده آلی خاک نشان داد که در خاک لومی، همه سطوح نانو ذرات، موجب کاهش معنی‌دار ($P < 0.05$) مقدار ماده آلی خاک نسـبت به شاهد شد. در خاک رسی تفاوت معنی‌داری ($P < 0.05$) بین سـطوح مختلف کاربرد نانو ذره نسبت به تیمار شاهد وجود نداشـت (شـکل ۴). در خاک لوم‌شـنی نیز روند خاصـی مشاهده نشد. علت عدم تأثیر معنی‌دار نانو ذرات اکسـیدروی بر میزان ماده آلی در برخی از سـطوح را می‌توان به حفظ تیمارها در شـرایط نگه‌داری آزمایش ربط داد، چرا که تیمارها در معرض حداقل نور و هوا قرار گرفتند. این یافته‌ها با نتایج بن و همکاران Ben- Moshe *et al.*, (2013) و ولایی (Valaei, 2014) مطابقت داشت.

نتایج این پژوهش نشـان داد که با افزودن نانو ذره، ماده آلی در خاک کاهش می‌یابد که بر خلاف یافته‌های محققان دیگر می‌باشد که احتمالا می‌توان علت آن را به دوره تر و خشـک شـدن خاک در بازه زمانی مشخص و اکسید شدن ماده آلی توسط موجودات زنده ربط داد که موجب افزایش شرایط اکسیداسیون و احیا و در نتیجه کاهش ماده آلی در خاک می‌شـود (Fierer and Schimel, 2001، Wu and Brookes, 2005).

شکل ۴- اثر متقابل نوع بافت خاک و سطوح کاربرد نانو ذرات اکسید روی (ZnO) بر درصد ماده آلی خاک

حروف مشابه بر روی هر یک از ستون‌ها نشان‌دهنده عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد آزمون دانکن می‌باشد. خطوط عمودی بر روی هر ستون نشان‌دهنده انحراف استاندارد داده‌ها است.

Figure 4- Interaction effect of type of soil texture and application levels of zinc oxide nanoparticles on percentage of soil organic matter

Similar letters on the columns indicate no significant difference at $P < 0.05$ based on Duncan's multiple mean comparison. The vertical line on bars shows the data's standard deviation.

ولی چون خاک رسی در دوره خشک شدن هم تهویه کمی داشته، احتمالا اکسیداسیون و احیا در آن کم بوده و کاهش معنی‌دار ماده آلی هم در آن مشاهده نشد و تغییرات ماده آلی معنی‌دار نبود. از طرفی دیگر، ماده آلی هنگامی افزایش می‌یابد که گیاه و موجود فتوسنتز کننده‌ای در خاک وجود داشته باشد (Rasse *et al.*, 2005)، در حالی که در هیچ یک از خاک‌های مورد مطالعه، گیاه و موجود فتوسنتز کننده‌ای وجود نداشته تا منبعی برای افزایش محتوای ماده آلی خاک باشد. هم‌چنین یکی دیگر از علت‌های این کاهش می‌تواند مربوط به اثر رقیق‌سازی (مخلوط شدن خاک + نانو) باشد که موجب کاهش میزان ماده آلی در خاک‌های مذکور (لوم‌شنی و لومی) شده‌است.

درتمامی سطوح صفر، ۰/۵، ۱ و ۳ درصد استفاده از نانو ذره روی، مقدار ماده آلی به طور معنی‌داری به‌ترتیب خاک لومی> رسی > لوم شنی بود. این نتیجه بدین مفهوم است که اضافه کردن نانو ذرات نتوانست تأثیری بر روند تفاوت ماده آلی موجود در خاک‌ها داشته باشد. ولایی (Valaei, 2014) طی پژوهشی برای بررسی اثرات نانو ذرات اکسیدمنیزیم و آهن بر خاک به این نتیجه دست یافت که ماده آلی خاک تحت تأثیر نانو ذرات قرار نگرفته‌است. وی دلیل این امر را نگه‌داری نمونه‌ها در شرایط حداقل نور و هوا و کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌ها عنوان کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو اکسیدروی ممکن است به عنوان یک روش مؤثر برای بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نظر گرفته بشود. بدون شک با بهره‌گیری از مزیت‌های فناوری نانو به عنوان یک فناوری پیشرفته نو ظهور در بخش کشاورزی، می‌توان به نتایج مطلوبی از جمله توسعه کشاورزی پایدار و سازگار با محیطزیست دست یافت. با برآیندی از نتایج آزمایشات می‌توان گفت افزایش نانو اکسیدروی موجب افزایش مقدار گنجایش تبادل کاتیونی و قابلیت هدایت الکتریکی خاک در بافت‌های مختلف خاک گردید که این امر به دلیل سطح ویژه بسیار بالای این ذرات و افزایش انحلال کربنات کلسیم ناشی از هیدرولیز ذرات روی در محلول خاک می‌باشد. نانو ذره روی در خاک لومی موجب افزایش pH شد. هم‌چنین کاربرد سطوح مختلف نانو اکسیدروی در خاک رسی موجب کاهش درصد کربنات کلسیم گردید اما تأثیری بر مقدار این متغیر در خاک‌های لوم‌شنی و لومی نداشت.

بدین ترتیب باتوجه به تأثیر مثبت نانو اکسیدروی بر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در بافت‌های مختلف، انتخاب بهینه‌ترین سطح نانو اکسید روی باید به گونه‌ای باشد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد. که این امر نیازمند مطالعات بیشتری برای تعیین اثرات قابل توجه نانو ذرات بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و در شرایط متفاوت برای تعیین مقدار مطلوب نانو ذرات، به منظور جلوگیری از اثرات زیست‌محیطی است.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران و سردبیر محترم به خاطر ارئه نظرات ارزنده که موجب بهبود مقاله گردید قدردانی نمایند.

منابع

1. Abdoli M. 2015. Removal of phosphorus from aqueous solutions by bare and modified nano oxide particles (MgO, ZnO & TiO_2). Masters Thesis. Malayer College of Agriculture 124-1. (In Persian)
2. Agha Alizadeh T., Samadi K., Azizian Y., and Khodayari A. 2012. Synthesis of ZnO nanoparticles under ultrasound and evaluation of their effect on phosphate removal from contaminated waters. National Conference on Water and Wastewater Science and Engineering 1-8. (In Persian)
3. Bayat H., Kolahchi Z., Valaey S., Rastgou M., and Mahdavi S. 2019. Iron and magnesium nano-oxide effects on some physical and mechanical properties of a loamy Hypocalcic Cambisol Geoderma 335: 57-68. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.007.
4. Ben-Moshe T., Frenk S., Dror I., Minz D., and Berkowitz B. 2013. Effects of metal oxide nanoparticles on soil properties. Chemosphere 90:640-646. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.018.
5. Bian S.W., Mudunkotuwa I.A., Rupasinghe T., and Grassian V.H. 2011. Aggregation and dissolution of 4 nm ZnO nanoparticles in aqueous environments: influence of pH, ionic strength, size, and adsorption of humic acid. Langmuir 27(10): 6059-6068. https://doi.org/10.1021/la200570n.
6. Bohn H.L., Myer R.A., and O'Connor G.A. 2002. Soil chemistry. John Wiley & Sons.
7. Boroghani M., Mirnia S.K., Vahhabi J., and Ahmadi S.J. 2014. Investigation of Nanozeolite Effects on Soil Erosion Decreasing using FEL3 Rainfall Simulator. Journal of Watershed Management Research 5(9): 95-106. (In Persian)
8. Bower C.A., Reitemeier R.F., and Fireman M. 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. Soil Science 73(4): 251-262. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1952SoilS..73..251B/doi:10.1097/00010694-195204000-00001.

9. Bruce R.C., and Rayment G.E. 1982. Analytical methods and interpretations used by the Agricultural Chemistry Branch for Soil and Land Use Surveys. Queensland Department of Primary Industries. Bulletin QB8 (2004), Indooroopilly, Queensland. https://doi.org/10.4236/as.2015.610108.
10. Conway J.R., and Keller A.A. 2016. Gravity-driven transport of three engineered nanomaterials in unsaturated soils and their effects on soil pH and nutrient release. Water Research 98: 250-260. https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.021.
11. Charman P.E.V., and Roper M.M. 2007. Soil organic matter. In 'Soils – their properties and management'. 3rd edn. (Eds P. E. V. Charman and B. W. Murphy.)pp. 276–285. (Oxford University Press: Melbourne.)
12. Essington M.E. 2015. Soil and water chemistry: an integrative approach. CRC press.
13. Fierer N., and Schimel J.P. 2002. Effects of drying–rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. Soil Biology and Biochemistry 34(6): 777-787. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00007-X.
14. Fiol N., and Villaescusa I. 2009. Determination of sorbent point zero charge: usefulness in sorption studies. Environmental Chemistry Letters 7(1): 79-84.Gee GW and Or D, 2002. Particle- Size analysis. Pp. 225-295. In: Warren AD, (ed). Methods of Soil Analysis. https://doi.org/10.1007/s10311-008-0139-0.
15. Gee GW., and Or D. 2002. Particle- Size analysis. Pp. 225-295. In: Warren AD, (ed). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America Inc. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12.
16. Gimbert L.J., Hamon R.E., Casey P.S., and Worsfold P.J. 2007. Partitioning and stability of engineered ZnO nanoparticles in soil suspensions using flow field-flow fractionation. Environmental Chemistry 4(1): 8-10. http://dx.doi.org/10.1071/EN06072.
17. Horneck D.A., Sullivan D.M., Owen J.S., and Hart J.M. 2011. Soil test interpretation guide.1-12.
18. Kah M. 2015. Nanopesticides and nanofertilizers: emerging contaminants or opportunities for risk mitigation? Frontiers in Chemistry 64(3): 1-6. https://doi.org/10.3389/fchem.2015.00064.
19. Kananizadeh N., Ebadi T., Khoshniat S.A., and Mousavirizi S.E. 2011. The positive effects of nanoclay on the hydraulic conductivity of compacted Kahrizak clay permeated with landfill leachate. Clean–Soil, Air, Water 39(7): 605-611. https://doi.org/10.1002/clen.201000298.
20. Kim J. (Ed.). 2016. Advances in Nanotechnology and the Environment. CRC Press .
21. Lal R. 2008. Promise and limitation of soils to minimize climate change. Journal of Soil and Water Conservation 63(4): 113-118. https://doi.org/10.2489/jswc.63.4.113A.
22. Liang P., Ding Q., and Song F. 2005. Application of multiwalled carbon nanotubes as solid phase extraction sorbent for preconcentration of trace copper in water samples. Journal of Separation Science 28(17): 2339-2343. https://doi.org/10.1002/jssc.200500154.
23. Lindsay W.L. 1979. Chemical equilibria in soils: John Wiley and Sons Ltd.
24. Mahdavi S., Jalali M., and Afkhami A. 2012. Removal of heavy metals from aqueous solutions using Fe3O4, ZnO, and CuO nanoparticles. In Nanotechnology for Sustainable Development (pp. 171-188). Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/s11051-012-0846-0.
25. Mahdavi S., Afkhami A., and Merrikhpour H. 2015. Modified ZnO nanoparticles with new modifiers for the removal of heavy metals in water. Clean Technologies and Environmental Policy 17(6): 1645-1661. https://doi.org/10.1007/s10098-015-0898-9.
26. Mahdavi S., Molodi P., and Zarabi M. 2018. Utilization of bare MgO, CeO_2, and ZnO nanoparticles for nitrate removal from aqueous solution. Environmental Progress & Sustainable Energy 37(6) :1908-1917. https://doi.org/10.1002/ep.12865.
27. Metson A.J. 1961. Methods of chemical analysis for soil survey samples. Soil Bureau Bulletin No. 12, New Zealand Department of Scientific and Industrial Research pp. 168–175. (Government Printer: Wellington, New Zealand.). https://doi.org/10.2134/agronj1957.00021962004900040024x.
28. Mirkhani R., and Saadat S. 2005. Using Particle Size Distribution and Organic Carbon Percentage to Predict the Cation Exchange Capacity of Soils of Lorestan Province 19(2): 235-242.
29. Mohammadi M., and Niazian M. 2013. Investigation of nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay. International Journal Advance Science Technology Research 3: 37-46.
30. Moradi N,. Rasouli-Sadaghiani M.H,. and Sepehr E. 2017. The effect of type and amount of biochar on some soil properties and usability of some nutrients in a calcareous soil. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries) 31: 1246-1232. (In Persian with English abstract)
31. Nair R., Varghese S.H., Nair B.G., Maekawa T., Yoshida Y., and Kumar D.S. 2010. Nanoparticulate material delivery to plants. Plant Science 179(3): 154-163. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.04.012.
32. Nanda K.K., Maisels A., Kruis F.E., Fissan H., and Stappert S. 2003. Higher surface energy of free nanoparticles. Physical Review Letters 91(10): 106102. https://doi.org/10.1103/physrevlett.91.106102.
33. Ostan Sh. 2004. Soil chemistry with an environmental attitude. Tabriz University Press. 454-1. (In Persian)
34. Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. Chemical and microbiological properties. Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed.Agron.Monogor. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
35. Rasse D.P., Rumpel C., and Dignac M.F. 2005. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific

stabilisation. Plant and Soil 269(1-2): 341-356. https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y.
36. Razali N.M., and Wah Y.B. 2011. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. Journal of Statistical Modeling and Analytics 2(1): 21-33.
37. Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. p. 417-435. Methods of Soil Analysis. Part 3.Chemical Methods. ASA and SSSA, Madison, USA. Journal of Nanoparticle Research 2: 427-445. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14.
38. Salardini A. 2009. Soil fertility. University of Tehran Publications 430-1. (In Persian)
39. Samarajeewa A., Velicogna J., Princz J., Subasinghe R., Scroggins R., and Beaudette L. 2017. Effect of silver nano-particles on soil microbial growth, activity and community diversity in a sandy loam soil. Environmental Pollution 220: 504-513. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.094.
40. Servin A., Elmer W., Mukherjee A., De la Torre-Roche R. Hamdi H., White J.C., Bindraban P., and Dimkpa C. 2015. A review of the use of engineered nanomaterials to sup-press plant disease and enhance crop yield. Journal of Nanoparticle Research 17: 1-21. http://dx.doi.org/10.1007/s11051-015-2907-7.
41. Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making. Soil Use Manage. 8: 152-154.
42. Sparks D.L. 2003. Environmental soil chemistry. Elsevier.
43. Suresh A.K., Pelletier D.A., and Doktycz M.J. 2013. Relating nanomaterial properties and microbial toxicity. Nanoscale 5: 463-474. https://doi.org/10.1039/C2NR32447D.
44. Taha M.R., Jawad I.T., and Majeed Z.H. 2015. Treatment of Soft Soil with Nano Magnesium Oxide. 1-8.
45. Tassi E., Pini R., Gorini F., Valadão I. C.R.P., and De Castro J.A. 2012. Chemical and physical properties of soil influencing Tio2 nanoparticles availability in terrestrial ecosystems. Journal of Environmental Research and Development 6(4): 1034-1038.
46. Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. p. 475-490. In: Page, A.L., Somner, C.E. and Nelson, P.W. (Eds.). Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods. ASA and SSSA, Madison, USA. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.
47. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Digestion method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science 37(1): 29-38. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1934SoilS..37...29W/doi:10.1097/00010694-193401000-00003.
48. Wu J., and Brookes P.C. 2005. The proportional mineralization of microbial biomass and organic matter caused by air-drying and rewetting of a grassland soil. Soil Biology and Biochemistry 37(3): 507-515. http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.07.043.
49. Valaei P. S. 2014. Effect of Nanoparticles (Iron Oxide and Magnesium) on Some Soil Physical and Chemical Properties. Masters Thesis. Malayer College of Agriculture. 124-1. (In Persian with English abstract)
50. Zarei Sarabi M., and Kolahchi Z. 2016. The effect of nanoparticles on the retention and absorption coefficient of potassium. Third Conference on New Findings in the Environment and Agricultural Ecosystems. (In Persian)
51. Zhang G. 2007. Soil nanoparticles and their influence on engineering properties of soils. In Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior 173: 1-13. https://doi.org/10.1061/40917(236)37.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 393-405

The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil

P. Kabiri Samani[1*], M.H. Salehi[2], H. Motaghian[3]

Received: 16-03-2022
Revised: 14-06-2022
Accepted: 30-07-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Kabiri Samani P., Salehi M.H., and Motaghian H. 2022. The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil. Journal of Water and Soil 36(3): 393-405. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.75590.1145

Introduction

In addition to the minerals, weathering in soil which depends on soil forming factors and processes, plants rhizosphere release components which affect soil minerals and finally their weathering. If the soil is polluted by heavy metals, root exudates will be influenced resulting in decreasing microbial activity. Many studies showed minerals weathering in rhizospheric medium for both natural soils and pure clay minerals but information about the effect of pollution of rhizosphere on clay minerals weathering is limited. This study was conducted to investigate the effect of cadmium pollution on the transformation of clay minerals in wheat rhizosphere in a dominant soil of Shahrekord plain (Chaharmahal soil series).

Materials and methods

Soil samples were collected from 0-20 cm depth of Chaharmahal soil series based on the 1:50,000 scale soil map. A factorial experiment as completely randomized design with three replications and three cadmium levels (0, 5, and 10 mg kg^{-1} from cadmium) was performed in two environments including bulk soil and rhizospheric soil (18 samples in total) in greenhouse conditions for 16 weeks. Necessary care was taken during the growth period and the soil moisture was kept constant at the field capacity. At harvest time, the rhizosphere soil was separated from bulk soil. Then, the soil samples were air dried and passed through a 2 mm sieve. The mineralogy was examined by X-ray diffraction (XRD) in the studied soil after plant harvest (including rhizospheric soil and bulk soil) in unpolluted samples. Then, results were compared with minerals in polluted rhizosphere media. Dissolved organic carbon (DOC) and pH in the rhizosphere and bulk soils were also determined.

Results and Discussion

The results showed that the effect of contamination on soil pH was not significant but the pH value in rhizosphere soil was significantly lower than the bulk soil. The average pH in the soil was 7.8 and in the rhizosphere reduced to 7.5. The interaction of medium (rhizosphere and bulk soil) and contamination on the amount of dissolved organic carbon was significant ($p < 0.01$). The amount of dissolved organic carbon in the rhizosphere at 170.6 mg Kg^{-1} was significantly higher than the bulk soil (104.6 mg kg^{-1}), which could be due to root secretions. In the rhizosphere, increasing the contamination level to 5 mg kg^{-1} decreased by 19% and contamination of 10 mg kg^{-1} caused a 21% decrease in dissolved organic carbon. The amount of dissolved organic carbon in the rhizosphere was 39% higher than the bulk soil. The average of dissolved organic carbon in the rhizosphere and bulk soil was 170.6 and 104.6 mg kg^{-1}, respectively. Based on mineralogical results, mica, smectite, chlorite, kaolinite and palygorskite minerals were detected in the bulk soil. Comparison of clay minerals samples in the bulk soil and rhizosphere showed that the trioctahedral chlorite transformed to hydroxy-interlayer vermiculite (HIV) in the rhizosphere soil. The presence of HIV was identified by an increase in the intensity ratio of the 10 and 14 angstrom peaks after K-saturation. In rhizospheric soils, the intensity of the 14

1, 2 and 3- Ph.D. Student, Professor and Associate Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: parisak69@yahoo.com)

angstrom peak decreases in K-550ºC treatment. Furthermore, in the rhizospheric soils, a clear increase in the intensity of the 10 angstrom peak was observed from K-air dried to K-550ºC treatments which can be related to the presence of HIV which can be attributed to the changing conditions of the rhizosphere, including reducing pH and increasing the dissolved organic carbon and the activity of microorganisms. Comparison of diffractograms for clay fraction of rhizospheric soil with different contamination levels after cultivation showed that the type of minerals in contaminated levels was similar to non-contaminated conditions, but the amount of trioctahedral chlorite was the highest in higher contaminated soil. The peak intensity of 14 angstrom in potassium saturated sample heated at 550°C was lower in non-contaminated soil. Also, at the level of 10 mg kg^{-1} cadmium contamination, the chlorite peak had the highest intensity which indicates less chlorite was transformed to HIV in the contaminated soils.

Conclusions

The results showed that DOC in the rhizosphere soil was significantly higher than the bulk soil, whereas pH significantly decreased in the rhizosphere soil compared to the bulk soil. In both the rhizosphere and the bulk soils, increasing the contamination caused a decreasing trend in dissolved organic carbon. Mineralogical results of the rhizospheric and the bulk soils showed that trioctahedral chlorite was transformed to hydroxy-interlayer vermiculite (HIV). In addition, rhizosphere contamination reduced the chlorite transformation. The results suggest that soil contamination with a negative impact on plant activity and soil could even prevent the availability of nutrients from the clay minerals structure.

Keywords: Cadmium, Clay mineral, Contamination, Rhizosphere, Wheat

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص ۴۰۵-۳۹۳

تأثیر آلودگی به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی در خاک ریزوسفری گندم

پریسا کبیری سامانی[۱*]- محمدحسن صالحی[۲]- حمیدرضا متقیان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۵/۰۸

چکیده

ریزوسفر گیاهان، باعث رهاسازی عناصر از کانی‌های خاک، تغییر و تبدیل کانی‌ها می‌شود. در این مطالعه تأثیر ریزوسفر گندم و نیز آلودگی آن به کادمیم (مقادیر صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) برتغییر و تحول کانی‌های رسی موجود در خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهارمحال) بررسی شده است. پژوهش به مدت ۱۶ هفته در شرایط گلخانه، در دو محیط ریزوسفر و توده خاک به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار (در مجموع ۱۸ نمونه) اجرا گردید. بعد از برداشت گیاه، ابتدا کانی‌های رسی موجود در خاک ریزوسفری غیرآلوده با توده گندم غیر آلوده و سپس، ریزوسفر آلوده با محیط ریزوسفر غیرآلوده مقایسه شدند. نتایج نشان داد که pH در خاک‌های ریزوسفری نسبت به توده خاک کاهش معنی‌داری یافت و کربن‌آلی محلول در خاک‌های ریزوسفری گندم نیز، به طور معنی‌داری بیشتر از توده خاک بود. همچنین، در خاک‌های آلوده (توده و ریزوسفر)، مقدار کربن‌آلی محلول به طور معنی‌داری کمتر از خاک‌های غیرآلوده بود. این نتایج، نشان‌دهنده فعالیت بیشتر موجودات زنده در محیط ریزوسفر و تأثیر منفی آلودگی بر آن بود. نتایج کانی‌شناسی نشان داد کانی حدواسط ورمی‌کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای (HIV) از تبدیل کانی کلریت سه‌جایی در محیط ریزوسفر تشکیل شده است ولی با افزایش آلودگی، شدت هوادیدگی کانی کلریت و نیز تبدیل آن به HIV کاهش می‌یابد. بنابراین، آلودگی خاک با تأثیر منفی بر فعالیت گیاهان و سایر موجودات زنده خاک، حتی می‌تواند مانع از دسترس قرار گرفتن عناصر غذایی موجود در ساختار کانی‌های خاک گردد.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، ریزوسفر، کانی‌رسی، کادمیم، گندم

مقدمه

ریزوسفر به‌عنوان ناحیه دربرگیرنده ریشه‌های فعال بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی خاک مؤثر می‌باشد، که در آن تغییراتی مانند اسیدی‌شدن، افزایش مقدار مواد آلی، تغییر در فعالیت و زیست توده ریزجانداران اتفاق می‌افتد. این ویژگی‌های متفاوت ریزوسفر، برجذب عناصر به‌وسیله گیاهان مؤثر هستند (Khademi *et al*., 2008).

هوادیدگی کانی‌ها فرآیندی است که منجر به عرضه عناصر غذایی پر نیاز مانند کلسیم، منیزیم، پتاسیم، گوگرد و برخی عناصر غذایی کم نیاز می‌گردد (Birkeland, 1990). هوادیدگی کانی‌ها در ریزوسفر می‌تواند با یکسری فرآیندها مثل آزادسازی یون هیدروژن، دی‌اکسید کربن و ترشحات اسیدهای آلی مرتبط باشد (Wallander, 2000). مطالعات مختلفی اثر فرآیندهای بیولوژیکی و مواد مترشحه از ریشه گیاهان و قارچ‌ها را برروی هوادیدگی کانی‌ها در ناحیه ریزوسفر بیان کرده‌اند (Hinsinger and Htzpatrick and Roux, 1979; Jaillard, 1993; Khayyamim *et al*., 2010; Khormali *et al*., 2015; Martin and Sparks, 1985; Rezainejad *et al*., 2020; Rezainejad *et al*., 2021; Salehi and Tahamtani, 2012). برخی از این مطالعات روی رس‌های خالص و برخی از آن‌ها روی رس‌های موجود در خاک انجام شده‌اند.

صالحی و تهمتنی (Salehi and Tahamtani, 2012) تأثیر ریزوسفر دو گیاه گندم و یولاف را بر تغییر و تبدیل کانی پالیگورسکیت خالص مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان‌دهنده عدم تشکیل کانی جدید از هوادیدگی پالیگورسکیت در محیط ریزوسفر این دو گیاه بود. اگر چه وجود منیزیم در بافت گیاهان تغذیه شده با محلول غذایی بدون منیزیم، دلیلی بر تخریب ساختمان پالیگورسکیت تحت تأثیر ریزوسفر این گیاهان بود. همچنین کاهش شدت نقطه فراز

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک و ارزیابی اراضی، استاد و دانشیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد
(*- نویسنده مسئول: Email: parisak69@yahoo.com)
DOI: 10.22067/jsw.2022.75590.1145

۱۰/۵ آنگستروم مربوط به این کانی در محیط‌هایی که منبع منیزیم گیاه فقط کانی پالیگورسکیت بود و تغذیه با محلول غذایی بدون منیزیم انجام شد نسبت به محیط‌های تغذیه شده با محلول غذایی کامل بیشتر بود. رضایی‌نژاد و همکاران (Rezainejad *et al*., 2020) تبدیل کانی فلوگوپیت به ورمی‌کولیت را به دلیل جذب پتاسیم توسط ریشه گیاه جو گزارش کردند. در این مطالعه، نرخ تبدیل فلوگوپیت به ورمی‌کولیت با مقدار فلوگوپیت اضافه شده همبستگی معکوس و با سطح تنش خشکی اعمال شده همبستگی منفی داشت. نتایج آن‌ها نشان داد تنش خشکی به طور چشم‌گیری سرعت آزاد شدن پتاسیم از مواد معدنی و سرعت هوازدگی بیولوژیکی آن را کاهش می‌دهد. نوروزی و خادمی (Norouzi and Khademi, 2007) توانایی ریشه‌های گیاه یونجه در تغییر کانی‌های میکایی فلوگوپیت، بیوتیت و موسکویت همراه با آزاد شدن بین لایه‌ای و ورمی‌کولیتی شدن میکا در ریزوسفر این گیاه را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که یونجه قادر به آزاد سازی پتاسیم بین لایه‌ای از فلوگوپیت و بیوتیت در طول دوره کشت بوده و پتاسیم آزاد شده بخش قابل توجهی از نیاز گیاه را تأمین می‌کند.

رضایی (Rezaei, 2010) در مطالعات کانی‌شناسی که روی بخش رس و سیلت خاک‌ها در چهار رده اریدی‌سول، آلفی‌سول، اینسپتی‌سول و مالی‌سول در استان گلستان به منظور بررسی تأثیر ریزوسفر گیاه بر هوادیدگی کانی‌ها انجام داد گزارش نمود که در چهار رده‌ی خاک مطالعه شده با کشت گیاه ذرت تحت تأثیر ترشحات و اسیدی شدن محیط ریشه، هوادیدگی کانی‌ها صورت گرفته است و در هر چهار رده‌ی خاک بعد از گذشت یک فصل زراعی در بخش سیلت، کانی‌های کلریت، میکا و حتی پلاژیوکلاز حذف گردیده‌اند. همچنین در بسترهای حاوی رس، کانی حدواسط میکا- ورمی‌کولیت تشکیل شده است. شاهرخ و همکاران (Shahrokh *et al*., 2020) در مطالعه برروی تغییر کانی‌های رسی در خاک زیر کشت پرتقال دریافتند کاهش مقدار کانی ایلیت و افزایش کانی‌های اسمکتیت و مختلط ایلیت- اسمکتیت در ارتباط با افزایش سن باغ‌های مورد مطالعه است. شاهرخ و همکاران (Shahrokh *et al*., 2020) تشکیل کائولینیت از پالیگورسکیت را در ریزوسفر درختان مرکبات مناطق نیمه خشک گزارش کردند. حسینی‌فرد (Hosseinifard, 2010) تأثیر کشت و سن باغات پسته را روی تغییرات ویژگی‌های خاک بررسی کرد. بررسی تغییرات کانی‌شناسی بیانگر تبدیل کانی پالیگورسکیت به اسمکتیت، کاهش مقدار کانی ایلیت و افزایش کانی اسمکتیت بر اثر خروج پتاسیم از فضای بین لایه‌ای ناشی از فعالیت ریشه گیاهان و جذب پتاسیم بود. مصلح و همکاران (Mosleh *et al*., 2013) تأثیر کشت گیاه بابونه آلمانی و کاربرد کود دامی بر تغییر و تحولات کانی‌های بخش رس و سیلت خاک‌های مختلف در دشت شهرکرد استان چهارمحال و بختیاری را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که در بخش رس کانی تری‌اکتاهدرال تحت تأثیر ریزوسفر گیاه بابونه آلمانی به کانی دی‌اکتاهدرال کلریت تبدیل شد و کانی کائولینیت از محیط خاک حذف شد. همچنین، در خاک‌های تیمار شده با کود دامی، تغییر کانی‌ها، مشابه با خاک‌های بدون کود بود. روشنی (Roushani, 2010) سه نوع خاک (آلفی‌سول، ورتی‌سول و اینسپتی‌سول) که کانی غالب آن‌ها ایلیت بود را تحت کشت سورگوم قرار داد و در پایان دوره کشت تبدیل کانی ایلیت را به کانی‌های اسمکتیت، ورمی‌کولیت و کلریت در اثر جذب دائمی پتاسیم از خاک و آزاد شدن پتاسیم از بین لایه‌های ایلیت، گزارش نمود. رضایی نژاد (Rezainejad, 2022) در مطالعه روی تأثیر ریزوسفر درختان بادام وحشی وامچک در سنین مختلف بر ویژگی‌های خاک و کانی‌های رسی، ورمی‌کولیتی شدن کانی‌های رسی میکایی در ریزوسفر این درختان را گزارش کرد. نتایج نشان داد که میانگین پتاسیم قابل استفاده در خاک تحت پوشش درختان بادام وحشی وامچک بیشتر از خاک بکر و فاقد این درخت بود و با افزایش سن درخت میزان پتاسیم قابل استفاده افزایش یافت. در خاک سطحی درختان بادام با سن‌های مختلف مقدار پتاسیم غیرتبادلی نسبت به شاهد افزایش یافت، در حالی‌که در اعماق دیگر کاهش نسبت به شاهد مشاهده شد. همچنین میانگین مقادیر پتاسیم غیرتبادلی در کل خاکرخ تمام سن‌ها نسبت به خاک شاهد کاهش یافت، که این موضوع نشان دهنده‌ی آزادشدن پتاسیم غیر تبادلی درنمونه‌های خاک تحت رشد درختان بادام وحشی وامچک بود. همچنین با افزایش سن درختان و رشد ریشه پتاسیم بیشتری از خاک جذب شده و تغییرات بیشتری در کانی‌های رسی خاک گزارش شد.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که آلودگی خاک سبب کاهش فعالیت میکروبی و جمعیت میکروبی (زیست توده)، گوناگونی زیستی میکروبی، تجزیه مواد آلی و فعالیت آنزیمی خاک و به‌طور کلی تغییر شرایط ریزوسفر می‌شود (Karaca *et* Aghababaei *et al*., 2013 ; *al*., 2002; Bagheri and Mirseyed Hosseini, 2015; همچنین مطالعات در ارتباط با تأثیر ریزوسفر بر تغییر کانی‌ها، در محیط‌های غیرآلوده متمرکز بوده است (Hinsinger and Jaillard, ;Mosleh *et al*.,2013; Norouzi and Khademi, 20071993). بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر ریزوسفر گندم و آلودگی آن به کادمیم روی تغییر کانی‌های رسی خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهار محال) استان چهارمحال و بختیاری انجام شده است.

مواد و روش‌ها

نمونه خاک مورد نظر از عمق صفر تا بیست و پنج سانتی‌متری خاک غالب دشت شهرکرد (سری چهارمحال) بر اساس نقشه خاک ۱:۵۰۰۰۰ منطقه برداشت شد. آزمایش در گلخانه تحقیقاتی به منظور

بررسی تأثیر دو محیط ریزوسفر و توده خاک و نیز آلودگی آن به کادمیم بر تغییر و تبدیل کانی‌ها، با استفاده از ریزوباکس (برای جداسازی محیط ریزوسفر از توده خاک) اجرا گردید. این تحقیق براساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار و سه سطح کادمیم (صفر، ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) و در مجموع با ۱۸ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت.

مقدار ۴/۵ کیلوگرم خاک هوا خشک شده از الک ۶/۳ میلی‌متری عبور داده شد و به هر گلدان منتقل شد. برای آلوده کردن خاک به کادمیم از منبع کلرید کادمیم استفاده شد. نمونه‌ها به مدت ۳۰ روز در ظرفیت زراعی خوابانده شد. بدلیل این‌که سایر عناصر غذایی باید به مقدار کافی در اختیار گیاه باشند، به هر ریزوباکس ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم نیتروژن از منبع اوره به صورت تقسیط در سه مرحله (ابتدا، میانه و انتهای دوره رشد)، ۱۰ میلی‌گرم آهن در کیلوگرم خاک از منبع سکوسترین ۱۳۸، ۵ میلی‌گرم مس در کیلوگرم خاک از منبع سولفات مس، ۵ میلی‌گرم منگنز در کیلوگرم خاک، از منبع سولفات منگنز و ۵ میلی‌گرم در کیلوگرم روی از منبع سولفات روی اضافه شد. قبل از کشت، بذرهای گندم (*Triticum aestivum* L.) (رقم بک‌کراس روشن) با استفاده از محلول هیپوکلریت سدیم (۳٪) استریل شدند. سپس، درون آب مقطر قرار داده شدند تا در کاغذ صافی جوانه زدند. پنج بذر در هر ریزوباکس کشت و پس از دوره کوتاهی (یک هفته)، به سه گیاه کاهش داده شد. در طول مدت رشد مراقبت‌های لازم انجام و سعی شد رطوبت خاک‌ها در حد ظرفیت مزرعه (FC) ثابت بماند (جدول ۱). دمای گلخانه در روز ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد و در شب ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود. پس از پایان ۱۶ هفته کشت، خاک محیط ریزوسفری و توده به منظور آزمایشات بعدی جداسازی گردید و پس از هوا خشک کردن از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. برای تعیین کربن آلی محلول (DOC) از نسبت ۱ به ۲ خاک به آب مقطر استفاده شد، محلول صاف رویی با استفاده از فیلتر ۰/۴۵ میکرومتر صاف گردید و در عصاره تهیه شده، مقدار کربن آلی محلول با روش سوزاندن تر تعیین شد (Nelson and Sommers, 1996). کادمیم قابل استفاده در خاک با استفاده از روش DTPA-TEA تعیین شد (Lindsay and Norvell, 1978).

مطالعات کانی‌شناسی در این پژوهش برای خاک مورد مطالعه بعد از برداشت گیاه (شامل خاک ریزوسفری و توده) در بخش رس خاک به روش کیتریک و هوپ (Kittrick and Hope, 1963) انجام گردید. بخش رس خاک‌ها پس از جداسازی با هفت تیمار جداگانه، شامل اشباع با منیزیم، اشباع با پتاسیم، اشباع با منیزیم و اتیلن‌گلیکول، اشباع با منیزیم و گلیسرول به مدت یک شبانه روز، اشباع با پتاسیم و نیز اشباع با پتاسیم در دماهای ۱۱۰، ۳۳۰ و ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد هرکدام به مدت دو ساعت تهیه و سپس نمونه‌ها توسط دستگاه پراش اشعه X مدل بروکر D8 تحت زاویه 2θ، ۴ تا ۴۰ درجه برای نمونه‌های اشباع شده با کلرید منیزیم و ۴ تا ۱۵ درجه برای سایر تیمارها، مورد تجزیه قرارگرفتند و نتایج کانی‌شناسی ریزوسفر و توده خاک (غیرآلوده) و همچنین ریزوسفر آلوده و غیرآلوده مقایسه شدند.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۱ خاک به کار رفته در این پژوهش با کلاس بافتی رسی، غیر شور، آهکی و با واکنش قلیایی و غیرآلوده بوده است.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که تأثیر آلودگی بر pH خاک معنی‌دار نبوده است ولی اثر محیط (ریزوسفر و توده خاک) بر pH معنی‌دار بوده و میانگین pH کاهش معنی‌داری درخاک‌های ریزوسفری نسبت به توده خاک دارد. میانگین مقدار pH در خاک توده ۷/۸ بود و در ریزوسفر این مقدار به ۷/۵ کاهش یافت. در اغلب موارد تغییر در مقدار pH ریزوسفر به دلیل خنثی کردن بار بر اثر جذب عناصر غذایی توسط گیاه اتفاق می‌افتد. دلیل اصلی آن اتفاق عدم توازن در جذب کاتیون و آنیون به وسیله ریشه گیاهان است. بر همین اساس در کشت گیاه گندم حتی اختلاف۲/۲ واحدی برای pH بین توده خاک و ریزوسفر گزارش شده است که می‌تواند سبب جذب یا آزاد شدن، رسوب یا حلالیت عناصر سنگین شود. عناصر سنگین در شرایط اسیدی، حلالیت بیشتری پیدا می‌کنند (Lombi *et al.*, 2001).

متقیان و همکاران (Motaghian *et al.*, 2013) در مطالعه ریزوسفر گندم نشان دادند که میانگین pH در خاک‌های ریزوسفری، کاهش معنی‌داری نسبت به خاک‌های توده داشتند. درمطالعه دیگری (Motaghian and Hosseinpur, 2013) در ریزوسفر گیاه لوبیا، کاهش ۰/۲ واحدی pH ریزوسفر نسبت به توده خاک گزارش گردید. لی و همکاران (Li *et al.*, 2011) نشان دادند که pH در ریزوسفر گیاه لوبیا ۱/۶ واحد نسبت به خاک کشت نشده (شاهد)، کاهش یافت.

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۲) نشان می‌دهد که اثر متقابل محیط (ریزوسفر و توده خاک) و آلودگی بر میزان کربن آلی محلول معنی‌دار ($p<0/01$) است. مقدار کربن آلی محلول در ریزوسفر با مقدار ۱۷۰/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم بیشتر از توده خاک (۱۰۴/۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم) است که می‌تواند به دلیل وجود ترشحات ریشه در این ناحیه باشد (Motaghian *et al.*, 2013).

کیم و همکاران (Kim *et al.*, 2010) همبستگی معنی‌داری بین کربن آلی محلول و جمعیت باکتریایی در خاک‌های ریزوسفری گزارش کردند. ایشان نشان دادند که جمعیت باکتریایی در خاک‌های ریزوسفری بیشتر از خاک‌های توده بود.

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های خاک مورد مطالعه قبل از آلودگی

Table 1- Some of Soil characteristics before pollution

شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent	رطوبت ظرفیت مزرعه θ_{FC} Field capacity	pH	هدایت الکتریکی EC (dSm^{-1})	کربن آلی Organic carbon ($gr\ kg^{-1}$)	نیتروژن N	پتاسیم K	فسفر P	مس Cu	آهن Fe	روی Zn	منگنز Mn	کادمیم Cd
		(٪)						($mg.kg^{-1}$)							
23	28	49	66	23.7	7.73	1.1	1.08	0.4	0.01	12	0.47	0.24	0.32	0.37	n.d

n.d. not detected

جدول ۲- تجزیه واریانس اثر آلودگی و محیط (ریزوسفر و توده خاک) بر pH، کادمیم قابل استفاده خاک و کربن‌آلی‌محلول

Table 2- Analysis of variance for the effects of contamination and environment (rhizosphere and bulk soil) on pH, available soil cadmium and dissolved organic carbon (DOC)

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی (Df)[a]	میانگین مربعات Mean squares		
		pH	کادمیم قابل استفاده (Available soil Cd)	کربن آلی محلول (DOC)[b]
آلودگی Contamination	2	0.21^{ns}	15.613***	13926.6***
محیط Environment	1	0.048**	0.009^{ns}	78012.4***
محیط× آلودگی Environment×contamination	2	0.005^{ns}	0.047^{ns}	1217.7**
خطا Residual	24	0.006	0.078	196.5

ns، *،** و*** به ترتیب به مفهوم غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطوح ۵، ۱ و ۰/۱ درصد می‌باشد.

ns, *, ** and *** are nonsignificant and significant at 5, 1 and 0.1% probability levels, respectively.

a:(Df): Degree of freedom, b: DOC: Dissolved organic carbon.

جدول ۳- اثر محیط (ریزوسفر و توده خاک) و آلودگی بر میزان کربن آلی محلول (DOC) خاک

Table 3- The effect of environment and contamination on the amount of dissolved organic carbon (DOC) in the studied soil

	آلودگی (mg kg^{-1}) Contamination			میانگین کربن آلی محلول محیط Mean dissolved organic carbon
	صفر	5	10	
ریزوسفر Rhizosphere	196.9^{A}	159.3^{B}	155.8^{C}	170.66^{A}
توده Bulk soil	122.3^{D}	98.6^{E}	93.1^{E}	104.66^{B}
میانگین کربن آلی محلول هر سطح آلودگی Average dissolved organic carbon at pollution levels	159.6^{A}	128.9^{B}	124.45^{C}	

حروف مشابه بزرگ، نشان دهنده عدم اختلاف معنی‌دار بین محیط وسطوح آلودگی در سطح (P<0.001) براساس آزمون LSD می‌باشد.

Similar uppercase letters indicate no significant difference between contamination levels on the basis of LSD test.

جدول ۳ نشان می‌دهد که مقدار کربن آلی محلول در توده خاک در سطح آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۱۹ درصد و در سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، ۲۴ درصد نسبت به توده غیرآلوده، کاهش یافته است. در محیط ریزوسفر، افزایش سطح آلودگی به ۵ میلی گرم بر کیلوگرم، ۱۹ درصد کاهش و آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم ۲۱ درصد کاهش کربن آلی محلول را سبب شده است. متقیان و همکاران (Motaghian and Hosseinpur, 2013) نشان دادند که کربن آلی محلول در محیط ریزوسفری گیاه لوبیا ۲۳ درصد بیشتر از توده خاک بود.

تأثیر ریزوسفر بر تغییر و تبدیل کانی‌های رسی نسبت به توده خاک پس از پایان دوره کشت

دو پراش نگاشت مربوط به تیمارهای مختلف خاک در دو بخش ریزوسفر و توده خاک شهرکرد در شرایط غیرآلوده و بعد از کشت گندم، در شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج ارایه شده برای توده خاک غیرآلوده به‌عنوان کانی‌های موجود در خاک قبل از کشت گیاه گندم نیز قابل تعمیم هستند. پراش نگاشت مربوط به نمونه‌های خاک حاکی از آن است که کانی‌های میکا، اسمکتیت،

کلریت، کائولینیت و پالیگورسکیت در بخش رس نمونه‌های توده خاک وجود داشته‌اند.

در نمونه توده خاک (شکل ۱ قسمت الف) وجود نقاط فراز ۱۴، ۷، ۴/۷ و ۳/۵ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و نیز وجود نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت ۲ ساعت، حاکی از وجود کانی کلریت در توده‌ی خاک می‌باشد. تشخیص رس کائولینیت نیز به کمک وجود نقاط فراز ۷/۱، ۳/۵۷ و ۲/۳۸ آنگستروم انجام می‌شود. وجود نقطه فراز ۷/۱ آنگستروم، در تیمار پتاسیم اشباع و حذف آن در تیمار اشباع با پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت می‌تواند دلیلی بر وجود کانی کائولینیت در خاک باشد. از آن‌جایی که نقاط فراز دوم و چهارم کلریت آهن‌دار با نقاط فراز اول و دوم کائولینیت مشابه است در مواقعی که کانی کلریت از نوع کلریت آهن‌دار باشد، تشخیص دو کانی کلریت و کائولینیت کمی دشوار می‌باشد. در این صورت تشخیص نهایی این دو کانی برمبنای وجود نقطه فراز سوم کائولینیت ۲/۳۸ آنگستروم و ۴/۷۵ آنگستروم برای کانی کلریت می‌باشد. از آن‌جایی‌که برخی از کانی‌های کلریت (کلریت غنی از آهن) نیز در حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس، نقطه فراز رده دوم (۷ آنگستروم) آن‌ها حذف می‌گردد، برای تشخیص دقیق‌تر این دو کانی از یکدیگر نیاز به تیمارهای اضافی از جمله تیمار HCl و دی متیل سولفوکساید (DMSO) می‌باشد (Dixon and Weed, 1989). از آن جایی که کلریت غنی از آهن، کانی تری اکتاهدرال می‌باشد که پیک‌های رده فرد آن (۱۴ و ۴/۷ آنگستروم) ضعیف و پیک‌های رده زوج آن (۷ و ۳/۵ آنگستروم) قوی می‌باشند (Htzpatrick and Roux, 1979). به همین دلیل، وجود پیک ۷ آنگستروم آن‌ها می‌تواند با کانی کائولینیت هم‌پوشانی داشته باشد. شدت پیک رده اول در کلریت‌های تری اکتاهدرال در اثر حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس، کمی افزایش می‌یابد و از شدت پیک رده دوم آن‌ها کاسته می‌شود (Douglas, 1989). بر همین اساس، کانی کلریت نمونه توده خاک از نوع تری اکتاهدرال است. مصلح و همکاران (Mosleh *et al.*, 2013) نیز در مطالعه بخش رس خاک‌های این منطقه، کانی کلریت موجود را از نوع تری اکتاهدرال (سه‌جایی) گزارش کردند. آن‌ها همچنین با استفاده ازتیمار HCL وجود کانی کائولینیت را تأیید کردند. وجود نقاط فراز ۱۰/۵ و ۶/۴ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و حذف حالت دو شاخه‌ای در تیمار پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس نشان دهنده وجود کانی پالیگورسکیت است.

شکل ۱- پراش نگاشت مربوط به بخش رس خاک مورد مطالعه در خاک غیرآلوده دو محیط توده (الف) و ریزوسفر (ب). Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg–Eg: نمونه اشباع با منیزیم و اتیلن گلیکول، Mg –G: نمونه اشباع با منیزیم و گلیسرول، K: نمونه اشباع با پتاسیم، K -110: پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه، K-350: پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه، K-550: پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 1- Diffractograms for clay fractions of the studied soil in non-polluted soils of bulk soil (a) and rhizosphere (b). Mg: Magnesium saturated sample , Mg-Eg: Magnesium saturated sample with ethylene glycol, Mg-g: Magnesium saturated sample with glycerol, k: Potassium saturated sample , K-110: k: saturated sample heated at 110° C, k-350: K saturated sample heated at 350°C , K-550: K saturated sample heated at 550 °C.

حرارت دادن نمونه اشباع از پتاسیم تا ۵۵۰ درجه سلسیوس باعث متلاشی شدن ساختمان بلوری و از بین رفتن نقاط فراز مربوط به این رس می‌گردد (Dixon and Weed, 1989). حضور نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار اشباع با منیزیم و تغییر آن به ۱۸ آنگستروم در تیمار منیزیم و اتیلن گلیکول دلیل بر حضور کانی‌های اسمکتیت است (Douglas, 1989). با توجه به اینکه نقطه فراز ۱۴ آنگستروم پس از تیمار اتیلن گلیکول و گلیسرول حالت پلکانی یا شانه‌ای پیدا کرده است، اسمکتیت دارای درجه بلوری ضعیف یا بار لایه‌ای کم می‌باشد (Htzpatrick and Roux, 1979).

مقایسه پراش نگاشت‌های پرتو ایکس ریزوسفر و توده خاک در شکل ۱ حاکی از آن است که بخشی از کانی کلریت سه‌جایی به کانی حدواسط ورمی‌کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای (HIV) تبدیل شده است. روش‌های مختلفی برای تشخیص کانی HIV توسط محققین مختلف ارائه شده است (Schaetzl andGeorgiadis *et al*., 2020 ; Anderson, 2005). تشکیل HIV از کانی کلریت سه‌جایی را می‌توان توسط فروپاشی تدریجی لایه‌ی تری‌اکتاهدرال با افزایش دما تایید کرد. مفیدترین معیار XRD در تشخیص وجود اشکال هیدروکسی بین لایه‌ای پاسخ به افزایش دما در تیمارهای حرارتی مختلف اشباع شده با پتاسیم است (Dixon and Weed, 1989). در خاک ریزوسفری، افزایش واضح در شدت نقطه فراز ۱۰ آنگستروم در تیمار پتاسیم اشباع و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس نسبت به تیمار اشباع با پتاسیم را می‌توان به تشکیل لایه‌های HIV نسبت داد (شکل ۱ و جدول ۴). از آن‌جایی که نقطه فراز ۱۴ آنگستروم HIV پس از دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس به ۱۰ آنگستروم تبدیل می‌شود شدت نقطه فراز ۱۴

آنگستروم در این تیمار به کلریت نسبت داده می‌شود (Schaetzl and Anderson, 2005). بنابراین، کاهش شدت نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس بیانگر هوادیدگی کلریت و تبدیل آن به HIV است (جدول ۴).

ژزربا و یوفر (Szczerba and Ufer, 2018) یکی دیگر از روش‌های شناسایی کانی‌های با هیدروکسی بین لایه‌ای را انبساط نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمارهای منیزیم اشباع با اتیلن گلیکول و منیزیم اشباع با گلیسرول نسبت به تیمار منیزیم اشباع معرفی کردند. بر همین اساس، در مطالعه حاضر، انبساط نقطه فراز ۱۴ آنگستروم و کاهش آن در هر دو تیمار اشباع با اتیلن گلیکول و اشباع با گلیسرول نسبت به تیمار منیزیم اشباع دلیل دیگری بر تشکیل HIV در ریزوسفر می‌باشد. علت انبساط این است که بخش‌هایی از ساختار کانی‌های با هیدروکسی بین لایه‌ای، توسط کاتیون‌های قابل تعویض لایه ورمی‌کولیتی اشغال می‌گردد و در تیمار منیزیم اشباع با اتیلن گیکول و منیزیم اشباع با گلیسرول به نقطه فراز ۱۷/۸ یا ۱۷ آنگستروم تبدیل می‌شود. دیکسون و وید (Dixon and Weed, 1989) تشکیل کانی ورمی‌کولیت با هیدروکسی بین لایه‌ای از هوازدگی کلریت در خاک را معمول دانسته‌اند. جورجیادیس و همکاران (Georgiadis *et al*., 2020) بر اساس نتایج محققین مختلف، تشکیل کانی HIV را از هوادیدگی کلریت‌های با منشا پدوژنیک، کلریت اولیه و کلریت ثانویه گزارش کرده‌اند. مصلح و همکاران (Mosleh *et al*., 2014) در مطالعات کانی‌شناسی اثر کشت گیاه بابونه آلمانی بر تغییر کانی‌های بخش رس در خاک‌های همین منطقه، تشکیل HIV را از کانی کلریت سه‌جایی و کائولینیت گزارش کردند. شرایط اسیدی متوسط، مواد آلی کم، شرایط اکسیداسیون و مرطوب و خشک شدن مکرر خاک شرایط محیطی بهینه برای تشکیل HIV با منشا پدوژنیک هستند (Rich, 1968). هینسینگر و جیلارد (Hinsinger *et al*., 1993) تشکیل HIV از فلوگوپیت را در محیط ریزوسفری کلزا به دفع پروتون توسط ریشه نسبت دادند.

با توجه به مطالب ذکرشده در بالا می‌توان بیان کرد که، در محیط ریزوسفر گیاه گندم کانی HIV از کانی کلریت تری‌اکتاهدرال تشکیل شده است که این موضوع را می‌توان به تغییر شرایط ریزوسفر نسبت به توده از جمله کاهش pH، افزایش کربن آلی محلول و افزایش فعالیت و زیست توده جانداران در اثر کشت گیاه مرتبط دانست (جدول ۲ و ۳).

تأثیر آلودگی محیط ریزوسفر بر کانی‌های رسی خاک

پراش نگاشت‌های مربوط به تیمارهای مختلف ریزوسفر آلوده به کادمیم بعد از کشت گیاه در شکل ۲ نشان داده شده است. اگرچه بر اساس مطالب ارایه شده در قبل، نوع کانی‌ها در شرایط آلوده مشابه با شرایط غیرآلوده است اما مقایسه پراش نگاشت‌های خاک ریزوسفر با سطوح آلودگی ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم (شکل ۲) با خاک ریزوسفر غیرآلوده (شکل ۱_ب) نشان می‌دهد مقدار کانی کلریت در سطوح آلوده، بیشترین مقدار را دارد؛ به طوری‌که در سطح غیرآلوده شدت نقطه فراز ۱۴ آنگستروم در تیمار پتاسیم با حرارت ۵۵۰ درجه سلسیوس کمتر از سطح با آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم است و در سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم، نقطه فراز کلریت، بیشترین شدت را دارد (جدول ۴). این نتایج بدین معناست که مقدار کلریت کمتری در آلودگی بیشتر ریزوسفر به کادمیم به HIV تبدیل شده است. بر اساس نتایج، افزایش غلظت کادمیم قابل جذب در خاک، سبب کاهش فعالیت ریزوسفر شده است (جدول ۳) و کادمیم توانسته است با بازدارندگی و کاهش فعالیت ریزوسفر بر روند تبدیل و هوادیدگی کانی‌ها مؤثر باشد. کاهش فعالیت ریزوسفر در اثر آلودگی به فلزات سنگین در مطالعات مختلفی گزارش شده است (Karaca *et al*., 2002;Li *et al*., 2012 Aghababaei *et al*., 2013;).

جدول ٤- شدت نقاط فراز ١٤ و ١٠ آنگستروم پس از حرارت دادن تدریجی در دماهای مختلف
اعداد شدت میانگین سه تکرار هستند.

Table 4- Intensity (cps) of the 10 and 14 angstrom basal reflections after gradual heating at different temperatures
The intensity values represent the average of three replicates.

محیط Environment	تیمارهای پتاسیم Potassium Treatments	میانگین شدت نقطه فراز ١٤ آنگستروم Mean of peak intensity, 14 angstrom	میانگین شدت نقطه فراز ١٠ آنگستروم Mean of peak intensity, 10 angstrom	نسبت نقطه فراز ١٠ آنگستروم به ١٤ آنگستروم در تیمار پتاسیم اشباع Intensity ratio of 10 to 14 angstrom peak
توده خاک Bulk soil	k	40	60	1.5
	k-110	40	50	
	k-330	16	65	
	k-550	28	65	
ریزوسفر خاک Rhizosphere	k	50	70	1.2
	k-110	35	85	
	k-330	20	90	
	k-550	25	100	
ریزوسفر خاک با سطح آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم Soil rhizosphere with pollution levels of 5 mg kg^{-1} cadmium	k	34	80	2.3
	k-110	28	75	
	k-330	20	100	
	k-550	36	100	
ریزوسفر خاک با سطح آلودگی ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم Soil rhizosphere with pollution levels of 10 mg kg^{-1} cadmium	k	40	60	1.5
	k-110	30	60	
	k-330	35	70	
	k-550	58	70	

شکل ۲- پراش نگاشت خاک ریزوسفر در خاک با سطوح آلودگی ۵ و ۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم الف) خاک با آلودگی ۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم. پ) خاک با آلودگی ۱۰میلی‌گرم بر کیلوگرم کادمیم. Mg: نمونه اشباع با منیزیم، Mg–eg: نمونه اشباع با اتیلن گلیکول، Mg –g: نمونه اشباع با گلیسرول، k: نمونه اشباع با پتاسیم، k -110 : پتاسیم و حرارت ۱۱۰ درجه، k- 350: پتاسیم و حرارت ۳۵۰ درجه، k -550: پتاسیم و حرارت ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد.

Figure 2- Diffractograms for clay fraction of Shahrekord soil rhizosphere in the soil with pollution levels of 5 and 10 mg kg^{-1} cadmium. a) Soil with contamination of 5 mg kg^{-1} cadmium. b) Soil with contamination of 10 mg kg^{-1}. Mg: Magnesium saturated sample, Mg – Eg: ethylene glycol saturated sample, Mg –g: Glycerol saturated sample, k: Potassium saturated sample, k -110: Potassium saturated at 110 °C, k-350: Potassium heated at 350°C and k-550: K heated at 550°C.

باقری و میر سید حسینی (Bagheri and Mirseyed Hosseini, 2015) کاهش تنفس میکروبی، فعالیت میکروبی و آنزیمی خاک را در ریزوسفر آلوده به روی گزارش کردند. نادری‌زاده و خادمی (Naderizadeh and Khademi, 2011) نشان دادند که تجزیه مواد آلی و فعالیت‌های ریشه، قدرت اسیدی ریزوسفر را افزایش داده، رهاسازی پتاسیم را از کانی فلوگوپیت تسهیل کرده و در نهایت باعث تبدیل این کانی به کانی ورمی‌کولیت و تا حدی اسمکتیت و نیز تشکیل جزئی کلریت شده است. چنین نتایجی بیانگر این است که آلودگی در محیط ریزوسفر می‌تواند جذب عناصر را توسط گیاه کاهش دهد. بنابراین، حتی اگر امکان فراهم شدن عناصر از طریق هوادیدگی و تبدیل کانی‌های موجود در محیط خاک فراهم باشد گیاه توانایی هوادیدگی کانی و آزادسازی عناصر را نداشته باشد. رضایی‌نژاد و همکاران (Rezainejad *et al.*, 2021) در مطالعه تأثیر کانی فلوگوپیت بر جذب پتاسیم توسط گیاه جو دریافتند تنش خشکی باعث کاهش رشد و جذب پتاسیم توسط گیاه جو می‌شود و کاربرد فلوگوپیت به عنوان منبع تأمین کننده پتاسیم آثار منفی تنش خشکی را تعدیل می‌کند. در هنگام کمبود پتاسیم، کانی فلوگوپیت با مکانیزم‌هایی که در ریزوسفر جو رخ داده، هوادیده شده و پتاسیم آن در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. نتایج آنالیز عنصری (XRF) نیز با میزان پتاسیم جذب شده و نسبت ورمی‌کولیتی شدن هم‌خوانی داشت. در مطالعه آن‌ها ریزوسفر جو سبب رهاسازی پتاسیم از فلوگوپیت شد اما اعمال تنش خشکی میزان رهاسازی را کاهش داد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که محیط ریزوسفری گندم قادر است تغییراتی را در ویژگی‌های خاک ایجاد نماید به طوری‌که مقدار pH در خاک ریزوسفری به طور معنی‌داری کمتر از توده خاک بود و مقدار کربن آلی محلول در محیط ریزوسفر به‌طور بسیار معنی‌داری از توده خاک بیشتر بود. در خاک‌های آلوده در هر دو محیط ریزوسفری و توده خاک، میزان کربن آلی محلول کمتر از خاک غیرآلوده و اثر متقابل آلودگی و محیط، در مقدار کربن آلی محلول در خاک معنی‌دار بود. براساس نتایج کانی‌شناسی، HIV در محیط ریزوسفر خاک از کانی کلریت تری اکتاهدرال سه‌جایی تشکیل شد. هم‌چنین، آلودگی ریزوسفر باعث شد شدت هوادیدگی کانی کلریت و تبدیل آن به HIV کاهش یابد. چنین نتایجی نشان می‌دهد آلودگی خاک با تأثیر منفی بر

فعالیت گیاهان حتی می‌تواند مانع از دسترس قرار گرفتن عناصر غذایی موجود در ساختار کانی‌های محیط خاک گردد.

منابع

1. Aghababaei F., Raiesi F., and Hosseinpur A. 2013. The influence of earthworm and arbuscular fungi on microbial biomass carbon and enzyme activity in a soil contaminated with cadmium in sunflower (*Helianthus annuus* L.) cultivation. Journal of Water and Soil 27: 949-962. (In Persian with English abstract)
2. Bagheri S., and Mirseyed Hosseini H. 2015. Effects of sorghum cultivation on some soil biological indicators at different Zinc levels. Journal of Water and Soil 28(6): 1217-1227. (In Persian with English abstract). https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.31428
3. Birkeland P.W. 1990. Soil-geomorphic researcha selective overview. Geomorphology 3: 207-224. https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90004-A
4. Dixon J.B., and Weed S.B. 1989. Minerals in Soil Environments. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, series (1).
5. Douglas L.A. 1989. Vermiculites. Minerals in soil environments, 1, pp.635-674. In Dixon J.B., and Weed S.B. (ed.), Minerals in Soil environment, 2nd ed. Book Series, Soil Science Society of America, Madison. Wisconsin, p 625-674.
6. Georgiadis A., Dietel J., Dohrmann R., and Rennert T. 2020. What are the nature and formation conditions of hydroxy-interlayered minerals (HIMs) in soil. Plant Nutrition and Soil Science 183 (1): 12-26. https://doi.org/10.1002/jpln.201900283.
7. Htzpatrick R.W., and Roux J.L.E. 1979. Mineralogy and chemistry of a Transvaal Black Clay toposeqence. Soil Science 28: 165-179. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1977.tb02304.x.
8. Hinsinger P., Elsass F., Jaillard B., and Robert M. 1993. Root-induced irreversible transformation of a trioctahedral mica in rhizosphere of rape. Soil Science Society of America 44: 535- 545. https://doi.org/10.1111/j.12389.1993.tb00475.x.
9. Hinsinger P., and Jaillard B. 1993. Root-induced release of interlayer potassium and vermiculitization of phlogopite as related to potassium depletion in the rhizosphere of ryegrass. Soil Science Society of America 44: 525-534. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb00474.x.
10. Hosseinifard S.J. 2010. Mineralogical and chemical changes of some potassium-bearing minerals inthe root environment of pistachios and wheat. PhD Thesis in Soil Science. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. Iran. (In Persian)
11. Karaca A., Naseby D.C., and Lynch J.M. 2002. Effect of cadmium contamination with sewage sludge and phosphate fertiliser amendments on soil enzyme activities, microbial structure and available cadmium. Biology and Fertility of Soils 35: 428-434.
12. Khayyamim F., Khademi H., and Salehi M.H. 2010. Phlogopite and Muscovite mineralogical changes in clay size due to the coexistence of endophytic fungi with long fissures. Journal of Soil and Water 24 (3): 556-545.
13. Khademi Z., Malakuti J.M., and Davy J. 2008. The effect of root organic acids on the ability to absorb nutrients in the rhizosphere. Journal of Water and Soil Sciences 21: 189-171.
14. Khormali F., Rezaei F., Rahimzadeh N., Hosseinifard S.J., and Dordipour E. 2015. Rhizosphere-induced weathering of minerals in loess-derived soils of Golestan Province, Iran. Geoderma Regional 5: 34-43. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.002.
15. Kittrick J.A., and Hope E.W. 1963. A procedure for the particle-size separation of soils for X-ray diffraction analysis. Soil Science. 96: 319-325.
16. Kim K.R., Owens G., and Kwon S.I. 2010. Influence of Indian mustard (*Brassica juncea*) on rhizosphere soil solution chemistry in long-term contaminated soils. A rhizobox study. Environmental Sciences 22(1): 98-105. https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60080-2.
17. Li T., Di Z., Islam E., Jiang H., and Yang X. 2011. Rhizosphere characteristics of zinc hyperaccumulator *Sedum alfredii* involved in zinc accumulation. Journal of Hazardous Materials 185(2-3): 818-823. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.093.
18. Li H., Li X., Dou Z., and Zhang J. 2012. Earthworm (*Aporrectodea trapezoides*)–mycorrhiza (*Glomus intraradices*) interaction and nitrogen and phosphorus uptake by maize, Biology and Fertility of Soils 48: 75–85.
19. Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. Soil Science Society of America Journal 42: 421-428. https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x.
20. Lombi E., Wenzel W.W., Gobran G.R., and Adriano D.C. 2001. Dependency of phytoavailability of metals on indigenous and induced rhizosphere processes: a review. In: Gobran G.R., Wenzel W.W., and Lombi E. (Eds.), Trace Elements in the Rhizosphere. CRC Press LLC.
21. Martin H.W., and Sparks D.L. 1985. On the behavior of nonexchangeable potassium in soils. Communications in

Soil Science and Plant Analysis 16: 133-162. https://doi.org/10.1080/00103628509367593.
22. Motaghian H., and Hosseinpur A. 2013. The effect of red bean root (*Phaseolus vulgaris* L.). On the usability and shapes of copper in a number of soils Iranian limestone. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries), 5: 1022-1009. (In Persian with English abstract)
23. Motaghian H.R., Hosseinpur A.R., Mohamadi J., and Raeisi F. 2013. Change in Bioavailability and Fractions of Copper in the Rhizosphere of Wheat (*Triticum aestivum* L.) in Some Calcareous Soils. Journal of Water and Soil 26(6): 1492-1504. (In Persian with English abstract)
24. Mosleh Z., Salehi M.H., and Rafieiolhossaini M. 2013. The effect of German chamomile cultivation and use of livestock manure in changes and developments of clay and silt soil minerals. Agricultural Science and Technology and Natural Resources 18: 68. 21-11. (In Persian)
25. Mosleh Z., Salehi M.H., and Rafieiolhossaini M. 2013. Effect of different soil series and manure application on agro-morphological characteristics, essential oil and chamazulene content of German chamomile. Essential Oil Bearing Plants 16: 730-739. https://doi.org/10.1080/0972060X.2013.861990.
26. Mosleh Z., Salehi M.H., Rafieiolhossaini M., and Mehnatkesh A. 2014. Formation of hydroxy-interlayer vermiculite (HIV) in rhizosphere soils under German chamomile cultivation and manure application. Clay Minerals 49(1): 63-73.
27. Naderizadeh Z., and Khademi H. 2011. The effect of organic matter on the mineralogical changes of phlogopite and clay-sized muscovite in alfalfa root environment. Journal of Crystallography and Mineralogy 2: 267- 280. (In Persian with English abstract)
28. Nelson D.W. and Sommers L.E. 1996. Total Carbon, Organic carbon, and Organic matter. p. 961-1010. In Sparks, D.L., Methods of Soil Analysis. Part 3. ASA and SSSA, Madison., WI.
29. Norouzi S., and Khademi H. 2007. Vermiculitization of selected micaceous minerals as influenced by the alfalfa rhizosphere. In: Proceeding of the 15th Symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran. Ferdowsi University of Mashhad, Iran. (In Persian)
30. Roushani G. 2010. Effect of exhaustive cropping on potassium depletion and clay mineral transformations. p. 53-56. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. Australia.
31. Rich C.I. 1968. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. Clays and Clay Minerals 16: 15-30.
32. Rezaei F. 2010. Propagation and transformation of minerals in the root environment of plants grown in soils with different mineralogy in Golestan province. Master Thesis in Soil Science, Gorgan University. Iran. (In Persian with English abstract)
33. Rezainejad R., Khademi H., Ayoubi Sh., Mosadeghi M.R., and Khormali F. 2020. Evaluation of the effect of phlogopite mineral application in sandy growth medium on yield and potassium uptake of barley under drought stress. Soil Management and Sustainable Production 10(3): 151-166. (In Persian with English abstract)
34. Rezainejad R., Khademi H., Ayoubi Sh., and Mosadeghi M.R. 2021. Roots under water stress induce K release from phlogopite, bio-transforming to vermiculite. Rhizosphere 17: 100-310. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100310.
35. Rezainejad R. 2022. Changes in physicochemical and clay mineralogical properties of soils as influenced by wild almond tree (*Amygdalus arabica*) rhizosphere and drought stress. Ph.D Thesis in Soil Science, Isfahan University of technology, Iran. (In Persian)
36. Salehi M.H., and Tahamtani L. 2012. Magnesium uptake and palygorskite transformation abilities of wheat and oat. Pedosphere 22: 834-841. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60069-1.
37. Shahrokh V., Khademi H., Cano A.F., Acosta J.A., and Zornoza R. 2020. Kaolinite neoformation from palygorskite in the rhizosphere of citrus trees in semi-arid regions. Catena 185: 104-292. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104292.
38. Schaetzl R., and Anderson S. 2005. Soils Genesis and Geomorphology, Cambridge University Press, New York.
39. Soil Survey Staff. 2010. Soil Taxonomy: A basic systems of soil classification for making and interpreting soil surveys. Eleventh edition, NRCS, USDA.
40. Szczerba M., and Ufer K. 2018. New model of ethylene glycol intercalate in smectites for XRD modelling. Applied Clay Science 153: 113-123. https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.12.010.
41. Tadano T., and Yoshida S. 1978. Chemical changes in submerged soils and their effect on rice growth. Soils and Rice 399-420.
42. Wallander H. 2000. Uptake of P from apatite by Pinus sylvestris seedlings colonised by different ectomycorrhizal fungi. Plant and Soil 218: 249-256.

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

Research Article
Vol. 36, No. 3, Jul.-Agu. 2022, p. 407-420

Tabriz Daily Rainfalls Modeling via Hybridized Tree Based and Seasonal-Trend Component Bagging Method

S. Javidan[1], M.T. Sattari[2*], Sh. Mohsenzadeh[3]

Received: 16-05-2022
Revised: 08-06-2022
Accepted: 06-07-2022
Available Online: 22-09-2022

How to cite this article:
Javidan S., Sattari M.T., and Mohsenzadeh Sh. 2022. Tabriz Daily Rainfalls Modeling via Hybridized Tree Based and Seasonal-Trend component Bagging Method. Journal of Water and Soil 36(3): 407-420. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/JSW.2022.76512.1161

Introduction

Precipitation is one of the most important components of water cycle. Accurate precipitation measurement is essential for flood forecasting and control, drought analysis, runoff modeling, sediment control and management, watershed management, agricultural irrigation planning, and water quality studies. Determining the correct amount of precipitation in cities and rural areas is also important for managing floods. The precipitation process is completely non-linear and involves randomness in terms of time and space. Therefore, it is not easy to explain that with simple linear models due to various climatic factors and may contain major errors. Therefore, various methods and models have been proposed to evaluate, and predict precipitation. This study aimed to estimate the daily precipitation of Tabriz based on hybridized tree-based and Bagging methods by using neighboring stations.

Materials and Methods

In the present study, the rainfall data of adjacent stations in Urmia lake basin (Sahand, Sarab, Urmia, Maragheh and Mahabad) were employed in 1986-2021 to estimate the daily rainfall in Tabriz. About 70% of data were considered for calibration and 30% of data were applied for validation. Using the correlation matrix and Relief algorithm, various input components were identified. Modeling was performed using tree-based data mining methods including M5P, RT and REPT and Bagging method. The daily precipitations of Tabriz was decomposed into their components by seasonal-trend analysis method. Its components, including trend, seasonal and residual, were used in different input scenarios to investigate the effect of these components on improving the modeling results. To evaluate the modeling performance, the indices of correlation coefficient, Root Mean Square Error, Nash-Sutcliffe Efficiency and modified Wilmot coefficient were applied.

Results and Discussion

RT and REPT methods increased the accuracy of the model and decreased its error when they were used as the basic algorithm of the Bagging method. This was not the case with the M5P method, as the results were slightly weaker. It was also observed that Tabriz rainfall is largely influenced by Sahand rainfall, as the most models gave reliable estimates by using the rainfall data for Sahand station. This can be explained by the high correlation between Tabriz rainfall and Sahand. The results showed that the first scenario (Sahand) for M5P, RT, REPT and B-M5P method, the fifth scenario (Sahand, Sarab, Urmia, Maragheh and Mahabad) for the B-RT method, and the fourth scenario (Sahand, Sarab, Urmia and Mahabad) for the B-REPT method were the best scenarios. The best performance was found for the scenario 1 of the M5P decision tree model, followed by the Bagging method with the M5P base algorithm. In general, it was concluded that application of the Bagging method produced reliable results. Modeling without considering the decomposition components was compared with modeling with decomposition components. Adding seasonal, trend and residual components to the modeling input combinations significantly improved the accuracy of the results. Application of Bagging method in most cases also increased

1, 2 and 3- M.Sc. Student, Associate Professor and M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir)

the modeling accuracy. The first scenario (Sahand and residual) for M5P and B-M5P methods, the tenth scenario (residual, trend, seasonal, Sahand and Sarab) for RT, REPT and B-REPT methods, and the eighth scenario (residual, trend and Sahand) for B-RT method were selected as the best scenarios. As a result, among the stations, Sahand, due to proximity and high correlation, and Sarab, due to greater correlation, had a great impact on precipitation in Tabriz. In general, the Bagging method with the basic M5P algorithm (B-M5P) was best suited in the first scenario. Thus, adding precipitation analysis components and using the Bagging method improve the modeling results with tree-based data mining methods.

Conclusion

Our results showed that Bagging method provided acceptable results in most cases. In the first case, the first scenario of M5P method including Sahand precipitation data was selected as the superior method and scenario. As a result, Sahand was the most effective station in estimating Tabriz rainfall with the highest correlation and the shortest distance from Tabriz. In the second case, with the decomposition components, the accuracy of the results increased significantly. The Bagging method with the basic M5P algorithm, the parameters of Sahand precipitation and the residual of Tabriz precipitation was considered as the best modeling algorithm. It can be concluded that using Bagging method and decomposition components with the closest station to the studied station results in the highest accuracy. Therefore, Bagging models with tree-based algorithm can be considered as simple and widely used methods.

Keywords: Bagging method, Decomposition, Modified Wilmot, Tree models, Urmia lake basin

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۶، شماره ۳، مرداد-شهریور ۱۴۰۱، ص. ۴۲۰-۴۰۷

مدل‌سازی بارش روزانه تبریز با روش‌های درختی ادغام شده با تجزیه فصلی-روند و رویکرد دسته‌بندی

سحر جاویدان[۱]- محمدتقی ستاری[۲*]- شکوه محسن زاده[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

چکیده

بارش به‌عنوان یک متغیر تصادفی با داشتن تغییرات مکانی و زمانی یکی از عناصر پیچیده در چرخه هیدرولوژی است. هدف پژوهش حاضر برآورد میزان بارش روزانه تبریز در بازه زمانی ۳۶ ساله (۱۹۸۶-۲۰۲۱) با استفاده از گروه روش‌های درختی شامل، مدل درختی M5P، درخت تصادفی، کاهش خطای هرس درخت و روش دسته‌بندی است. بدین منظور از مقادیر بارش ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه از جمله سهند، سراب، ارومیه، مراغه و مهاباد در ترکیب‌های ورودی مختلف استفاده شد. ماتریس همبستگی و الگوریتم رلیف مبنای انتخاب سناریوهای ورودی در نظر گرفته شد و تأثیر مؤلفه‌های تجزیه فصلی-روند در بهبود نتایج مدل‌سازی بررسی شد. عملکرد روش‌های مذکور با معیارهای ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، ضریب نش ساتکلیف، میانگین خطای قدر مطلق و ضریب ویلموت اصلاح شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد رویکرد دسته‌بندی در اکثر موارد نتایج قابل قبولی ارائه نموده و باعث بهبود نتایج مدل‌سازی می‌گردد. بررسی‌ها مشخص نمود که ایستگاه سهند با بیشترین همبستگی و کمترین فاصله از تبریز، مؤثرترین ایستگاه مجاور در برآورد میزان بارش تبریز می‌باشد. در حالت اول و بدون اعمال مؤلفه‌های تجزیه (روند، فصلی و باقیمانده) در بین روش‌های مورد استفاده روش M5P با سناریو اول شامل بارش سهند به‌عنوان روش و سناریو برتر انتخاب شد. در حالت دوم با وارد شدن مؤلفه‌های تجزیه، دقت تخمین‌ها به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافت. ادغام روش دسته‌بندی با الگوریتم پایه M5P با پارامترهای بارش سهند و باقیمانده بارش تبریز با R=0.98 و NS=0.95 به‌عنوان برترین حالت انتخاب گردید. در حالت کلی نتایج نشان داد، بهره‌گیری توأم از رویکرد دسته‌بندی مدل‌ها و الگوریتم پیش‌پردازش مؤلفه‌های تجزیه باعث بهبود نتایج مدل‌سازی بارش روزانه تبریز می‌شود. به طوریکه مقدار خطای RMSE نسبت به حالت اول ۶۰/۶۴ درصد کاهش یافت. بنابراین به علت استفاده از حداقل تعداد پارامتر ورودی و ارائه نتایج قابل قبول، مدل‌های دسته‌بندی با الگوریتم پایه درختی به‌عنوان روش‌های ساده و پرکاربرد پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تجزیه، حوضه دریاچه ارومیه، رویکرد دسته‌بندی، مدل‌های درختی، ویلموت اصلاح شده

مقدمه

بارندگی یکی از مهم‌ترین ورودی‌های سیستم‌های آبی است و نقش کلیدی در تمام مطالعات و مدیریت منابع آب دارد. اندازه‌گیری دقیق بارش در پیش‌بینی و کنترل سیل، تحلیل خشکسالی، مدل‌سازی جریان، کنترل و مدیریت رسوب، مدیریت حوضه، برنامه‌ریزی آبیاری کشاورزی و مطالعات کیفیت آب مهم و ضروری است. تشخیص دقیق بارندگی در شهرها و مناطق روستایی برای پیشگیری و مدیریت مخاطرات ناشی از سیل اهمیت دارد (Sattari *et al.*, 2020). با توجه به این‌که فرآیند بارش، فرآیندی کاملاً غیرخطی و از نظر زمانی و مکانی تصادفی است و عوامل مختلف اقلیمی مانند شکل، شدت،

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیار و دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: mtsattar@tabrizu.ac.ir)

DOI: 10.22067/JSW.2022.76512.1161

مدت، دوره بارش، تبخیر و غیره در آن نقش دارند، تشریح آن با مدل‌های ساده و خطی به راحتی امکان‌پذیر نبوده و با خطای زیادی همراه است. بنابراین، روش‌ها و مدل‌های گوناگونی جهت ارزیابی، پیش‌بینی و تخمین بارندگی ارائه شده است (Omidvar and Azhdarpoor, 2013). روش‌های مبتنی بر داده، قابلیت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی حوضه‌ها را بدون توجه کافی بر شرایط فیزیکی حاکم بر مسئله دارا هستند. در سال‌های اخیر مدل‌های درختی به‌عنوان یکی از تکنیک‌های داده‌کاوی در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد توجه قرار گرفته‌اند. یافتن یک الگوریتم یادگیری ماشینی با کارایی بالا ممکن است کمی طول بکشد. این به این دلیل است که یادگیری ماشین کاربردی، پر از فرآیند آزمون و خطا است. رویکرد ترکیبی[1] که چندین مدل مختلف را ترکیب می‌کند، یکی از راه‌های بهبود دقت نتایج مدل‌سازی است (Yobero, 2018). برخلاف سایر روش‌های طبقه‌بندی که فقط از یک الگوریتم طبقه‌بندی استفاده می‌کنند، روش ترکیبی مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها را ادغام و نتایج را برای تصمیم‌گیری ترکیب می‌کند (Zhou, 2012). بررسی منابع نشان می‌دهد تحقیقات زیادی در زمینه برآورد میزان بارش با استفاده از روش‌های داده‌مبنا در سطح ملی و بین‌المللی انجام یافته است. دستورانی و همکاران (Dastourani *et al.*, 2013) کارایی مدل درخت تصمیم در پیش‌بینی بارش ایستگاه سینوپتیک یزد را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در ایستگاه یزد، مدل درخت تصمیم‌گیری خصوصاً در شرایطی که از میانگین متحرک ۵ ساله داده‌ها استفاده گردد، دارای توانایی مناسبی در پیش‌بینی میزان بارش می‌باشد. ستاری و نهرین (Sattari and Nahrein, 2014) مقادیر حداکثر بارش روزانه ایستگاه‌های اهر و جلفا را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک و مدل درختی M5 پیش‌بینی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل درختی M5 به‌دلیل ارائه روابط خطی ساده و قابل فهم، می‌تواند به‌عنوان روشی کاربردی و جایگزین برای محاسبه حداکثر بارش روزانه در ماه، مورد توجه قرار گیرد. امیدوار و همکاران (Omidvar *et al.*, 2014) کارایی مدل درخت تصمیم در پیش‌بینی بارش ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه را ارزیابی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که درخت تصمیم‌گیری رگرسیونی، مدلی نسبتاً کارا در پیش‌بینی بارش است و استفاده از میانگین متحرک منجر به افزایش چشمگیر کارایی مدل درخت تصمیم می‌شود. نگاهامولا و همکاران (Nagahamulla *et al.*, 2014) دو مدل مجموعه شبکه عصبی با خوشه‌بندی K (ENN-K[2]) و مجموعه شبکه عصبی با الگوریتم ژنتیک (ENN- GA[3]) را با روش‌های دسته‌بندی و تقویتی مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که مدل ENN-GA با خطای نسبتا کمتری دقیق‌تر از مدل‌های Bagging و Boosting است. بوشارا و ابراهیم (Bushara and Abraham, 2015) از روش‌های ترکیبی برای پیش‌بینی بلندمدت بارندگی استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده از تحقیق آن‌ها نشان داد که روش ترکیبی بهترین عملکرد را در مقایسه با الگوریتم‌های پایه دارد. روش ترکیبی نه تنها دقت پیش‌بینی را افزایش می‌دهد، بلکه منجر به اطمینان بیشتر در نتایج می‌شود. میشرا و همکاران (Mishra et al., 2017) مطالعه جامعی از تکنیک‌های آماری و روش‌های داده‌کاوی برای تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی ارائه دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که تکنیک‌های آماری و تکنیک‌های مبتنی بر شبکه عصبی را می‌توان به صورت موازی در تجزیه و تحلیل داده‌های سری زمانی استفاده کرد و با کمک تکنیک‌های محاسباتی نرم، نتایج بهتری ممکن است یافت شود. چوبین و همکاران (Choubin *et al.*, 2018) به پیش‌بینی بارش با استفاده از مدل طبقه‌بندی و رگرسیون درختان پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند که CART[4] با ضریب نش-ساتکلیف بیشتر از ۰/۷۵ نتایج بهتری در مقایسه با ANFIS[5] و ARIMA[6] در پیش‌بینی بارش دارد. ادنان و همکاران (Adnan *et al.*, 2021) به مقایسه روش‌های دسته‌بندی[7] و تقویت[8] برای طبقه‌بندی بارش در ایستگاه هواشناسی سلطان سیاریف قاسم دوم در پکان‌بارو پرداختند. آن‌ها دریافتند که تقویت گرادیان تصادفی[9] با مدل‌سازی تقویت گرادیان بهترین الگوریتم بر اساس دقت متوسط است. همچنین این الگوریتم در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها کاربرد بیشتری دارد. یو و هاسکینز (Yu and Haskins, 2021) برای پیش‌بینی بارش منطقه‌ای در ایالت نیویورک از روش‌های یادگیری ماشینی استفاده کردند. در تحقیق آن‌ها مدل KNN[10] هم برای طبقه‌بندی و هم برای رگرسیون به‌عنوان مدلی با دقت بالا و خطای کمتر معرفی شد. لیو و ملیز (Liyew and Melese, 2021) روش‌های رگرسیون خطی چندمتغیره، جنگل تصادفی و افزایش گرادیان شدید[11] را برای پیش‌بینی میزان بارندگی روزانه به کار بردند. آن‌ها دریافتند که الگوریتم یادگیری ماشینی

1- Ensemble
2- Ensemble Neural Network with K-means
3- Ensemble Neural Network with Genetic Algorithms
4- Classification And Regression Trees
5- Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
6- Auto Regressive Integrated Moving Average
7- Bagging
8- Boosting
9- Stochastic Gradient Boosting
10- K-Nearest Neighbors
11- Extreme Gradient Boosting

تقویت گرادیان شدید بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. بررا و همکاران (Barrera *et al.*, 2022) به تحلیل مقایسه‌ای الگوریتم‌های یادگیری ماشین مدرن برای پیش‌بینی سری‌های زمانی بارندگی پرداختند. آن‌ها نتیجه گرفتند در بین تمام مدل‌های آزمایش شده، شبکه حافظه بلند مدت کوتاه انباشته[1] با دو لایه پنهان و شبکه حافظه بلند مدت کوتاه دو جهته[2] بهترین عملکرد را داشتند. کابزولو (Cabezuelo, 2022) برای پیش‌بینی بارندگی در استرالیا از روش‌های k نزدیکترین همسایگی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی و شبکه عصبی استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که شبکه عصبی بالاترین دقت را در بین روش‌های مورد مطالعه داشت. اندالی و همکاران (Endalie *et al.*, 2022) برای پیش‌بینی بارش روزانه جیما، منطقه‌ای واقع در جنوب غربی ارومیا روش‌های پرسپترون چندلایه[3]، k نزدیک‌ترین همسایگی، ماشین بردار پشتیبان، درخت تصمیم و روش یادگیری عمیق LSTM[4] را به‌کار بردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل LSTM دارای RMSE کمتر و R^2 بالاتر است. هدف پژوهش حاضر برآورد میزان بارش روزانه تبریز با استفاده از مقادیر بارش ایستگاه‌های مجاور در دوره آماری ۳۶ سال (۱۹۸۶-۲۰۲۱) است. بدین منظور از روش‌های داده‌کاوی مبتنی بر درخت شامل درخت تصادفی (RT[5])، مدل درختی M5P و کاهش خطای هرس درخت (REPT[6]) استفاده گردید. ارزیابی دقت و عملکرد رویکرد ادغام دسته‌بندی به‌عنوان روشی ترکیبی و الگوریتم پیش پردازش تجزیه فصلی-روند در راستای بهبود نتایج مدل‌سازی یکی دیگر از اهداف این مطالعه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین مختصات ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. میانگین بارش روزانه تبریز در ۳۶ سال اخیر ۰/۷۱۱ میلی‌متر و حداقل و حداکثر مقدار بارش به ترتیب ۰ و ۵۸ میلی‌متر بوده است. در این حوضه از مناطق مرکزی حوضه به سوی مناطق مرتفع پیرامونی بر مقدار بارندگی افزوده می‌شود (Tahroudi *et al.*, 2017). هدف پژوهش حاضر تخمین میزان بارش روزانه تبریز در دوره آماری ۳۶ ساله (۱۹۸۶-۲۰۲۱) می‌باشد. تبریز مرکز استان آذربایجان شرقی بوده و دارای مساحتی حدود (km^2) ۱۲۰۰ می‌باشد. تبریز از شمال به کوه عینالی، از جنوب به دامنه کوه سهند و از غرب به جلگه تبریز و دریاچه ارومیه محدود است (Asakereh and Akbarzadeh, 2017). موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک و ویژگی‌های آماری بارش در جدول ۱ و موقعیت مکانی ایستگاه تبریز و فاصله آن از ۵ ایستگاه مجاور و همبستگی بارش بین آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

در پژوهش حاضر برای برآورد میزان بارش روزانه تبریز از مقادیر بارش ایستگاه‌های مجاور (سهند، سراب، ارومیه، مراغه و مهاباد) در دوره آماری ۳۶ ساله (۱۹۸۶-۲۰۲۱) استفاده شد. از بین داده‌های موجود، ۷۰٪ برای واسنجی و ۳۰٪ برای صحت‌سنجی در نظر گرفته شد. با استفاده از ماتریس همبستگی و الگوریتم رلیف انواع ترکیب‌های ورودی مدل‌ها در قالب چندین سناریو مشخص شد (جدول ۲). رلیف یک الگوریتم انتخاب ویژگی برای کاهش ابعاد مسئله است که اولین بار توسط کیرا و رندل (Kira and Rendell, 1992) پیشنهاد گردید. نکات قوت این الگوریتم ساده بودن اصول و عدم پیچیدگی آن، قابل حل بودن با توابع چندجمله‌ای مرتبه پایین، قابل استفاده بودن برای داده‌های پیوسته و نیاز به تعداد کم داده‌های آموزشی است. در یک مجموعه داده با تعداد N نمونه (داده مشاهداتی) و تعداد P ویژگی که مربوط به دو طبقه مختلف هستند، هر ویژگی باید در بازه (۱ ،۰) قرار گیرد. الگوریتم مذکور m بار تکرار شده و در هر مرتبه از یک بردار وزنی متفاوت که از صفر شروع می‌گردد، استفاده می‌کند. در هر تکرار، الگوریتم مذکور بردار ویژگی X را که متعلق به یک نمونه تصادفی است و بردارهای ویژگی نزدیکترین نمونه به نمونه X در طبقه مورد نظر را توسط تابع فاصله اقلیدسی[7] انتخاب می‌کند. پس از m تکرار هر یک از عناصر بردار وزن توسط m تقسیم‌بندی می‌شوند. نتیجه این عمل به دست آمدن یک بردار مرتبط است که اگر مقدار بردار مرتبط یک ویژگی از آستانه تعریف شده بیشتر گردد، آن ویژگی انتخاب می‌گردد.

همچنین برای تجزیه و تحلیل داده‌ها، نمودار طرح خطی برای تمام ایستگاه‌ها در شکل ۲ آورده شد که از طریق روش طرح‌ریزی خطی با تجزیه و تحلیل داده‌های اکتشافی و با استفاده از نرم‌افزار Orange تهیه شده است. هر نقطه روی نمودار محل تقاطع بارش تمام ایستگاه‌ها است. همان‌طور که از شکل ۲ مشاهده می‌شود، به‌جز برخی از مقادیر شدید باران که به طور طبیعی ظاهر می‌شوند، سایر داده‌های بارش در یک خوشه برای هر یک از ایستگاه‌ها قرار می‌گیرند.

1- Stacked- Long-Short Term Memory
2- Bidirectional- Long-Short Term Memory
3- Multilayer Perceptron
4- Long Short Term Memory
5- Random Tree
6- Reduced Error Pruning Tree
7- Euclidean Distance Function

جدول ۱- مشخصات آماری داده‌های بارش و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب در دوره آماری ۳۶ ساله (۲۰۲۱-۱۹۸۶)

Table 1- Statistical characteristics of precipitation data and geographical location of selected stations in the statistical period of 36 years (1986-2021)

ایستگاه (Station)	حداقل (میلی‌متر) Minimum (mm)	حداکثر (میلی‌متر) Maximum (mm)	میانگین (میلی‌متر) Mean (mm)	انحراف معیار (میلی‌متر) Standard Deviation (mm)	طول جغرافیایی (Longitude)	عرض جغرافیایی (Latitude)	ارتفاع (متر) Elevation (m)
تبریز (Tabriz)	0	58	0.71	2.50	46° 14′ 1″	38° 7′ 20″	1345
سهند (Sahand)	0	49	0.57	2.22	46° 9′ 24″	37° 55′ 25″	1695
سراب (Sarab)	0	35	0.64	2.21	47° 30′ 28″	37° 56′ 6″	1680
ارومیه (Urmia)	0	64	1.05	4.36	45° 3′ 19″	37° 39′ 29″	1328
مراغه (Maraghe)	0	79	1.24	4.33	46° 8′ 46″	37° 20′ 51″	1342
مهاباد (Mahabad)	0	68	1.07	3.88	45° 42′ 55″	36° 45′ 11″	1352

شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه به همراه همبستگی و فاصله بین ایستگاه هدف با سایر ایستگاه‌ها

Figure 1- Location of the studied stations along with the correlation and distance between the target and other stations

جدول ۲- روش‌های انتخاب سناریو و پارامترهای دخیل در آن بدون در نظر گرفتن الگوریتم مؤلفه‌های تجزیه فصلی-روند

Table 2- Scenario Selection Methods and Involved Parameters without Seasonal-Process Analysis Components

شماره سناریو (Scenario Number)	ورودی (Inputs)	روش انتخاب سناریو (Scenario selection method)
1	Sahand	Correlation Matrix
2	Sahand, Sarab	Correlation Matrix
3	Sahand, Sarab, Mahabad	Correlation Matrix
4	Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia	Correlation Matrix
5	Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia, Maraghe	Correlation Matrix
6	Sahand, Sarab, Urmia	Relief

شکل ۲- نمودار طرح خطی بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 2- Rainfall Linear Projection Graph of the studied stations

جدول ۳- روش‌های انتخاب سناریو و پارامترهای دخیل در آن با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تجزیه فصلی-روند
Table 3- Scenario selection methods and parameters involved in it considering the components of seasonal-trend analysis

شماره سناریو (Scenario Number)	ورودی (Inputs)	روش انتخاب سناریو (Scenario selection method)
1	Resid, Sahand	Correlation Matrix
2	Resid, Sahand, Sarab	
3	Resid, Sahand, Sarab, Mahabad	
4	Resid, Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia	
5	Resid, Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia, Maraghe	
6	Resid, Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia, Maraghe, Seasonal	
7	Resid, Sahand, Sarab, Mahabad, Urmia, Maraghe, Seasonal, Trend	
8	Resid, Trend, Sahand	Relief
9	Resid, Trend, Sahand, Sarab	
10	Resid, Trend, Sahand, Sarab, Seasonal	
11	Resid, Trend, Sahand, Sarab, Seasonal, Urmia	
12	Resid, Trend, Sahand, Sarab, Seasonal, Urmia, Mahabad	

مدل‌سازی با استفاده از گروه مدل‌های درختی شامل M5P، RT و REPT و روش دسته‌بندی انجام شد. بارش‌های روزانه تبریز با روش تجزیه فصلی-روند به سری اجزای خود تجزیه شدند و از مؤلفه‌های آن که شامل روند[1]، فصلی[2] و باقیمانده[3] بودند در ترکیب‌های ورودی مختلف استفاده شد (جدول ۳) تا تأثیر وجود این مؤلفه‌ها در بهبود نتایج مدل‌سازی بررسی شود. روند بارش تبریز با استفاده از نرم‌افزار Xlstat و آزمون من-کندال[4] مورد تست قرار گرفت و با قبول فرض صفر عدم وجود روند در سطح معنی‌داری ۵ درصد مشخص گردید. تجزیه فصلی- روند هم در نرم‌افزار پایتون انجام گرفت. روند، دنباله‌ای از نقاط داده را نشان می‌دهد که در یک محور زمانی پیوسته متفاوت است، در حالی که فصلی بودن یک الگوی پیوسته و منظم است و در یک بازه زمانی ثابت تکرار می‌شود.

باقیمانده، نویز یا تصادفی بودن را نشان می‌دهد.

به‌عنوان مثال در سناریو اول که بر اساس همبستگی انتخاب شده است برای پیش‌بینی بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک تبریز از مقادیر بارش روزانه ایستگاه سهند و یکی از مؤلفه‌های تجزیه بارش تبریز (باقیمانده) استفاده شد.

روش‌های مورد مطالعه

درخت تصادفی

درخت تصادفی یک طبقه‌بندی‌کننده تحت نظارت است و از یک ایده جمع‌آوری برای تولید مجموعه‌ای تصادفی از داده‌ها برای ساخت درخت تصمیم استفاده می‌کند. درختان تصادفی اساساً ترکیبی از دو

1- Trend
2- Seasonal
3- Residual
4- Mann- Kendall Tests

الگوریتم موجود در یادگیری ماشین بوده که درختان تک مدل با ایده‌های جنگل تصادفی ترکیب شده‌اند. درختان نمونه، درختان تصمیم‌گیری هستند که در آن هر برگ یک مدل خطی دارد که برای زیرفضای محلی توصیف شده توسط این برگ بهینه شده است. جنگل‌های تصادفی نشان داده‌اند که عملکرد درختان تصمیم واحد را به میزان قابل توجهی بهبود می‌بخشد (Kalmegh 2015).

مدل درختی M5P

الگوریتم M5P بازسازی منطقی و توسعه‌یافته از M5 است که توسط ونگ و ویتن در سال ۱۹۹۷ معرفی شده است. مدل درختی M5P قابلیت پیش‌بینی متغیرهای پیوسته عددی از روی صفات عددی را دارد و نتایج پیش‌بینی شده به‌صورت مدل‌های رگرسیونی خطی چندگانه در برگ‌های درخت ظاهر می‌شوند. معیار تقسیم در یک گره بر اساس انتخاب انحراف معیار مقادیر خروجی که به آن گره می‌رسند به‌عنوان معیاری از خطا است. با آزمودن هر صفت (پارامتر) در گره کاهش مورد انتظار در خطا محاسبه می‌شود (Wang and Witten, 1997).

کاهش خطای هرس درخت

REPT از منطق درخت رگرسیون استفاده می‌کند و چندین درخت را در تکرارهای مختلف ایجاد می‌کند. پس از آن بهترین درخت را از بین همه درختان تولید شده انتخاب می‌کند و به‌عنوان نماینده در نظر می‌گیرد. کاهش خطا هرس درخت، یادگیری سریع درخت تصمیم‌گیری است و بر اساس کسب اطلاعات یا کاهش واریانس، یک درخت تصمیم می‌سازد. REP فقط یک بار مقادیر صفات عددی را مرتب می‌کند (Kalmegh, 2015).

دسته‌بندی

روش دسته‌بندی که برای اولین بار توسط بریمن در سال ۱۹۹۶ ارائه شد، چندین یادگیر پایه را به صورت موازی به هم متصل می‌کند تا واریانس مجموعه را کاهش دهد. هر یادگیر پایه با استفاده از الگوریتم یادگیری یکسان بر روی یک نسخه بوت استرپ[1] آموزش می‌بینند، سپس خروجی‌های این یادگیرندگان پایه با رأی اکثریت (برای طبقه‌بندی) یا میانگین‌گیری (برای رگرسیون) برای به‌دست آوردن خروجی نهایی جمع می‌شوند. برای دستیابی به عملکرد بهتر و قوی‌تر، یادگیرندگان پایه در یک گروه باید دقیق و متنوع باشند. در ادبیات علم داده و داده‌کاوی روش دسته‌بندی یا Bagging یکی از روش‌های یادگیری جمعی (Ensemble) می‌باشد. منظور از روش دسته‌بندی یا Bagging میانگین‌گیری از نتیجه پیش‌بینی چندین روش طبقه‌بندی است تا دقت پیش‌بینی‌ها افزایش یابد. در این روش ایستگاه‌ها دسته بندی نمی شوند بلکه نتایج عددی روش‌های M5P، RT و REPT با هم ترکیب می‌شوند (Breiman, 1996).

معیارهای ارزیابی

برای مقایسه مقادیر بارش روزانه تبریز با مقادیر به‌دست آمده از مدل‌های مورد مطالعه از شاخص‌های ضریب همبستگی (R)، ریشه میانگین مربعات خطا[2] (RMSE)، ضریب نش ساتکلیف[3] (NS)، ضریب ویلموت اصلاح شده[4] (Dr) و میانگین خطای مطلق[5] (MAE) استفاده شد. بهترین مدل مربوط به مدلی با RMSE کمتر و R، NS و Dr نزدیک به یک خواهد بود. فرمول‌های آماره‌های فوق به ترتیب در روابط ۱ تا ۵ ارائه گردیده است.

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})^2.\sum_{i=1}^{N}(Y_i-\bar{Y})^2}} \quad (۱)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-Y_i)^2}{N}} \quad (۲)$$

$$NS=1-\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(X_i-Y_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i-\bar{X})^2}\right) \quad (۳)$$

$$D_i=\begin{cases} when\sum_{i=1}^{N}|Y_i-X_i|>C\sum_{i=1}^{N}|X_i-\bar{X}|\rightarrow \frac{C\sum_{i=1}^{N}|X_i-\bar{X}|}{\sum_{i=1}^{N}|Y_i-X_i|}-1 \\ when\sum_{i=1}^{N}|Y_i-X_i|\le C\sum_{i=1}^{N}|X_i-\bar{X}|\rightarrow 1-\frac{\sum_{i=1}^{N}|Y_i-X_i|}{C\sum_{i=1}^{N}|X_i-\bar{X}|} \end{cases} \quad (۴)$$

$$MAE=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{N}|Y_i-X_i| \quad (۵)$$

در روابط فوق، Y_i مقدار بارش محاسبه شده از مدل، X_i بارش مشاهداتی، N تعداد داده‌ها و C ضریبی است که از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

1- Bootstrap
2- Root Mean Square Error
3- Nash Sutcliffe
4- Refined Index of Agreement
5- Mean Absolute Error

$$\frac{1}{C}=\frac{MAE}{MAD}=\frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|X_i-Y_i\right|}{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left|X_i-\bar{X}\right|}{N}} \qquad (۶)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر برای برآورد میزان بارش روزانه تبریز در دوره آماری ۳۶ ساله از بارش‌های ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه شامل سهند، سراب، ارومیه، مراغه و مهاباد در ترکیب‌های ورودی مختلف استفاده شد. مدل‌سازی بارش با استفاده از روش‌های داده‌کاوی مبتنی بر درخت از جمله M5P، RT و REPT انجام شد. سپس تمام روش‌های استفاده شده در این مطالعه به‌عنوان الگوریتم پایه روش دسته‌بندی در نظر گرفته شد تا کارایی این روش سنجیده شود. در جهت بهبود نتایج مدل‌سازی به بررسی تأثیر مؤلفه‌های تجزیه بارش تبریز در ترکیب‌های ورودی مختلف پرداخته شد. نمودار سری زمانی داده‌های اصلی بارش تبریز به همراه اجزای تجزیه شده آن در شکل ۳ نشان داده شد.

در ابتدا، نتایج به‌دست‌آمده از ۶ سناریوی ورودی مورد استفاده در روش‌های مبتنی بر درخت به همراه روش دسته بندی در جدول ۴ نشان ارائه گردید.

با توجه به نتایج جدول ۴ روش‌های RT و REPT وقتی به‌عنوان الگوریتم پایه روش دسته‌بندی قرار گرفتند دقت مدل افزایش و خطای آن کاهش یافت. اما در مورد روش M5P این‌گونه نبود و نتایج در حد کمی ضعیف‌تر شدند. از دیگر نتایجی که از جدول فوق گرفته شد این بود که بارش تبریز تا حد زیادی تحت تأثیر بارش سهند است زیرا در اکثر مدل‌ها نتایج سناریو اول که شامل ایستگاه سهند است، نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. یکی از دلایل این دقت بالا می‌تواند همبستگی زیاد بارش تبریز با سهند باشد. هدف از به کار بردن روش‌های داده‌کاوی، آسان بودن استفاده از آن‌ها و به کار بردن پارامترهای کمتر به‌عنوان ورودی مدل است. برای این‌که از بین تمام روش‌های استفاده شده، سناریو برتر انتخاب شود از نمودار راداری (شکل ۴) استفاده شد.

شکل ۳- نمودار سری زمانی بارش روزانه تبریز به همراه مؤلفه‌های تجریه شده آن

Figure 3- Tabriz daily rainfall time series diagram with its components

جدول ۴- معیارهای ارزیابی روش‌های مبتنی بر درخت و رو ش دسته‌بندی براساس سناریوهای تعریف شده بدون مؤلفه‌های تجزیه فصلی-روند

Table 4- Evaluation criteria for tree-based and bagging methods based on defined Scenarios without seasonal analysis components - trend

Scenario	روش (Method)														
	M5P					RT					REPT				
	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE
1	0.85	1.54	0.69	0.79	0.58	0.75	1.82	0.56	0.75	0.63	0.80	1.70	0.62	0.78	0.59
2	0.84	1.56	0.68	0.79	0.57	0.63	2.23	0.35	0.69	0.70	0.78	1.75	0.59	0.80	0.56
3	0.83	1.58	0.67	0.80	0.55	0.60	2.34	0.28	0.69	0.70	0.77	1.77	0.59	0.79	0.57
4	0.82	1.59	0.67	0.79	0.57	0.65	2.16	0.39	0.72	0.67	0.78	1.72	0.61	0.80	0.56
5	0.82	1.60	0.66	0.79	0.57	0.69	2.07	0.44	0.71	0.68	0.78	1.72	0.61	0.80	0.56
6	0.83	1.58	0.67	0.79	0.57	0.64	2.20	0.36	0.70	0.68	0.78	1.74	0.60	0.80	0.55
Scenario	B-M5P					B-RT					B-REPT				
	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE
1	0.85	1.55	0.68	0.78	0.58	0.76	1.81	0.57	0.75	0.63	0.81	1.67	0.63	0.77	0.59
2	0.84	1.57	0.68	0.78	0.58	0.71	1.95	0.50	0.74	0.64	0.79	1.72	0.61	0.79	0.57
3	0.83	1.60	0.66	0.78	0.59	0.75	1.82	0.56	0.79	0.58	0.80	1.68	0.63	0.81	0.54
4	0.83	1.58	0.67	0.79	0.57	0.78	1.73	0.61	0.80	0.55	0.81	1.64	0.64	0.82	0.53
5	0.80	1.67	0.63	0.58	0.58	0.79	1.68	0.63	0.81	0.55	0.81	1.65	0.64	0.82	0.53
6	0.83	1.57	0.67	0.79	0.57	0.78	1.72	0.61	0.80	0.56	0.80	1.67	0.63	0.81	0.54

شکل ۴- نمودار راداری ضریب همبستگی برای روش‌های مورد مطالعه

Figure 4- Radar diagram of correlation coefficient for the studied methods

نمودار راداری، ۶ ضلعی مربوط به همبستگی بین بارش مشاهداتی و محاسبه شده از مدل‌ها را نشان می‌دهد. نزدیک بودن رأس‌های ۶ ضلعی رسم شده به رأس‌های ۶ ضلعی بیرونی نشان‌دهنده بالا بودن مقدار همبستگی است. بنابراین نتیجه گرفته شد که در روش M5P، RT، REPT و B-M5P سناریو اول (سهند)، در روش B-RT سناریو پنجم (سهند، سراب، ارومیه، مراغه و مهاباد) به‌عنوان سناریوهای برتر شناخته شدند که بقیه معیارهای ارزیابی نیز بیانگر برتر بودن این سناریوها بود. در روش B-REPT با توجه به یکسان بودن ضریب همبستگی، معیارهای RMSE، MAE، Dr و NS در نظر گرفته شده و سناریو چهارم (سهند، سراب، ارومیه و مهاباد) به‌عنوان سناریو برتر

انتخاب شد. برای داشتن تصور بصری بهتری از نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی، دیاگرام تیلور برای سناریوهای برتر ترسیم شد (شکل ۵). دیاگرام تیلور نموداری دو بعدی است که سه آماره روی آن نشان داده می‌شود. این دیاگرام می‌تواند یک خلاصه آماری مختصر از این‌که چگونه مدل‌ها از نظر همبستگی، انحراف ریشه میانگین مربع و انحراف استاندارد با یکدیگر مطابقت دارند ارائه دهد.

با توجه به شکل ۵ بهترین عملکرد، مربوط به سناریو ۱ مدل درخت تصمیم M5P و روش دسته‌بندی با الگوریتم پایه M5P با اختلاف بسیار کم بود.

شکل ۵- دیاگرام تیلور سناریوهای برتر قبل از تجزیه

Figure 5- Taylor diagram of top scenarios before analysis

جدول ۵- معیارهای ارزیابی روش‌های مبتنی بر درخت و روش دسته بندی براساس سناریوهای تعریف شده با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تجزیه فصلی-روند

Table 5- Evaluation criteria for tree-based methods and bagging methods based on defined Scenarios considering seasonal analysis components – trend

Scenario	روش (Method)														
	M5P					RT					REPT				
	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE
1	0.97	0.72	0.93	0.98	0.16	0.95	0.89	0.90	0.97	0.22	0.89	1.25	0.79	0.97	
2	0.97	0.72	0.93	0.98	0.16	0.95	0.90	0.89	0.97	0.22	0.94	0.92	0.89	0.98	0.20
3	0.97	0.72	0.93	0.98	0.16	0.95	0.91	0.89	0.97	0.21	0.94	0.91	0.89	0.98	0.20
4	0.97	0.71	0.93	0.98	0.16	0.95	0.90	0.89	0.97	0.22	0.94	0.92	0.89	0.98	0.20
5	0.97	0.71	0.93	0.98	0.16	0.94	0.96	0.88	0.97	0.22	0.94	0.91	0.89	0.98	0.20
6	0.96	0.75	0.93	0.99	0.11	0.95	0.88	0.90	0.98	0.18	0.95	0.89	0.90	0.99	0.15
7	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.95	0.86	0.90	0.98	0.16	0.95	0.89	0.90	0.99	0.14
8	0.96	0.80	0.92	0.98	0.17	0.94	0.92	0.89	0.97	0.22	0.94	0.92	0.89	0.97	0.20
9	0.96	0.80	0.92	0.98	0.16	0.95	0.89	0.90	0.97	0.21	0.94	0.92	0.89	0.97	0.20
10	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.95	0.85	0.91	0.98	0.16	0.95	0.89	0.90	0.99	0.14
11	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.94	0.95	0.88	0.98	0.17	0.95	0.89	0.90	0.99	0.14
12	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.95	0.92	0.89	0.98	0.18	0.95	0.89	0.90	0.99	0.14
Scenario	B-M5P					B-RT					B-REPT				
	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE	R	RMSE	NS	Dr	MAE
1	0.98	0.61	0.95	0.98	0.16	0.95	0.88	0.90	0.97	0.20	0.95	0.90	0.89	0.98	0.19
2	0.94	0.93	0.89	0.98	0.17	0.95	0.86	0.90	0.98	0.19	0.95	0.89	0.89	0.98	0.19
3	0.94	0.93	0.89	0.98	0.17	0.95	0.87	0.90	0.98	0.19	0.95	0.90	0.89	0.98	0.19
4	0.95	0.88	0.90	0.98	0.17	0.95	0.86	0.90	0.98	0.18	0.95	0.90	0.89	0.98	0.19
5	0.95	0.88	0.90	0.98	0.17	0.96	0.84	0.91	0.98	0.18	0.95	0.90	0.89	0.98	0.19
6	0.96	0.74	0.93	0.99	0.11	0.96	0.84	0.91	0.99	0.15	0.95	0.88	0.90	0.99	0.14
7	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.96	0.86	0.90	0.99	0.15	0.95	0.88	0.90	0.99	0.14
8	0.96	0.82	0.91	0.98	0.17	0.96	0.82	0.91	0.98	0.18	0.95	0.89	0.89	0.98	0.19
9	0.96	0.81	0.91	0.98	0.17	0.95	0.88	0.90	0.98	0.19	0.95	0.89	0.89	0.98	0.19
10	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.96	0.84	0.91	0.99	0.13	0.95	0.87	0.90	0.99	0.14
11	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.95	0.85	0.90	0.99	0.14	0.95	0.87	0.90	0.99	0.14
12	0.96	0.74	0.93	1.00	0.08	0.95	0.88	0.90	0.98	0.16	0.95	0.88	0.90	0.99	0.14

زیرا مقدار انحراف استاندارد داده‌های مشاهداتی و انحراف استاندارد داده‌های برآورد شده از مدل، نزدیک به هم بوده و نتایج قابل قبولی را ارائه کرده است. به‌صورت کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش دسته‌بندی باعث افزایش دقت پیش‌بینی‌ها می‌گردد.

طبق ترکیب‌های ورودی جدول ۳، مدل‌سازی با در نظر گرفتن مؤلفه‌های تجزیه در کنار ایستگاه‌های مورد مطالعه انجام شده و معیارهای ارزیابی در جدول ۵ ارائه شد.

در این مطالعه نتایج مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن مؤلفه‌های تجزیه با مدل‌سازی همراه با مؤلفه‌های تجزیه با هم مقایسه شدند. نتایج حاکی از آن بود که اضافه شدن مؤلفه‌های فصلی، روند و باقیمانده به ترکیب‌های ورودی مدل‌سازی باعث بهبود چشمگیر نتایج می‌شود. همچنین استفاده از روش دسته‌بندی نیز در اکثر موارد دقت مدل‌سازی را بیشتر کرد. با در نظر گرفتن تمام معیارهای ارزیابی، سناریوهای برتر مدل‌سازی‌های فوق نیز انتخاب و روی نمودار تیلور نشان داده شد. در صورت مشابه بودن معیارهای ارزیابی، تعداد پارامترهای ورودی مد نظر قرار گرفت چرا که کم بودن تعداد پارامتر ورودی باعث ساده و قابل فهم بودن مدل می‌شود (شکل ۶).

با توجه به شکل ۶ در روش‌های M5P و B-M5P سناریو اول (سهند و باقیمانده)، در روش‌های RT، REPT و B-REPT سناریو دهم (باقیمانده، روند، فصلی، سهند و سراب) و در روش B-RT سناریو هشتم (باقیمانده، روند و سهند) به‌عنوان سناریوهای برتر انتخاب شدند. در نتیجه از بین ایستگاه‌های مورد مطالعه ایستگاه سهند به خاطر نزدیکی و همبستگی زیاد و سراب به دلیل همبستگی بیشتر بر روی بارش تبریز تأثیر زیادی می‌گذارند. در حالت کلی روش دسته‌بندی با الگوریتم پایه M5P (B-M5P) در سناریو اول بهترین عملکرد را داشته است. پس می‌توان نتیجه گرفت که هم اضافه کردن مؤلفه‌های تجزیه بارش و هم استفاده از روش دسته‌بندی، نتایج مدل‌سازی با روش‌های داده‌مبنای مبتنی بر درخت را بهبود داده است.

در شکل ۷ نمودار سری زمانی بهترین روش (B-M5P1) نشان داده شده است.

شکل ۶- دیاگرام تیلور سناریوهای برتر بعد از تجزیه

Figure 6- Taylor diagram of top scenarios after analysis

شکل ۷- نمودار سری زمانی روش B-M5P1

Figure 7- Time series diagram of B-M5P1 method

با توجه به شکل ۷ نتیجه گرفته شد که مدل به خوبی توانسته است مقادیر بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک تبریز را برآورد کند.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر به برآورد میزان بارش روزانه تبریز در دوره آماری ۳۶ ساله (۲۰۲۱-۱۹۸۶) پرداخته شد. برای مدل‌سازی از مقادیر بارش ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه از جمله سهند، سراب، ارومیه، مراغه و مهاباد استفاده شد. روش‌های مورد استفاده در مطالعه حاضر شامل گروه روش‌های داده‌مبنای مبتنی بر درخت M5P، درخت تصادفی، کاهش خطای هرس درخت و روش دسته‌بندی بود. از مؤلفه‌های تجزیه فصلی- روند در کنار ایستگاه‌های مذکور، در ترکیب‌های ورودی مختلف استفاده شد تا تأثیر این مولفه‌ها در بهبود نتایج بررسی شود.

قبل از تجزیه مقادیر بارش تبریز و استفاده از این مؤلفه‌ها در مدل‌سازی، در اکثر موارد سناریو اول شامل بارش ایستگاه سهند به‌عنوان سناریو برتر شناسایی شد. از بین روش‌های مورد مطالعه نیز روش درخت تصمیم M5P و B-M5P با نتایج نزدیک به هم به‌عنوان دقیق‌ترین مدل معرفی شدند. پس از اضافه کردن مؤلفه‌های روند، فصلی و باقیمانده به ترکیب‌های ورودی، دقت مدل‌ها به‌صورت چشمگیری افزایش یافت و روش B-M5P1 شامل باقیمانده و بارش سهند به‌عنوان سناریو و روش برتر انتخاب شد. در حالت کلی نتیجه گرفته شد که استفاده از روش دسته‌بندی و مؤلفه‌های تجزیه بارش باعث بهبود نتایج مدل‌سازی می‌شود. بارش ایستگاه سهند به‌عنوان ایستگاهی با نزدیک‌ترین فاصله از تبریز و دارای بیشترین همبستگی با بارش تبریز یکی از مؤثرترین پارامترهای ورودی در مدل‌سازی بود. بقیه روش‌ها و سناریوهای استفاده شده نیز دقت قابل قبولی داشتند، لذا در صورت داشتن اطلاعات بارش سایر ایستگاه‌ها می‌توان از آن روش‌ها و ورودی‌ها نیز بهره جست. با توجه به نتایج مطالعه حاضر پیشنهاد می‌گردد برای برآورد میزان بارش یک ایستگاه از مقادیر بارش نزدیک‌ترین ایستگاه استفاده گردد به دلیل اینکه کم بودن فاصله، در اکثر مواقع باعث مشابهت در شرایط اقلیمی دو ایستگاه گردیده و باعث همبستگی بیشتر بین بارش ایستگاه‌ها می‌شود.

منابع

1. Adnan A., Yolanda A. M., and Natasya F. 2021. A comparison of bagging and boosting on classification data: Case study on rainfall data in Sultan Syarif Kasim II meteorological station in Pekanbaru. Journal of Physics. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2049/1/012053.
2. Asakereh H., and Akbarzadeh Y. 2017. Simulation of temperature and precipitation changes of Tabriz Synoptic Station using statistical downscaling and Canesm2 climate change model output. Journal of Geography and Environmental Hazards 21: 153-174. https://doi.org/10.22067/GEO.V6I. (In Persian with English abstract)
3. Barrera A., Oyedele L., Bilal M., Akinosho T., Delgado J., and Akanbi L. 2022. Rainfall prediction: A comparative analysis of modern machine learning algorithms for time-series forecasting. Machine Learning with Applications 7. https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2021.100204.
4. Breiman L. 1996. Bagging predictors. Machine Learning 24: 123–140.
5. Bushara N., and Abraham A. 2015. Novel Ensemble Method for Long Term Rainfall Prediction. International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications 7: 116-130.
6. Cabezuelo A. 2022. Prediction of Rainfall in Australia Using Machine Learning. Information 13(163). https://doi.org/10.3390/info13040163.
7. Choubin B., Zehtabian Gh., Azareh A., Rafiei-Sardooi E., Sajedi-Hosseini F., and Kisi O. 2018. Precipitation forecasting using classification and regression trees(CART) model: a comparative study of different approaches. Environmental Earth Sciences. https://doi.org/10.1007/s12665-018-7498-z.
8. Dastourani M. T., Habibipoor A., Ekhtesasi M. R., Talebi A., and Mahjoobi J. 2013. Evaluation of the Decision Tree Model in Precipitation Prediction (Case study: Yazd Synoptic Station). Iran-Water Resources Research 8(3): 14-27. (In Persian with English abstract)
9. Endalie D., Hailea G., and Taye W. 2022. Deep learning model for daily rainfall prediction: case study of Jimma, Ethiopia. Water Supply 3(22). https://doi.org/10.2166/ws.2021.391.
10. Kalmegh S. 2015. Analysis of WEKA Data Mining Algorithm REPTree, Simple Cart and RandomTree for Classification of Indian News. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology 2: 438-446.
11. Kira K., and Rendell L.A. 1992. The feature selection problem: Traditional methods and a new algorithm. AAAI-92 Proceedings of the tenth national conference on Artificial intelligence 129-134.
12. Liyew M., and Melese H. 2021. Machine learning techniques to predict daily rainfall amount. Journal of Big Data 8(153). https://doi.org/10.1186/s40537-021-00545-4.
13. Mishra N., Soni H., Sharma S., and Upadhyay A. 2017. A Comprehensive survey of data mining techniques on time series data for rainfall prediction. Journal of ICT Research and Applications 11(2): 168-184. https://doi.org/10.5614/ itbj.ict.res.appl.2017.11.2.4.

14. Nagahamulla H., Ratnayake U., and Ratnaweera A. 2014. Selecting most suitable members for neural network ensemble rainfall forecasting model. Recent Advances on Soft Computing and Data Mining 591–601. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07692-8_56.
15. Omidvar K., and Azhdarpoor M. 2013. Comparison of artificial neural network and HEC-HMS model in assessment- runoff in Herat Azam catchment river. Geographical Research Quarterly 4: 139-159. (In Persian)
16. Omidvar K., Shafie Sh., Taghizade Z., and Alipoor M. 2014. Evaluating the efficiency of the decision tree model in predicting rainfall in Kermanshah synoptic station. Journal of Applied Research in Geographical Sciences 14(34): 89-110. (In Persian)
17. Sattari M.T., and Nahrein F. 2014. Monthly rainfall prediction using Artificial Neural Networks and M5 model tree (Case study: Station s of Ahar and Jolfa). Journal of Irrigation and Water Engineering 4(14): 83-98. (In Persian with English abstract)
18. Sattari M. T., Falsafian K., Irvem A., Shahab S., and Qasem S. 2020. Potential of kernel and tree-based machine-learning models for estimating missing data of rainfall. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 14(1): 1078-1094. https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1803971.
19. Tahroudi M., Ahmadi F., and Khalili K. 2017. Evaluation the Trend and Trend Chang Point of Urmia Lake Basin Precipitation. Journal of Water and Soil 31: 644-659. https://doi.org/10.22067/JSW.V31I2.55338. (In Persian with English abstract)
20. Wang Y., and Witten I.H. 1997. "Inducing model trees for continuous classes", in Proceedings of the Ninth European Conference on Machine Learning. Prague, Czech Republic: Springer 128-137.
21. Yobero C. 2018. Determining Creditworthiness for Loan Applications Using C5.0 Decision Trees. RPubs by RStudio.
22. Yu N., and Haskins T. 2021. Bagging Machine Learning Algorithms: A Generic Computing Framework Based on Machine-Learning Methods for Regional Rainfall Forecasting in Upstate New York. Informatics 8 (47). https://doi.org/10.3390/informatics8030047.
23. Zhou Z.H. 2012. Ensemble Methods: Foundations and Algorithms (New York (US): Chapman & Hall/CRC Press).

Contents

Efficiency of Aquacrop Model in Simulating Yield of Quinoa in Different Deficit Irrigation Managements 319
M.R. Emdad, A. Tafteh, N. Ebrahimipak
Evaluation of Different Levels of Drip Irrigation Water on Yield and Yield Components in Canola 337
N. Salamati, A. Danaie, V. Yaaghoobi
Optimization and Feasibility of Using Rainwater Harvesting Systems in Ardabil 351
H. Shokati, Z. Sojoodi, M. Mashal
Evaluation of Nutritional Status of Hamedan Province Grape Fields by Compositional Nutrient Diagnosis Method 365
R. Motalebifard
Effect of Zinc Oxide Nano-Particles (ZnO) on some Physical and Chemical Properties of Soils with Different Textures 377
S. Rezaei, H. Bayat
The Effect of Cadmium Pollution on Clay Minerals Transformation in Wheat Rhizospheric Soil 393
P. Kabiri Samani, M.H. Salehi, H. Motaghian
Tabriz Daily Rainfalls Modeling via Hybridized Tree Based and Seasonal-Trend Component Bagging Method 407
S. Javidan, M.T. Sattari, Sh. Mohsenzadeh

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36 No. 3 2022

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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