

عنوان مقالات

- تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر برای یک حوضه آبریز کوهستانی (مطالعه موردی حوضه رودخانه کرج)..... ۱۶۹
شاهین نوری نژاد- محمد مهدی رجبی- تورج فتحی
- بررسی تاثیر تاریخ کشت روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آفتابگردان با استفاده از مدل AquaCrop..... ۱۸۷
بهناز صادقی- بهمن فرهادی بانسوله- علی بافکار- مختار قبادی
- ارزیابی وضعیت آبی و مراحل بحرانی آن در ژنوتیپ‌های جو (*Hordeum vulgare*) دیم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)..... ۱۹۹
ولی فیضی اصل
- بررسی شست و شوی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات..... ۲۱۷
الهام اسراری- حامد طالبی
- بررسی اثر کود سوپرفسفات تریپل و شوری آب آبیاری بر تحرک و جذب کادمیم خاک..... ۲۲۷
امیر مصلحی- محمد فیضیان
- بررسی کارایی روش TOPSIS در اولویت‌بندی اراضی برای کشت زعفران..... ۲۳۹
مهناز اسکندری- علی زین الدینی میمند- میرناصر نویدی- آناهید سلمان‌پور
- سینتیک و ترمودینامیک جذب فسفر در یک خاک رسی تحت تأثیر پارامترهای محیطی مختلف..... ۲۵۳
بهروش کمالی- عباس ستوده‌نیا- علی مهدوی مزده
- تغییر شاخص‌های مغناطیسی و اکسیدهای آهن خاک در پی تغییر کاربری (مطالعه موردی: دشت مختار استان کهگیلویه و بویراحمد)..... ۲۶۹
حمیدرضا اولیایی- ابراهیم ادهمی- مهدی نجفی قیری
- بررسی کارایی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در تخمین برخی ویژگی‌های خاک منطقه‌ی سمیرم اصفهان..... ۲۸۵
فاطمه رحمتی- سعید حجی- کاظم رنگزن- احمد لندی
- پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه مبتنی بر تصاویر دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک..... ۳۰۳
محمد فشانی- سیدحسین ثنائی نژاد- مرجان قوچانیان

Contents

- Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment)..... 167
S. Nourinezhad, M.M. Rajabi, T. Fathi
- Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model..... 185
B. Sadeghi, B. Farhadi Bansouleh, A. Bafkar, M. Ghobadi
- Assessment of Water Status and Its Critical Stages in Dryland Barley Genotypes (*Hordeum vulgare*) Using Crop Water Stress Index (CWSI)..... 197
V. Feiziasl
- Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate..... 215
E. Asrari, H. Talebi
- Assessment of Triple Super Phosphate Fertilizer and Irrigation Salinity Effects on Soil Cadmium Mobility and Absorption 225
A. Moslehi, M. Feizian
- Evaluating TOPSIS Method in Prioritizing Lands for Saffron Cultivation 237
M. Eskandari, A. Zeinadini, M.N. Navidi, A. Salmanpour
- Kinetics and Thermodynamics of Phosphorus Adsorption onto a Clay Soil Influenced by Various Environmental Parameters..... 251
B. Kamali, A. Sotoodehnia, A. Mahdavi Mazdeh
- Changes in Soil Magnetic Properties and Iron Oxides Following Land Use Change (Case Study: Mokhtar Plain, Kohgilouye Province)..... 267
H.R. Owliaie, E. Adhami, M. Najafi Ghiri
- Investigating the Efficiency of Visible-Near Infra-Red (NIR) Spectrometry to Estimate Selected Soil Properties in Semirom Area, Isfahan..... 283
F. Rahmati, S. Hojati, K. Rngzan, A. Landi
- Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture 301
M. Fashae, S.H. Sanaei-Nejad, M. Quchanian

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 36 شماره 2 خرداد - تیر 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 ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

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

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمالي، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدي، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jsa3@um.ac.ir

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

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



مندرجات

- 169 تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر برای یک حوضه آبریز کوهستانی (مطالعه موردی حوضه رودخانه کرج)
شاهین نوری نژاد - محمد مهدی رجبی - تورج فتحی
- 187 بررسی تأثیر تاریخ کشت روی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آفتابگردان با استفاده از مدل AquaCrop
بهناز صادقی - بهمن فرهادی بانسوله - علی بافکار - مختار قبادی
- 199 ارزیابی وضعیت آبی و مراحل بحرانی آن در ژنوتیپ‌های جو (*Hordeum vulgare*) دیم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)
ولی فیضی اصل
- 217 بررسی شست و شوی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات
الهام اسراری - حامد طالبی
- 227 بررسی اثر کود سوپرفسفات تریپل و شوری آب آبیاری بر تحرک و جذب کادمیم خاک
امیر مصلحی - محمد فیضیان
- 239 بررسی کارآیی روش TOPSIS در اولویت‌بندی اراضی برای کشت زعفران
مهناز اسکندری - علی زین الدینی میمند - میرناصر نویدی - آناهید سلمان پور
- 253 سینتیک و ترمودینامیک جذب فسفر در یک خاک رسی تحت تأثیر پارامترهای محیطی مختلف
بهنوش کمالی - عباس ستوده نیا - علی مهدوی مزده
- 269 تغییر شاخص‌های مغناطیسی و اکسیدهای آهن خاک در پی تغییر کاربری (مطالعه موردی: دشت مختار استان کهگیلویه و بویراحمد)
حمیدرضا اولیایی - ابراهیم ادهمی - مهدی نجفی قیری
- 285 بررسی کارایی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در تخمین برخی ویژگی‌های خاک منطقه‌ی سمیرم اصفهان
فاطمه رحمتی - سعید حجتی - کاظم رنگزن - احمد لندی
- 303 پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه مبتنی بر تصاویر دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک
محمد فشانی - سیدحسین ثنائی نژاد - مرجان قوچانیان



Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment)

S. Nourinezhad¹, M.M. Rajabi^{2*}, T. Fathi³

Received: 16-10-2021

Revised: 04-01-2022

Accepted: 10-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Nourinezhad S., Rajabi M.M., and Fathi T. 2022. Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment). Journal of Water and Soil 36(2): 167-183. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.72912.1100](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.72912.1100)

Introduction

Simulation of quantity and quality of surface runoff in mountainous watersheds is one of the most challenging topics in modeling due to its unique features, such as unusual topography and complex hydrological processes. One of the lesser-known aspects of modeling such catchments is the uncertainty analysis of water quality predictions, especially about the vital phosphorus parameter. Phosphorus is one of the important quality variables in water, and its increase in water resources can cause eutrophication phenomena in streams and reservoirs of dams. Due to the importance of the phosphorus parameter and the fact that water quality modeling has not been employed in the Karaj catchment area so far, in this research, total phosphorus has been modeled as a water quality parameter along with the flow and sediment discharge. This study aims to identify the most sensitive parameters of the model to flow, sediment, and total phosphorus discharge and calibrate, validate and analyze the parametric uncertainty of the SWAT model in predicting these three variables in a mountainous catchment. The case study was the catchment area of the Karaj River upstream of Bileqan pond, which is one of the mountainous watersheds in Iran. There are two critical water structures along the Karaj River, namely Amirkabir dam and Bileqan pond. Amirkabir dam (Karaj) is a multi-purpose project that is constructed to supply drinking water to Tehran and regulate water for irrigation and agriculture in the suburbs of Karaj. The Bileqan pond is also the essential point of supply and transfer of drinking water in Tehran. Given the importance of this region in supplying water for different uses, providing a calibrated model for quantitative and qualitative variables of water can be the basis for decisions to apply future management scenarios in this basin.

Materials and Methods

The case study was the Karaj River catchment area upstream of Bileqan Basin, which with an average height of 2880 meters, is one of the mountainous areas located in the Alborz Mountains. This basin with an area of 1076 square kilometers in the north, includes parts of Mazandaran province. In the east and south of the catchment area includes parts of Tehran province and most of it is located in Alborz province. The average annual temperature and rainfall in this basin are 12.1 °C and 480 mm, respectively, and the average of 117 glacial days during the year is observed in this area. The long-term daily data of synoptic stations adjacent to the study area from the beginning of 1998 to the end of 2018 (21 years in total) was introduced to the model. Also, daily data of relative humidity, rainfall, minimum and maximum temperature, solar radiation hours, and wind speed as meteorological parameters measured at stations in the study area were introduced to the model. It

1 and 2- M.Sc. Graduate of Environmental Engineering and Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mmrajabi@modares.ac.ir)

3- Deputy Manager of the Water and Soil Office, Department of Environment, Tehran, Iran

should be noted that there was a lot of missing data in meteorological information, especially for daily temperature data. In addition to the above information, daily flow data discharged from Amirkabir dam and technical specifications of the dam were introduced to the model. In addition, orchard management information, including irrigation periods and information related to phosphate fertilizers used in regional orchards, were presented to the model. The global sensitivity analysis method was used to determine the sensitive parameters of the model. Furthermore, the SUFI2 algorithm was used in SWAT_CUP software to calibrate and analyze the parametric uncertainty of the SWAT model. This algorithm quantifies the output uncertainty by 95% prediction uncertainty boundaries.

Results and Discussion

According to the results of sensitivity analysis, the parameters Baseflow alpha-factor (ALPHA_BF), Manning's "n" value for overland flow (OV_N), and Precipitation Laps rate (PLAPS) were the most sensitive parameters to flow, sediment, and total phosphorus, respectively. The best Nash-Sutcliffe (NS) coefficients for runoff, sediment, and total phosphorus simulation obtained in all stations and after full calibration and validation periods were equal to 0.76, 0.56, and 0.92, respectively. Simulation of the peak points of the diagram of all three quantities was also associated with increased uncertainty and decreased model prediction accuracy, but due to the placement of more than 70% of the measured runoff and sediment values and nearly 60% of the measured total phosphorus values in the prediction uncertainty boundaries generated by SUFI2 algorithm the final value of the parameters used in the calibration process can be appropriate for simulating future scenarios in similar mountain catchments. The main weakness of the model is simulating the peak points of flow and sediment discharge. In the case of flow and sediment discharge, the liability of modeling can be generalized due to the lack of accurate prediction of the snowmelt inflow to the river in spring, which begins to increase in February and reaches the peak point in May. A considerable number of missing data in meteorological stations can effectively reflect the lack of accurate model prediction at the peak points. In this region, missing daily temperature data compared to other meteorological parameters has been significant. The dependency of the SWAT model on many experimental and quasi-experimental models such as SCS-CN and MUSLE can be another factor affecting the weakness in predicting the peak points of the sediment discharge, as well.

Conclusion

According to the uncertainty analysis results, most of observed flow, sediment and total phosphorus discharge values were within the uncertainty prediction boundaries generated by the SUFI2 algorithm. The NS coefficient for all three variables has met the satisfactory modeling threshold. Therefore, it seems that the sensitive parameters identified and used in the calibration process in this study and their final values can be appropriate for modeling future scenarios for this study area and similar mountain catchments. One of the limitations of the present study was a large number of missing data in meteorological stations, especially for the temperature variable. Thus, providing required measured meteorological data to the model may enhance the simulation, especially at peak points.

Keywords: Calibration, Prediction, SUFI2, Semi-distributed Model, Water Quality

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۱۸۳-۱۶۷

تحلیل حساسیت و عدم قطعیت مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر برای یک حوضه آبریز کوهستانی (مطالعه موردی حوضه رودخانه کرج)

شاهین نوری نژاد^۱ - محمد مهدی رجبی^{۲*} - تورج فتحی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

شبیه‌سازی کمیت و کیفیت رواناب‌های سطحی در مناطق کوهستانی، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد این گونه حوضه‌های آبریز مانند تأثیر قابل توجه برف بر رژیم جریان، تغییرات زیاد پارامترهای هواشناسی به واسطه تغییر ارتفاع، نرخ بالای فرسایش و کمبود اطلاعات ناشی از مشکلات دسترسی فیزیکی، یکی از موضوعات چالش برانگیز در حوزه مدل‌سازی حوضه‌های آبریز محسوب می‌شود. یکی از مواردی که کمتر در خصوص مدل‌سازی این گونه حوضه‌ها به آن پرداخته شده، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پیش‌بینی‌های مرتبط با کیفیت آب، به ویژه در ارتباط با پارامتر مهم فسفر است. هدف از انجام این تحقیق واسنجی، اعتبارسنجی، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت پارامتری مدل SWAT در پیش‌بینی دبی جریان، رسوب و فسفر کل در یک حوضه آبریز کوهستانی است. مطالعه موردی در حوضه آبریز رودخانه کرج در بالادست آبگیر بیلقان انجام شده و الگوریتم SUFI2 برای انجام تحلیل عدم قطعیت مورد استفاده قرار گرفته است. بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی، ضریب زبری رواناب سطحی و آهنگ افزایش بارش به ترتیب حساس‌ترین پارامترهای مدل نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل بودند. بهترین ضرایب نش-ساتکلیف (NS) مربوط به شبیه‌سازی رواناب، رسوب و فسفر کل در همه ایستگاه‌ها و در مجموع دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی، به ترتیب برابر با ۰/۷۶، ۰/۵۶ و ۰/۹۲ بدست آمد. همچنین شبیه‌سازی نقاط اوج نمودار هر سه کمیت مذکور با افزایش عدم قطعیت و کاهش دقت پیش‌بینی مدل همراه بوده، اما با توجه به قرارگیری بالای ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و رسوب و نزدیک به ۶۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر کل در بازه عدم قطعیت پیش‌بینی تولید شده توسط الگوریتم SUFI2، محدوده پارامترهای مورد استفاده در واسنجی مدل می‌تواند الگوی مناسبی برای شبیه‌سازی سناریوهای آبی در حوضه‌های آبریز کوهستانی مشابه باشد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی، کیفیت آب، مدل نیمه‌توزیعی، واسنجی، SUFI2

مقدمه

در دو دهه اخیر مدل‌های نیمه‌توزیعی هیدرولوژی و کیفیت آب به

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی محیط زیست و استادیار گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

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

۳- معاون دفتر حفاظت و مدیریت زیست محیطی آب و خاک سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.72912.1100

طور وسیع برای تصمیم‌سازی جهت مدیریت حوضه‌های آبریز، و پیش‌بینی اثر وقایع طبیعی و فعالیت‌های انسانی بر کمیت و کیفیت آب به کار گرفته شده‌اند. یکی از پرکاربردترین مدل‌ها در این زمینه، مدل SWAT است (Arnold et al., 1998). نتایج تحقیقات پیشین حاکی از عملکرد مطلوب مدل SWAT در شبیه‌سازی فرایندهای مختلف از جمله انتقال رواناب سطحی، رسوب و پارامترهای کیفی در مقیاس‌های مختلف بوده است (Abbaspour et al., 2007; Niraula et al., 2013; Lamba et al., 2016). در مدل SWAT تعداد زیادی پارامتر ورودی وجود دارد که بسیاری از آن‌ها یا اساساً به شکل مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، و یا اطلاعات مناسب برای

توصیف کامل تغییر آن‌ها در سطح حوضه آبریز عموماً وجود ندارد (Talebizadeh et al., 2010) و لذا آنچه که به عنوان ورودی مدل به کار گرفته می‌شود، تنها تخمینی از مقادیر این‌گونه پارامترهاست؛ بنابراین تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT به منظور ارزیابی کارایی نتایج آن در شبیه‌سازی‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است.

شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز کوهستانی با استفاده از مدل‌های نیمه‌توزیعی مانند SWAT، به چند دلیل یکی از موضوعات چالش‌برانگیز در حوزه مدل‌سازی محسوب می‌شود (Viviroli et al., 2007; Wu et al., 2015; Hasan and Noor et al., 2014; Pradhanang, 2017). نخست اینکه تغییرات مکانی پارامترهای هواشناسی مانند بارش و دما، به دلیل تغییر زیاد ارتفاع در سطح حوضه‌های آبریز کوهستانی، اغلب بسیار بیشتر از دشت‌ها و مناطق کم‌ارتفاع است که این موضوع تأثیرات قابل توجه در پیچیده‌تر شدن فرایندهای هیدرولوژیکی دارد (Kalra Kulkarni et al., 2010; and Ahmad, 2011; Singh and Goyal, 2016). دوم اینکه ذوب برف در ارتفاعات منشأ مهم ایجاد رواناب‌های فصلی است و تأثیر زیادی در رژیم فصلی جریان آب دارد (Li and Williams, 2008; Grusson et al., 2015). این موضوع نیز شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های رایج هیدرولوژیکی را با محدودیت مواجه می‌سازد (Rahman et al., 2013). سوم اینکه مناطق کوهستانی نسبت به سایر نواحی با خطر فرسایش جدی‌تری مواجه هستند (Prasannakumar et al., 2012) و سرعت فرسایش و انتقال رسوب در رودخانه‌های کوهستانی بسیار بالاست که زمینه‌ساز افزایش غلظت آلاینده‌هایی مانند فسفر می‌باشد (Navratil et al., 2011; Wu et al., 2013). کمبود اطلاعات ناشی از دشواری دسترسی فیزیکی نیز چهارمین عامل چالش‌برانگیز در مدل‌سازی حوضه‌های آبریز کوهستانی بشمار می‌رود.

به واسطه این دلایل، پژوهش‌های متعددی در سال‌های اخیر به طور خاص به بحث مدل‌سازی نیمه‌توزیعی حوضه‌های آبریز کوهستانی پرداخته‌اند (Andrianaki et al., Wang et al., 2018; Zhang et al., 2020; Jeong et al., 2019). و به کمک این پژوهش‌ها، از یک سو دانش مدل‌سازی حوضه‌های آبریز کوهستانی پیشرفت نموده، و از سوی دیگر محدودیت‌های مدل‌های رایج مانند SWAT در شبیه‌سازی این‌گونه حوضه‌های آبریز نمایان شده است. یکی از خلاءهایی که در مطالعات قبلی وجود دارد، عدم توجه به بحث تحلیل حساسیت و تحلیل عدم قطعیت پارامتر کیفی "فسفر" است. این پارامتر از آن جهت که اغلب عامل محدودکننده تغذیه‌گرائی در منابع آب شیرین بشمار می‌رود، دارای اهمیت ویژه در مباحث کیفیت آب است (Carpenter, 2008)، و در حوضه‌های آبریز کوهستانی با نرخ فرسایش بالا، به میزان زیاد وارد منابع آب سطحی می‌شود. حوضه آبریز رودخانه کرج یک نمونه از این دست حوضه‌های

آبریز کوهستانی است. میزان فسفر در آب رودخانه کرج به دلیل پوشش گیاهی نسبتاً فقیر و نرخ فرسایش بالای حوضه آبریز، به‌خصوص در فصل بهار قابل توجه است و این موضوع سبب شده تا آب سد امیرکبیر در پایین‌دست این حوضه آبریز، در معرض تغذیه‌گرائی قرار گیرد (Kheiri et al., Arnold et al., 1998; 2018). از طرف دیگر، حوضه آبریز رودخانه کرج نقش بسیار مهمی در تأمین آب شرب پایتخت ایران (تهران) ایفا می‌کند و لذا مدیریت بار آلودگی فسفر در این حوضه از اهمیت فوق‌العاده برخوردار است.

در این راستا، مطالعه حاضر به شبیه‌سازی دبی، رسوب و فسفر کل در حوضه آبریز رودخانه کرج با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT می‌پردازد. تاکنون مطالعات متعددی پیرامون ارزیابی کارایی مدل SWAT در شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی رسوب در حوضه‌های آبریز کوهستانی انجام شده است. برای مثال فلین و ون لیو (Flynn and Van Liew, 2011) از SWAT برای شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب در حوضه کوهستانی برف‌خیز لامار^۱ در آمریکا استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که SWAT برای شبیه‌سازی هر دو متغیر در مناطق کوهستانی و تحت سلطه ذوب برف مناسب است. آندریاناک و همکاران (Andrianaki et al., 2019) اذعان داشتند که مدل SWAT در منطقه مورد مطالعه آن‌ها زمان‌بندی ذوب برف را به طور دقیق پیش‌بینی کرده اما نتوانسته اوج جریان را برای سال‌های خاص با دقت مناسب شبیه‌سازی کند. از محدود مطالعاتی که به شبیه‌سازی فسفر در مناطق کوهستانی پرداخته‌اند می‌توان به مطالعه لیو و همکاران (Liu et al., 2016) در حوضه آبریز رودخانه شیانگشی^۲ اشاره کرد که توانستند با استفاده از SWAT پیش‌بینی‌های خوبی از فسفر ارائه دهند اما در نتایج آن‌ها تحلیل عدم قطعیت فسفر منعکس نشده است. در این تحقیق برای اولین بار در یک حوضه آبریز کاملاً کوهستانی که بیشتر سطح آن را مرتع با پوشش گیاهی کم تا متوسط در بر گرفته و فعالیت زراعی در آن به نسبت مناطق پست بسیار محدود است، تحلیل حساسیت جهانی^۳ و تحلیل عدم قطعیت پارامتری مدل SWAT در شبیه‌سازی ماهانه فسفر کل انجام شده و تأثیرگذارترین پارامترهای مدل در شبیه‌سازی فسفر کل (به همراه دبی و رسوب) معرفی شده‌اند. لازم به ذکر است که مدل‌سازی دبی و رسوب پیش‌نیاز مدل‌سازی فسفر کل می‌باشند.

1- Lamar

2- Xiangxi

3- Global Sensitivity Analysis

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق یعنی حوضه آبریز رودخانه کرج تا محل آبگیر بیلقان، با ارتفاعات ۱۳۶۴ تا ۴۳۶۹ متر و متوسط ارتفاع ۲۸۸۰ متر جزء مناطق کاملاً کوهستانی است که در سلسله جبال البرز واقع شده است. این حوضه با مساحت ۱۰۷۶ کیلومتر مربع در شمال خود بخش‌هایی از استان مازندران، در شرق و جنوب حوضه بخش‌هایی از استان تهران را در بر گرفته و بخش اعظم آن در استان البرز قرار دارد. حدود ۶۰ درصد از این منطقه دارای ارتفاعات ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین دمای سالانه و بارندگی در این حوضه به ترتیب ۱۲/۱ درجه سانتی‌گراد و ۴۸۰ میلی‌متر است و میانگین ۱۱۷ روز یخبندان در طول سال در این منطقه مشاهده می‌شود. در مسیر رودخانه کرج دو سازه آبی بسیار مهم یعنی سد امیرکبیر و آبگیر بیلقان قرار دارد. سد امیرکبیر (کرج) یک طرح چندمنظوره می‌باشد که از مهم‌ترین اهداف آن تأمین آب شرب تهران و تنظیم آب برای مصارف آبیاری و کشاورزی اراضی حومه کرج می‌باشد. همچنین آبگیر بیلقان مهم‌ترین نقطه تأمین و انتقال آب شرب تهران به حساب می‌آید. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه مشخص شده است. اراضی واقع در محدوده مورد مطالعه شامل کاربری‌های پیکره‌های آبی^۱، اراضی باغی^۲ و مرتع است که از انواع مرتع سه دسته مرتع با پوشش گیاهی ضعیف^۳، متوسط^۴ و خوب^۵ در این حوضه وجود دارد. بیشترین کاربری اراضی در محدوده مربوط به کاربری مرتع با پوشش گیاهی متوسط است که مساحتی در حدود ۹۳۷ کیلومتر مربع و معادل ۸۶ درصد سطح کل محدوده مطالعاتی را در بر می‌گیرد (شکل ۲). بر اساس نقشه تهیه شده از نقشه جهانی خاک فائو^۶، منطقه مطالعاتی دارای سه نوع خاک می‌باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده است.

مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی، پیوسته زمانی، نیمه‌توزیعی و با پایه فیزیکی است که توسط سازمان تحقیقات کشاورزی ایالات

متحدہ آمریکا توسعه داده شده است (Arnold et al., 1998). این مدل مفهومی به‌منظور پیش‌بینی تأثیر روش‌های مختلف مدیریتی بر مقادیر آب، رسوب و مواد شیمیایی کشاورزی در سطح حوضه‌های بزرگ و پیچیده با خاک، کاربری اراضی و شرایط مختلف مدیریتی و مورفولوژیکی در درازمدت طراحی شده است. SWAT قابل اتصال به نرم‌افزارهای GIS بوده، لذا حجم وسیعی از داده‌ها به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی مانند نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و نقشه ارتفاعات رقومی^۷ (DEM) با استفاده از نرم‌افزار واسط GIS توسط مدل بکار می‌رود. مدل SWAT برای شبیه‌سازی حوضه، ابتدا آن را به چند زیرحوضه تقسیم می‌کند. هر زیرحوضه نیز به چند قسمت دیگر به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی^۸ (HRU) تقسیم می‌شود که این واحدها قسمت‌های درون هر زیرحوضه هستند که دارای نوع خاک، کاربری اراضی و شیب یکسانی هستند. بدین ترتیب از نظر مکانی، HRU کوچک‌ترین واحد محاسباتی مدل SWAT است. برای شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی و کیفیت آب، SWAT از معادلات و روش‌های متعددی استفاده می‌کند که به‌تفصیل در منابع متعدد به آن‌ها اشاره شده است (Bagnold, 1977; Williams, 1975; Neitsch, 2005; Neitsch et al., 2011; Arnold et al., 2012).

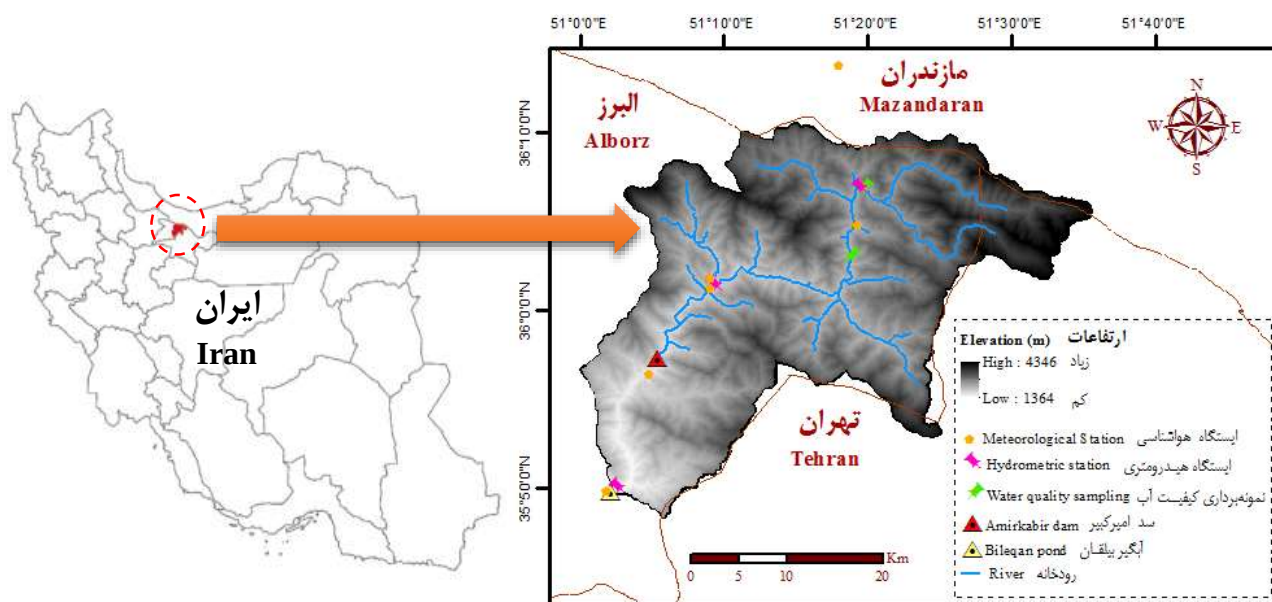
راه‌اندازی و اجرای مدل

در شروع کار با مدل، ابتدا نقشه DEM که قبلاً تهیه شده بود، به مدل معرفی شد. پس از ترسیم شبکه آبراهه‌های محدوده مطالعاتی بر اساس DEM معرفی شده، حوضه آبریز توسط مدل ترسیم شده و زیرحوضه‌های تشکیل‌دهنده آن نیز مشخص گردید. با در نظر گرفتن حداقل سطح زهکش ۷۰۰ هکتار برای ترسیم زیرحوضه‌ها، تعداد ۹۱ زیرحوضه ترسیم شد. در مرحله بعد با استفاده از نقشه‌های رستری مربوط به خاک، کاربری اراضی و تعیین طبقات شیب، واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تعریف گردید. برای این کار دو نقشه اول از قبل آماده شده بودند و طبقات شیب نیز در همین مرحله با استفاده از مدل SWAT و در محیط ArcGIS تهیه شدند. با توجه به تنوع بالای شیب در منطقه، پنج طبقه شیب ۰-۱۰، ۱۰-۲۰، ۲۰-۳۵، ۳۵-۵۰ و بالاتر از ۵۰ درصد در مدل تعریف گردید. همچنین با توجه به اهمیت تعریف بازه‌های ارتفاعی به‌منظور بهبود شبیه‌سازی در نواحی کوهستانی (Bhatta et al., 2020; Rahman et al., 2013) تعداد پنج بازه ارتفاعی در هر زیرحوضه تعیین شد. نهایتاً ۴۹۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی در این مرحله ساخته شد.

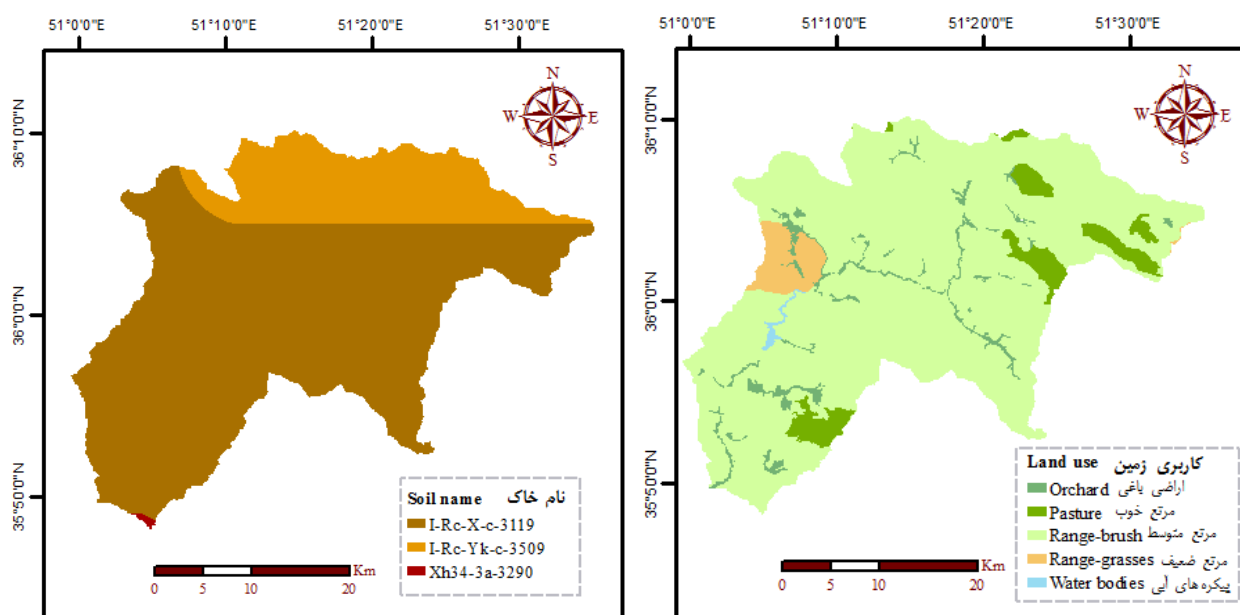
- 1- Water bodies (WATB)
- 2- Orchard (ORCD)
- 3- Range-grass (RNGE)
- 4- Range-brush (RNGB)
- 5- Pasture (PAST)
- 6- Food and Agriculture Organization of the United Nations

7- Digital Elevation Map

8- Hydrological Response Unit



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



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی
Figure 2- Land use map

شکل ۳- نقشه خاک
Figure 3- Soil map

در بازه زمانی ابتدای سال ۱۹۹۸ تا انتهای سال ۲۰۱۸ (مجموعاً ۲۱ سال) به مدل معرفی شد. همچنین آمار روزانه پارامترهای رطوبت نسبی، بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، ساعات آفتابی و سرعت باد

پس از تعریف واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی داده‌های هواشناسی به مدل معرفی گردید. در این مرحله پارامترهای هواشناسی مربوط به آمار داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک مجاور محدوده مطالعاتی

جریان بسته به مقیاس مسئله، مقدار فاکتور R کمتر از $1/5$ و مقدار فاکتور P بزرگ‌تر از $0/70$ یا $0/75$ نشان‌دهنده کیفیت مطلوب واسنجی می‌باشد (Abbaspour et al., 2015).

در نرم‌افزار SWAT_CUP برای شناسایی حساس‌ترین پارامترهای مدل به‌منظور استفاده در فرایند واسنجی دو روش تحلیل حساسیت جهانی و تحلیل حساسیت مطلق^۲ تعبیه شده است. در روش تحلیل حساسیت جهانی حساسیت پارامترها با استفاده از یک روش رگرسیون چندمتغیره محاسبه شده، سپس از آزمون T-Test برای تعیین اهمیت نسبی هر پارامتر استفاده می‌شود. در این روش حساسیت متغیر نسبت به تغییرات یک پارامتر درحالی‌که باقی پارامترها نیز در حال تغییر هستند، سنجیده شده و میزان حساسیت آن‌ها با ضرایب حساسیت t -stat و p -value مشخص می‌گردد. هرچه قدرمطلق مقدار t -stat بزرگ‌تر و p -value کوچک‌تر باشد پارامتر مورد نظر حساس‌تر است. درحالی‌که در روش تحلیل حساسیت مطلق، حساسیت هر پارامتر نسبت به مقدار ثابت شده بقیه پارامترها سنجیده می‌شود (Abbaspour et al., 2007). تجربه ثابت کرده است که روش تحلیل حساسیت جهانی برای شناسایی حساس‌ترین پارامترها و تحلیل حساسیت مطلق برای بدست آوردن محدوده‌های مناسب پارامترها روند واسنجی مدل را تسهیل می‌کند (Faramarzi et al., 2017). در این تحقیق با توجه به مرور مطالعات قبلی درباره واسنجیدگی جریان، رسوب و فسفر کل در مدل SWAT (Abbaspour et al., 2007; Talebizadeh et al., 2010; Engebretsen et al., 2019; Abbaspour et al., 2015)، در مجموع ۴۰ پارامتر برای انجام تحلیل حساسیت جهانی در ابتدای فرایند واسنجی به‌منظور شناسایی حساس‌ترین پارامترها نسبت به سه متغیر مذکور و به‌کارگیری آن‌ها در واسنجی مدل تعیین شد. سپس برای تعیین بازه حساس هر پارامتر به‌منظور استفاده در فرایند واسنجی، روش تحلیل حساسیت مطلق مورد استفاده قرار گرفت. برای استفاده از این روش مراحل ذکر شده در مطالعه عباس‌پور و همکاران (Abbaspour et al., 2007) مبنای کار قرار گرفت.

در این مطالعه شاخص نش-ساتکلیف (NS) مبنای اصلی ارزیابی کیفیت واسنجی مدل بوده و علاوه بر آن از ضریب تعیین (R^2)، انحراف جذر میانگین مربعات (RMSE)، انحراف جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) نیز استفاده شده است. از انحراف در تحقیقات به‌عنوان نسبت انحراف میانگین مربعات خطا به انحراف استاندارد داده‌های اندازه‌گیری شده (RSR) یاد شده است (Moriasi et al., 2007).

به‌عنوان پارامترهای هواشناسی داخل منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مشابه به مدل معرفی گردید. لازم به ذکر است تعداد داده‌های مفقود در اطلاعات هواشناسی به‌ویژه داده‌های روزانه دما قابل توجه بوده است. علاوه بر اطلاعات فوق، داده‌های دبی روزانه تخلیه شده از سد امیرکبیر و مشخصات فنی سد به مدل معرفی گردید. همچنین با استناد به اطلاعات اداره جهاد کشاورزی استان البرز، اطلاعات مدیریتی اراضی باغی از جمله دوره‌های آبیاری و اطلاعات مربوط به کودهای فسفاته مصرفی در باغات منطقه نیز به مدل معرفی شد. پس از معرفی تمامی اطلاعات ورودی، جداول پایگاه داده مربوط به داده‌های ورودی مدل توسط مدل ساخته شد. در انتها، اجرای نهایی مدل SWAT صورت گرفت و نتایج شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه و از ابتدای سال ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۸ میلادی در پوشه خروجی پروژه ذخیره گردید. لازم به ذکر است که دو سال اول شبیه‌سازی به‌عنوان دوره آماده‌سازی^۱ تعیین گردید. هدف از درنظرگرفتن این دوره دستیابی به ثبات مدل و حذف اثر داده‌های اندازه‌گیری مفقود و یا خطادار می‌باشد.

واسنجی، تحلیل عدم قطعیت و اعتبارسنجی

از آنجایی‌که با استفاده از مدل SWAT، امکان تعریف و اعمال سناریوهای مختلف در زمینه مدیریت منابع آب در سطح حوضه‌های آبریز و نیز انجام برنامه‌ریزی درازمدت برای حوضه ایجاد می‌شود، نتایج باید قابل اطمینان بوده و دارای حداقل عدم قطعیت باشد (Abbaspour et al., 2007). با توجه به متفاوت بودن بازه زمانی اطلاعات اندازه‌گیری شده متغیرهای دبی جریان، رسوب و فسفر کل در هر ایستگاه، حدود ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده برای دوره واسنجی و ۳۰ درصد آن برای دوره اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت که در جدول ۱ بازه‌های زمانی تعیین شده در هر ایستگاه مشخص شده است. به‌منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت پارامترهای مدل SWAT الگوریتم SUFI2 در نرم‌افزار SWAT_CUP مورد استفاده قرار گرفت (Abbaspour et al., 2004). با استفاده از این الگوریتم عدم قطعیت خروجی توسط بازه‌های عدم قطعیت پیش‌بینی ۹۵ درصد، کمی‌سازی می‌گردد. در این روش با استفاده از فاکتور R که معرف پهنای بازه عدم قطعیت بوده و همچنین فاکتور P که معرف نسبت مشارکت داده‌های اندازه‌گیری در بازه عدم قطعیت می‌باشد، کیفیت واسنجی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که هرچه پهنای بازه عدم قطعیت به عدد صفر و مقدار فاکتور P به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، واسنجی از کیفیت مطلوب‌تری برخوردار است. برای مثال در مورد پارامتر دبی

جدول ۱- بازه‌های زمانی تعیین شده برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه

Table 1- Periods set for model calibration and validation at stations in the study area

نام ایستگاه Station Name	متغیر اندازه‌گیری شده Measured Variable	دوره کالیبراسیون Calibration Period	دوره اعتبارسنجی Validation Period
گچسر Gachsar	دبی جریان و رسوب Flow and Sediment	2000 to 2011	2012 to 2017
سیرا-کرج Sira-Karaj	دبی جریان و رسوب Flow and Sediment	2000 to 2010	2011 to 2016
دیزین Dizin	فسفر کل Total Phosphorus	Feb-2014 to Jun-2016	Jul-2016 to May-2017
شهرستانک Shahrestanak	فسفر کل Total Phosphorus	Mar-2014 to Jun-2016	Jul-2016 to Dec-2018

حساسیت بیشتر برخی از پارامترها به بیش از یک متغیر، در مجموع ۲۶ پارامتر با بیشترین حساسیت معرفی شد. بر این اساس پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA_BF)، ضریب زبری رواناب سطحی (OV_N) و آهنگ افزایش بارش (PLAPS) به ترتیب به‌عنوان حساس‌ترین پارامترها نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل شناخته شدند. بر اساس تحلیل حساسیت انجام شده پارامترهای آهنگ افزایش دما و بارش (TLAPS و PLAPS) و همچنین پارامترهای برفی مانند دمای بارش و فاکتور ذوب برف (SFTMP، SMFMX) جزء پارامترهای با حساسیت زیاد بوده‌اند که در مطالعات مشابهی که در مناطق کوهستانی انجام شده نیز جزء پارامترهای حساس به حساب آمده‌اند (Rahman et al., 2013; Bhatta et al., 2020).

جدول ۲ طبقه‌بندی صحت نتایج مدل را بر اساس سه شاخص NS ، R^2 و RSR نشان داده که در آن کیفیت مدل‌سازی با چهار دسته نامطلوب، رضایت‌بخش، خوب و خیلی خوب تقسیم‌بندی می‌شود (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015).

نتایج و بحث

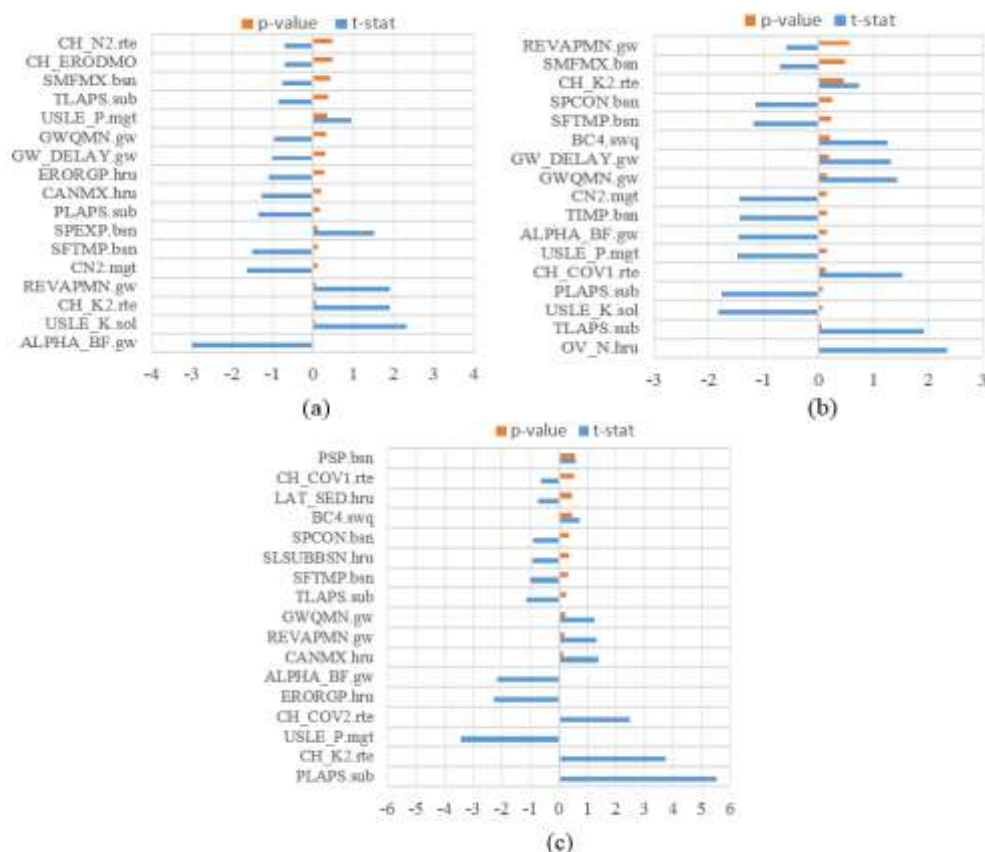
تحلیل حساسیت مدل

در ابتدا تحلیل حساسیت جهانی به‌منظور شناسایی پارامترهای حساس مدل با توجه به بازه مقادیر مجاز تعریف شده در مدل SWAT انجام شد. در شکل ۴، از میان ۴۰ پارامتری که برای رسوب و فسفر کل به‌صورت جداگانه ۱۷ پارامتری که قدرمطلق t-stat بزرگ‌تر و p-value کوچک‌تری نسبت به سایر پارامترها داشتند و به عبارتی حساس‌تر بودند، نشان داده شده است که با در نظر گرفتن

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت نتایج واسنجی بر اساس شاخص‌های آماری NS ، R^2 و RSR (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015)

Table 2- Quality classification of calibration results based on NS, R^2 and RSR statistical indices (Moriassi et al., 2007; Moriassi et al., 2015)

معیار خطا Measure	متغیر Variable	معیارهای ارزیابی عملکرد Performance Evaluation Criteria			
		خیلی خوب Very Good	خوب Good	رضایت‌بخش Satisfactory	نامطلوب Not Satisfactory
NS	دبی جریان Flow	$NS > 0.80$	$0.70 < NS \leq 0.80$	$0.50 < NS \leq 0.70$	$NS \leq 0.50$
	رسوب Sediment	$NS > 0.80$	$0.70 < NS \leq 0.80$	$0.45 < NS \leq 0.70$	$NS \leq 0.45$
	فسفر Phosphorus	$NS > 0.65$	$0.50 < NS \leq 0.65$	$0.35 < NS \leq 0.50$	$NS \leq 0.35$
R^2	دبی جریان Flow	$R^2 > 0.85$	$0.75 < R^2 \leq 0.85$	$0.60 < R^2 \leq 0.75$	$R^2 \leq 0.60$
	فسفر/رسوب Sediment/Phosphorus	$R^2 > 0.80$	$0.65 < R^2 \leq 0.80$	$0.40 < R^2 \leq 0.65$	$R^2 \leq 0.40$
RSR	دبی جریان/رسوب/فسفر Flow/Sediment/phosphorus	$0.0 < RSR \leq 0.5$	$0.5 < RSR \leq 0.6$	$0.5 < RSR \leq 0.7$	$RSR > 0.7$



شکل ۴- نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مدل SWAT برای متغیرهای دبی جریان (a)، رسوب (b) و فسفر کل (c)

Figure 4- Results of Sensitivity Analysis of SWAT Model Parameters for Flow (a), Sediment (b) and Total Phosphorus (c)

(CH_ERODMO)، شاخص دسترس‌پذیری فسفر (PSP) و غلظت رسوب در جریان جانبی و آب زیرزمینی (LAT_SED) با در نظر گرفتن حساسیت کمتر آن‌ها در مقایسه با ۲۲ پارامتر دیگر در واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفتند. مقادیر نهایی پارامترها در واسنجی پس از انجام ۱۷ تکرار در SWAT_CUP بدست آمد. مطابق **جدول ۴** مقادیر پارامترهای مربوط به برف و آهنگ افزایش دما و بارش (شماره ۱ تا ۵) پس از تکرار پنجم در فرایند واسنجی و دستیابی به مقادیر نسبتاً مناسب شاخص‌های آماری (**جدول ۲**) بر اساس مقادیر نمونه‌گیری شده از بهترین دور شبیه‌سازی مدل ثابت گردید. این عمل باعث کاهش قابل توجه ضخامت بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (فاکتور R) برای هر سه متغیر و نزدیک شدن به مقدار ۱/۵ و کمتر از آن شد که برای مدل‌سازی مطلوب توصیه شده است (Moriasi et al., 2015). سپس به منظور دستیابی به نتایج بهتر با تغییر بازه‌های تعریف شده برای سایر پارامترها در تکرارهای بعدی، در نهایت حدود نهایی آن‌ها در آخرین تکرار بدست آمد.

این در حالی است که در مناطق غیر کوهستانی و پست، این پارامترها به ندرت به عنوان پارامترهای حساس محسوب شده‌اند (Niraula et al., 2013; Mengistu et al., Azimi et al., 2013). در نتایج تحلیل حساسیت پارامترها برای متغیر فسفر کل نیز سه پارامتر PLAPS، TLAPS و SFTMP از حساسیت بالایی برخوردار هستند. این موضوع اهمیت بالای دو عامل تغییرات ارتفاع و برف که از ویژگی‌های بارز مناطق کوهستانی است و نقش مؤثر آن‌ها در رژیم کمی و کیفی رودخانه در حوضه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

مقادیر نهایی پارامترها در واسنجی مدل

از مجموع ۲۶ پارامتر ذکر شده در **شکل ۴** که حداقل نسبت به یکی از متغیرها حساسیت قابل توجهی داشته‌اند، ۲۲ پارامتر (**جدول ۳**) برای واسنجی مدل به کار گرفته شده و چهار پارامتر ضریب مانینگ برای کانال اصلی (CH_N2)، فاکتور فرسایش کانال

جدول ۳- مقادیر واسنجی شده پارامترها
Table 3- Calibrated parameter values

شماره No.	نام پارامتر Parameter	روش تغییر Method of Change	مقدار نهایی Final Value	شماره No.	نام پارامتر Parameter	روش تغییر Method of Change	مقدار نهایی Final Value
1	SFTMP.bsn	Replace	4.44	12	CN2.mgt	Relative	[0.20,0.35]
2	TIMP.bsn	Replace	0.94	13	SLSUBBSN.hru	Relative	[0.09,0.12]
3	SMFMX.bsn	Replace	0.60	14	USLE_K.sol	Relative	[-0.85,-0.79]
4	PLAPS.sub	Replace	187.5	15	OV_N.hru	Relative	[0.10,0.18]
5	TLAPS.sub	Replace	-6.01	16	ERORGP.hru	Replace	[3,5]
6	REVAPMN.gw	Replace	[4.91,7.04]	17	USLE_P.mgt	Relative	[-0.12,-0.01]
7	GW_DELAY.gw	Replace	[173,329]	18	CH_COV1.rte	Replace	[0.53,0.57]
8	GWQMN.gw	Replace	[0.26,0.31]	19	CH_COV2.rte	Replace	[0.84,0.94]
9	ALPHA_BF.gw	Replace	[0.11,0.32]	20	SPCON.bsn	Replace	[0.007,0.008]
10	CH_K2.rte	Replace	[197,270]	21	SPEXP.bsn	Replace	[1.33,1.39]
11	CANMX.hru	Replace	[10.0,13.6]	22	BC4.swq	Replace	[0.23,0.61]

ارزیابی واسنجی دبی جریان

بر اساس شکل‌های ۵، ۶ و ۷، در سه ایستگاه هیدرومتری مورد مطالعه مقدار R-factor کمتر از ۱/۵ و مقدار P-factor بیشتر از ۰/۷ بدست آمده است که بیانگر کیفیت مطلوب واسنجی دبی جریان است (Abbaspour et al., 2015). با توجه به جدول ۴ در دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل و در اغلب موارد NS و R^2 به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۵ و ۰/۶ بوده و با RMSE بین ۲/۲۴ تا ۸/۸۳ مترمکعب در ثانیه مقدار RSR کمتر از ۰/۷ به دست آمده که بر اساس طبقه‌بندی کیفی مدل‌سازی (جدول ۳) مدل عملکرد رضایت‌بخش و خوب داشته است (Moriasi et al., 2015). در ایستگاه بیلقان و به‌ویژه در دوره واسنجی مقادیر این شاخص‌ها نشان از پیش‌بینی ضعیف‌تر دبی جریان به نسبت سایر ایستگاه‌های مشاهداتی دارد. با توجه به مقایسه مقدار فاکتور R در شکل‌های ۵، ۶ و ۷، خروجی‌های مدل در ایستگاه بیلقان دارای عدم قطعیت بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌های سنجش دبی هستند. بر اساس جدول ۵ که متوسط متغیرهای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصول مختلف سال را نشان می‌دهد، به جز فصل تابستان، در باقی فصول مقدار دبی کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده است. همچنین بیشترین تفاضل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مربوط به فصل بهار می‌باشد که با توجه به شکل‌های ۵، ۶ و ۷ در نقاط اوج در ماه مه میلادی (اواسط بهار) این اختلاف قابل ملاحظه است؛ بنابراین عمده ضعف مدل در هر سه ایستگاه عدم پیش‌بینی درست نقاط اوج جریان بوده است. این مسئله را می‌توان به

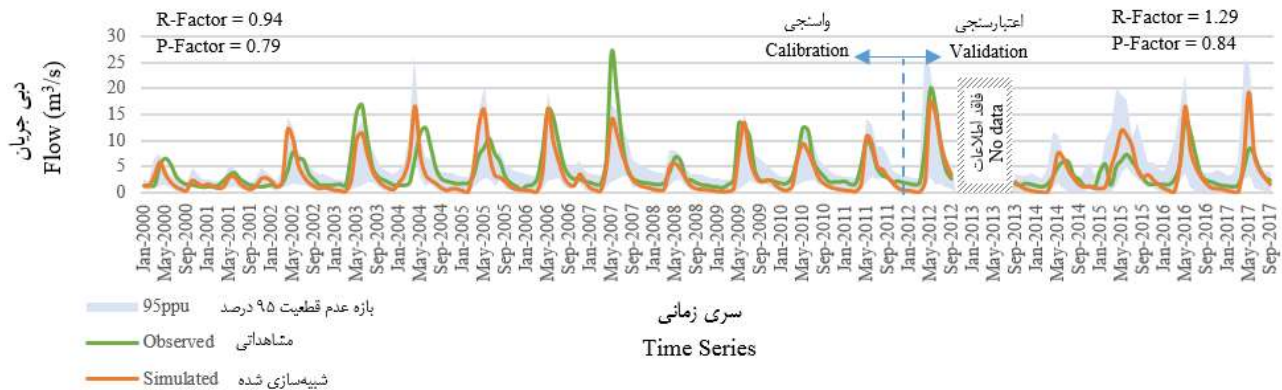
عدم پیش‌بینی صحیح جریان ورودی به رودخانه در اثر ذوب برف تعمیم داد که تقریباً از اواسط بهمن (فوریه میلادی) روند افزایشی آن شروع شده و اواسط اردیبهشت (مه میلادی) به اوج خود می‌رسد. چند عامل می‌تواند در عدم تشخیص صحیح این نقاط مؤثر باشد. اول اینکه تعدد قابل توجه داده مفقود در ایستگاه‌های هواشناسی می‌تواند بر عدم پیش‌بینی صحیح مدل مؤثر باشد (Rostamian et al., 2008) که در این منطقه بخصوص کمبود داده‌های دمای روزانه در مقایسه با سایر پارامترهای هواشناسی قابل توجه بوده است. دوم اینکه مقادیر نهایی مربوط به پارامترهای دمای بارش و ذوب برف و آهنگ افزایش دما و بارش به کل زیرحوضه‌ها تعمیم داده شده و احتمالاً لازم است تا مقادیر آن‌ها با توجه به عدم قطعیت زیاد این پارامترها در نواحی کوهستانی (Katra and Ahmad, Kulkarni et al., 2010; Singh and Goyal, 2011) در سطح زیرحوضه‌ها تنظیم شود. اما بهترین پیش‌بینی‌های مدل با توجه به جدول ۵ در فصل پاییز بوده که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی کمتر از مقدار متناظر برای سایر فصول بوده است. این نشان می‌دهد که پارامترهای کنترل‌کننده جریان پایه از جمله ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA_BF)، زمان تأخیر آب زیرزمینی (GW_DELAY)، عمق آستانه آب در آبخوان کم‌عمق (GWQMN) و عمق آستانه آب برای حرکت از سفره آب کم‌عمق به آب‌های زیرزمینی (REVAPMN) که جزو پارامترهای حساس مدل هستند به‌خوبی تخمین زده شده‌اند.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی اعتبار مدل‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر کل
Table 4- Criteria for assessing the quality of flow, sediment and TP modeling

متغیر Variable	نام ایستگاه Station	واستنجی Calibration				اعتبارسنجی Validation			
		NS	R ²	RMSE	RSR	NS	R ²	RMSE	RSR
دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) Flow (m ³ /s)	گچسر Gachsar	0.63	0.71	2.45	0.57	0.76	0.83	2.24	0.56
	سیرا-کرج Sira-karaj	0.70	0.74	6.86	0.58	0.76	0.76	6.40	0.61
	بیلقان Bileqan	0.45	0.58	8.83	0.69	0.63	0.66	8.31	0.63
رسوب (تن در ماه) Sediment (ton/month)	گچسر Gachsar	0.47	0.56	1410	0.70	0.46	0.70	1701	0.64
	سیرا-کرج Sira-karaj	0.56	0.71	8940	0.56	0.54	0.56	9063	0.69
	دیزین Dizin	0.92	0.95	1.38	0.17	0.61	0.91	0.89	0.45
فسفر کل (تن در ماه) TP (ton/month)	شهرستانک Shahrestanak	0.91	0.95	3.74	0.24	0.7	0.89	3.46	0.35

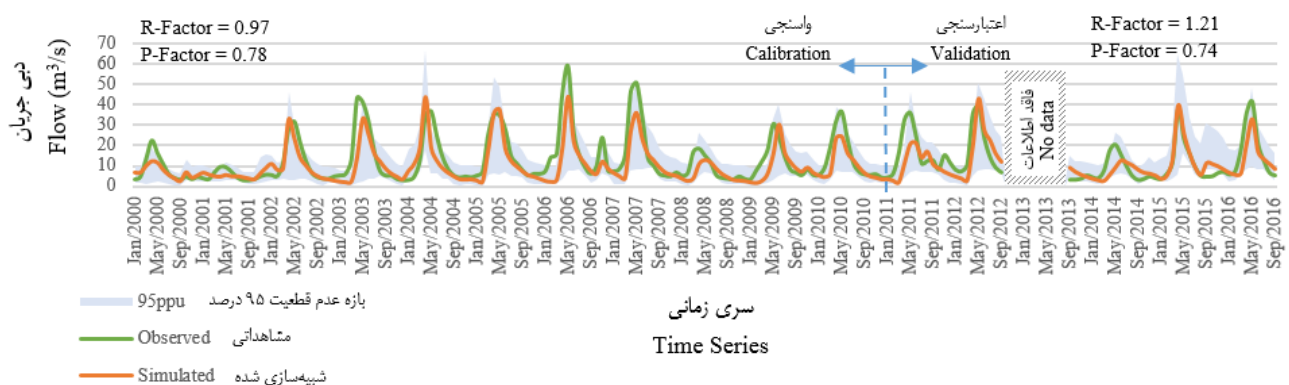
جدول ۵- متوسط دبی جریان، رسوب و فسفر کل مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصول مختلف
Table 5- Average flow, sediment and TP observed and simulated in different seasons

فصل Season	نوع کمیت Quantity Type	دبی جریان (مترمکعب در ثانیه) Flow (m ³ /s)			رسوب (۱۰ ^۳ تن در ماه) Sediment (10 ³ ton/month)		فسفر کل (تن در ماه) TP (ton/month)	
		گچسر Gachsar	سیرا-کرج Sira-karaj	بیلقان Bileqan	گچسر Gachsar	سیرا-کرج Sira-karaj	دیزین Dizin	شهرستانک Sharestanak
بهار Spring	مشاهداتی Observed	9.08	28.21	23.45	2.97	24.40	11.13	19.37
	شبیه‌سازی Simulated	8.36	20.73	21.39	3.35	15.54	12.76	13.37
	تفاضل Difference	0.72	7.48	2.06	-0.38	8.86	-1.63	6.00
تابستان Summer	مشاهداتی Observed	4.24	8.00	13.01	0.92	2.67	2.75	8.89
	شبیه‌سازی Simulated	3.22	9.59	13.90	0.78	3.85	1.50	7.36
	تفاضل Difference	1.02	-1.59	-0.89	0.14	-1.18	1.25	1.53
پاییز Fall	مشاهداتی Observed	1.61	5.78	9.79	0.21	1.76	1.40	2.20
	شبیه‌سازی Simulated	1.24	5.48	8.90	0.22	1.46	0.75	1.52
	تفاضل Difference	0.37	0.30	0.89	-0.01	0.30	0.65	0.68
زمستان Winter	مشاهداتی Observed	1.66	8.57	9.83	0.23	3.19	0.40	1.21
	شبیه‌سازی Simulated	1.00	5.17	7.58	0.22	1.51	0.58	2.37
	تفاضل Difference	0.66	3.40	2.25	0.01	1.68	-0.18	-1.16



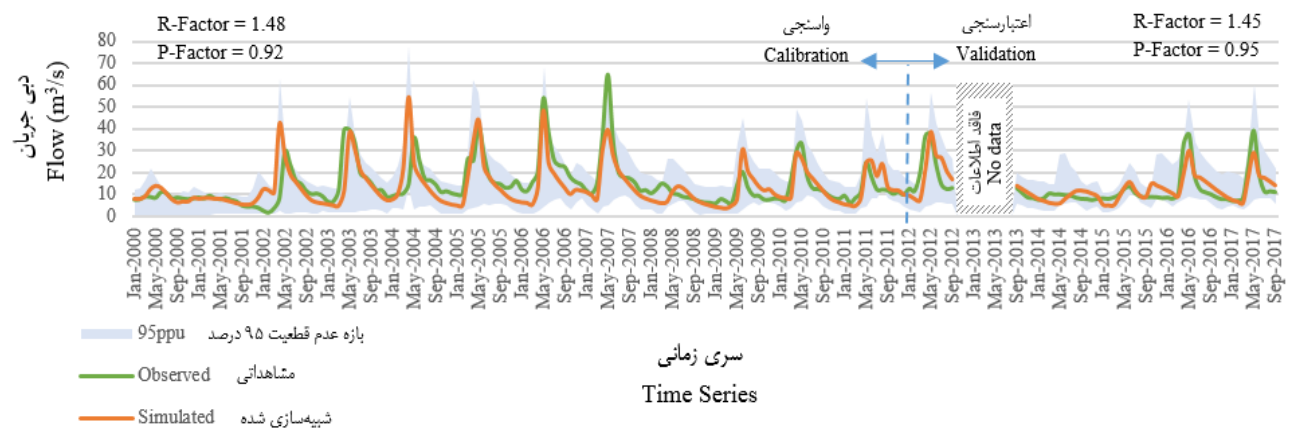
شکل ۵- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه گچسر

Figure 5- Runoff calibration and validation results at Gachsar station



شکل ۶- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه سیرا-کرج

Figure 6- Runoff calibration and validation results at Sira-karaj station



شکل ۷- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رواناب در ایستگاه بیلقان

Figure 7- Runoff calibration and validation results at Bileqan station

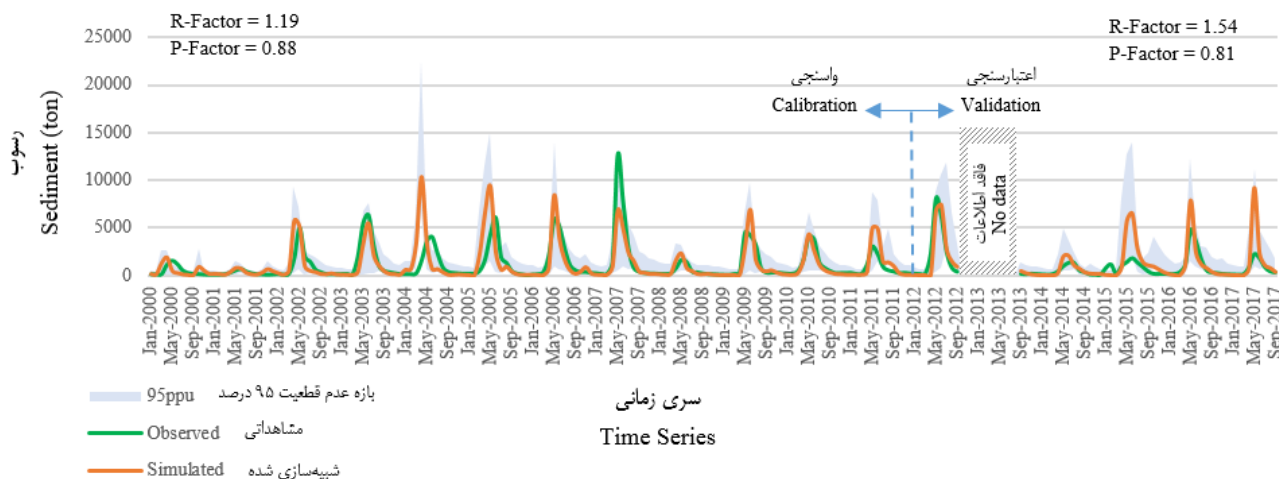
در مجموع دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی درصد قابل توجهی از مقادیر اندازه‌گیری شده (۷۷ تا ۸۹ درصد) را در بر می‌گیرد. بر اساس جدول ۴، در همه موارد NS و R^2 به ترتیب بزرگ‌تر از ۰/۴۵ و ۰/۴۰ و با RMSE بین ۱۴۱۰ تا ۹۰۶۳ تن، RSR کمتر از ۰/۷ بدست آمده است و بر اساس طبقه‌بندی کیفی مدل‌سازی (جدول ۲) مدل عملکرد

ارزیابی واسنجی رسوب

با مقایسه نتایج شبیه‌سازی رسوب در شکل‌های ۸ و ۹، در دوره واسنجی، میزان عدم قطعیت خروجی شبیه‌سازی رسوب در ایستگاه گچسر بیشتر از مقدار متناظر آن در ایستگاه سیرا-کرج است. با توجه به مقادیر فاکتور P، بازه عدم قطعیت بدست آمده در هر دو ایستگاه و

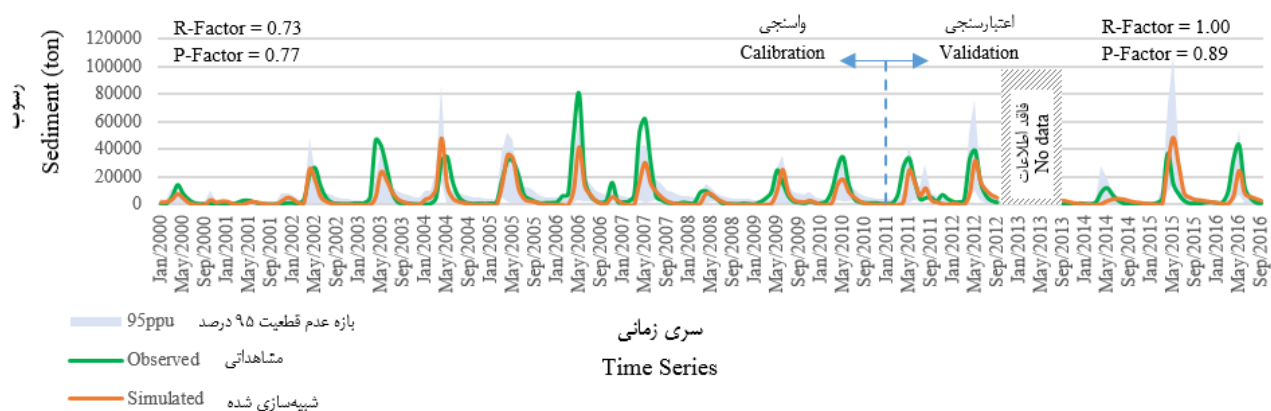
دقت پیش‌بینی جریان می‌تواند در تعیین میزان بار رسوب منتقل شده مؤثر باشد، بلکه وابستگی مدل SWAT به بسیاری از مدل‌های تجربی و نیمه‌تجربی مانند SCS-CN و MUSLE را می‌توان عامل مؤثری دانست که باعث می‌شود تا SWAT بار رسوب را با دقت کمتری ردیابی کند (Nash and Sutcliffe, 1970). علاوه بر این، از آنجایی که مقادیر تخصیص داده شده به پارامترهای حساس مرتبط با روندیابی رسوب و فرسایش مانند پارامتر خطی محاسبه‌کننده حداکثر رسوب مجدداً وارد شده به کانال (SPCON)، فاکتور توان در روندیابی رسوب در آبراهه (SPEXP)، فاکتور فرسایش‌پذیری خاک در معادله USLE (USLE_K)، فاکتور حفاظت خاک در معادله USLE (USLE_P)، فاکتور فرسایش کانال (CH_COV1) و همچنین سایر پارامترهای حساس از جمله ضریب زبری رواناب سطحی (OV_N) به کل حوضه تعمیم داده شده است، به نظر می‌رسد با توجه به تنوع زیاد شیب و ارتفاعات در منطقه، ارزیابی و واسنجی این پارامترها در سطح زیرحوضه بتواند عملکرد مدل را بهبود ببخشد.

رضایت‌بخش و خوب داشته است. با توجه به جدول ۵، مدل در اکثر موارد به جز فصل بهار در ایستگاه گچسر و فصل تابستان در ایستگاه شهرستانک، مقدار رسوب را کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. مانند دبی، بیشترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در فصل بهار بوده که در شکل‌های ۸ و ۹ این تفاوت در نقاط اوج رسوب واضح‌تر به نمایش درآمده است. بهترین پیش‌بینی‌ها نیز مربوط به فصل پاییز است که داری کمترین مقدار رسوب در میان تمام فصول بوده و تفاضل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در کمترین حالت قرار دارد. مقایسه شاخص‌های آماری به دست آمده به‌ویژه NS برای متغیرها نشان می‌دهد که شبیه‌سازی رسوب نسبت به دبی جریان با دقت کمتری انجام شده که با مطالعات مشابه در زمینه واسنجی دبی جریان و رسوب همخوانی دارد (Flynn and Jalowska and Yuan, 2019Van Liew, 2011). دلیل این موضوع می‌تواند این باشد که با توجه به تأثیرپذیری رسوب از رژیم جریان (D'Ambrosio et al., 2017) نه‌تنها عوامل مؤثر در کاهش



شکل ۸- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رسوب در ایستگاه گچسر

Figure 8- Sediment calibration and validation results at Gachsar station



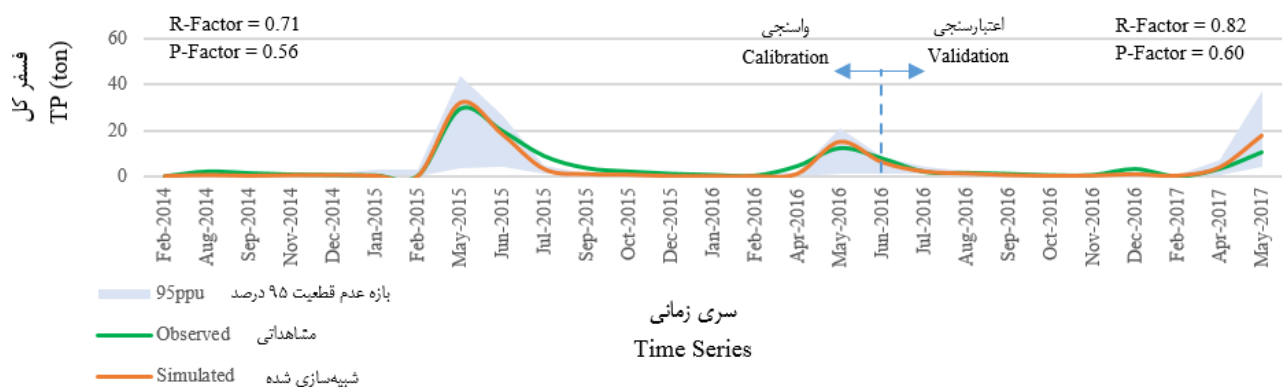
شکل ۹- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی رسوب در ایستگاه سیرا - کرج

Figure 9- Sediment calibration and validation results at Sira-karaj station

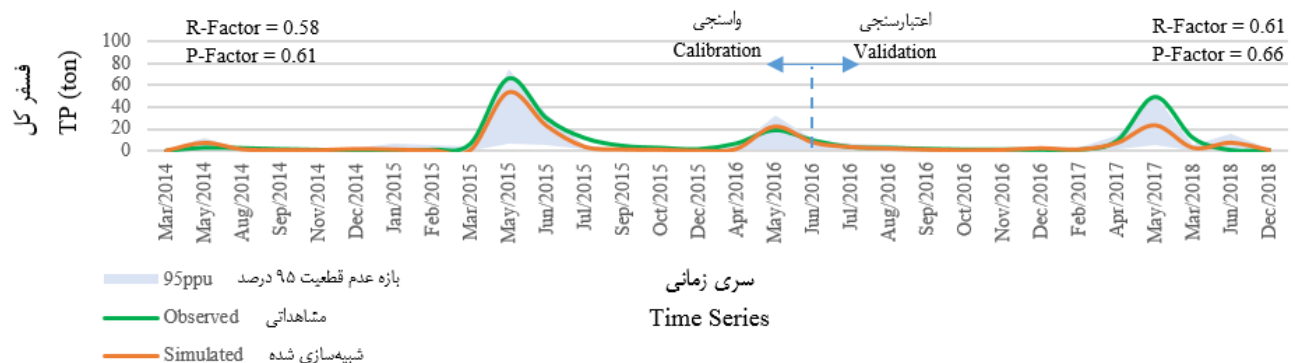
ارزیابی واسنجی فسفر کل

فاکتور R در هر دو ایستگاه دیزین و شهرستانک کمتر از مقدار متناظر آن در پیش‌بینی دبی جریان و رسوب است که نشان‌دهنده عدم قطعیت کم پارامترهای استفاده شده در واسنجی فسفر کل است و به دلیل مقدار کمتر فاکتور R نسبت مشارکت مقادیر مشاهداتی فسفر کل در بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد (فاکتور P) نیز عددی کوچک‌تر به دست آمده است. یکی از دلایل کمتر بودن فاکتور P در پیش‌بینی فسفر کل، پهنای بسیار کم بازه عدم قطعیت (فاکتور R) در ماه‌هایی است که مقادیر فسفر کل کمتر از ۲۰ تن می‌باشد (شکل‌های ۱ و ۱۱). با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ که شاخص‌های NS و R^2 بیش از ۰/۹ بوده و با RMSE بین ۱/۳۸ تا ۳/۷۴ تن در ماه، مقدار RSR در دو ایستگاه بین ۰/۱۷ تا ۰/۴۵ حاصل شده، مدل در پیش‌بینی فسفر کل عملکرد بسیار خوبی داشته و بهتر از دبی جریان و رسوب تخمین زده شده است. با توجه به جدول ۵ فسفر کل به طور متوسط در اغلب فصول کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی شده اما

در فصل زمستان بیشتر از آن برآورد گردیده است. کمترین اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای ایستگاه دیزین در فصل زمستان و برای ایستگاه شهرستانک در فصل پاییز رقم خورده است که ضخامت بازه عدم قطعیت ۹۵ درصد در کمترین حالت خود قرار داشته و بیشترین اختلاف مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیز مربوط به فصل بهار بوده که در نقاط اوج (مه میلادی) این اختلاف به بیشترین حد خود می‌رسد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). فسفر کل در این منطقه با توجه به حاصل شدن NS بالای ۰/۹ بسیار نزدیک و یا بهتر از برخی مطالعاتی بوده که در حوضه‌های کوهستانی یا غیر کوهستانی مدل‌سازی کرده‌اند (Liu et al., 2016; Niraula et al., 2013; Zeiger and Hubbart, 2016). این نشان می‌دهد که SWAT در شبیه‌سازی فسفر کل در مناطق کوهستانی مشابه هم از نظر زمان‌بندی تغییرات بار فسفر کل و هم از نظر مقدار تغییرات آن می‌تواند عملکرد بسیار خوبی داشته باشد.



شکل ۱۰- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی فسفر کل در ایستگاه دیزین
Figure 10- Total phosphorus calibration and validation results at Dizin station



شکل ۱۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی فسفر کل در ایستگاه شهرستانک
Figure 11- Total phosphorus calibration and validation results at Shahrestanak station

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهای ضریب جریان پایه آب زیرزمینی (ALPHA_BF)، ضریب زبری رواناب سطحی (OV_N) و آهنگ افزایش بارش (PLAPS) به ترتیب حساس‌ترین پارامترها نسبت به دبی جریان، رسوب و فسفر کل بودند. همچنین در تحلیل حساسیت مدل برای متغیر فسفر کل، سه پارامتر TLAPS، PLAPS و SFTMP از حساسیت بالایی برخوردار بودند. این موضوع اهمیت بالای دو عامل تغییرات ارتفاع و برف و نقش مؤثر آن‌ها در رژیم کمی و کیفی رودخانه در حوضه کوهستانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. با توجه به ضرایب R^2 ، NS، RMSE و RSR بدست آمده در دوره واسنجی و اعتبارسنجی هر سه متغیر رواناب، رسوب و فسفر کل، مدل در شبیه‌سازی رواناب و فسفر کل عملکرد بهتری داشته است. به‌ویژه در مورد فسفر کل و در دوره واسنجی مدل ضرایب NS و R^2 دارای مقادیر بالای ۰/۹ و RSR کمتر از ۰/۵ بوده که نشان‌دهنده پیش‌بینی بسیار خوب مدل است. با توجه به مشارکت بالای ۷۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده رواناب و رسوب و حدود ۶۰ درصد مقادیر اندازه‌گیری شده فسفر کل، بازه عدم قطعیت منطقی و مناسبی برای خروجی‌های مدل به دست آمده که ناشی از انتخاب محدوده مقادیر مناسب برای پارامترها در فرایند واسنجی است. در هر سه متغیر بیشترین عدم قطعیت مربوط به فصل بهار به‌ویژه در نقاط اوج جریان (مه میلادی) بوده که شامل بیشترین مقادیر مشاهداتی در هر سه متغیر بوده و دقت پیش‌بینی مدل نیز کمتر می‌باشد. بهترین پیش‌بینی‌های مدل نیز عمدتاً در فصلی است که دبی متوسط جریان به دبی پایه نزدیک بوده و کمترین بار ماهانه رسوب و فسفر در رودخانه منتقل می‌شود. با در نظر گرفتن تفاضل مقادیر متوسط مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (جدول ۵) برای دبی جریان و رسوب در فصل پاییز و برای فسفر کل در فصل زمستان بهترین پیش‌بینی‌ها انجام شده که دارای کمترین

عدم قطعیت به نسبت فصول دیگر سال هستند. مشکل پیش‌بینی نقاط اوج دبی جریان و رسوب در مطالعات مشابه مربوط به شبیه‌سازی حوضه‌های آبریز کوهستانی در ایران و خارج از ایران نیز تجربه شده است (Flynn and Van Rostamian et al., 2008; Liew, 2011; Jalowska and Yuan, 2019) که می‌توان آن را به عوامل مختلفی از جمله کمبود داده‌های دمای روزانه، وابستگی SWAT به مدل‌های تجربی روندیابی رسوب و فرسایش، و عدم بررسی تغییرات برخی پارامترهای دارای عدم قطعیت به تفکیک زیرحوضه‌ها در واسنجی مدل مرتبط دانست.

با توجه به اینکه اکثر شاخص‌های ارزیابی کیفیت، حاکی از عملکرد مطلوب شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و فسفر کل در این حوضه بوده‌اند، مدل واسنجی شده در این تحقیق می‌تواند مبنای پیش‌بینی‌های آتی در خصوص کمیت‌های مورد اشاره قرار گیرد و بر اساس آن می‌توان سناریوهای مدیریتی برای کنترل کیفیت آب تعریف کرد. از جمله محدودیت‌ها در تحقیق حاضر می‌توان به وجود تعداد زیاد داده‌های مفقود در ایستگاه‌های هواشناسی و بخصوص برای متغیر دما اشاره کرد که به نظر می‌رسد با توجه به تغییرات زیاد دما و بارش در ارتفاعات به دلیل ماهیت کوهستانی منطقه، هرچه اطلاعات کامل‌تری از اندازه‌گیری‌های روزانه ایستگاه‌های هواشناسی به مدل ارائه شود، مدل پیش‌بینی بهتری از روند تغییرات کمیت‌ها به‌خصوص در نقاط اوج ارائه می‌کند.

سپاسگزاری

نویسندگان این تحقیق از سازمان حفاظت محیط‌زیست، اداره کل محیط‌زیست البرز و شرکت مدیریت منابع آب ایران به‌خاطر ارائه اطلاعات کمی و کیفی رودخانه کرج تقدیر و تشکر به عمل می‌آورند.

منابع

- 1- Abbaspour K.C., Johnson C.A., and Genuchten M.T van. 2004. Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure 1352: 1340–1352. <https://doi.org/10.2113/3.4.1340>.
- 2- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S.R.I.N.I.V.A.S.A.N.B., Srinivasan R., Yang H., and Kløve B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology 524: 733–752. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>.
- 3- Abbaspour K.C., Yang J., Maximov I., Siber R., Bogner K., Mieleitner J., Zobrist J., and Srinivasan R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. Journal of Hydrology 333(2–4): 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>.
- 4- Andrianaki M., Shrestha J., Kobierska F., Nikolaidis N.P., and Bernasconi S.M. 2019. Assessment of SWAT spatial and temporal transferability for a high-altitude glacierized catchment. Hydrology and Earth System Sciences 23(8): 3219–3232. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3219-2019>.
- 5- Arnold J.G., Kiniry J.R., Srinivasan R., Williams J.R., Haney E.B., and Neitsch S.L. 2012. Soil & Water Assessment

Tool.

- 6- Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., and Williams J.R. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 34(1): 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- 7- Azimi M., Heshmati G.A., Farahpour M., Faramarzi M., and Abbaspour K.C. 2013. Modeling the impact of rangeland management on forage production of sagebrush species in arid and semi-arid regions of Iran. Ecological Modelling 250: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.10.017>.
- 8- Bagnold R.A. 1977. Bed load transport by natural rivers. Water Resources Research 13(2): 303-312. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00303>.
- 9- Bhatta B., Shrestha S., Shrestha P.K., and Talchabhadel R. 2020. Modelling the impact of past and future climate scenarios on streamflow in a highly mountainous watershed: A case study in the West Seti River Basin, Nepal. Science of the Total Environment. Elsevier B.V 740: 140156. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140156>.
- 10- Carpenter S.R. 2008. Phosphorus control is critical to mitigating eutrophication. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 105(32): 11039-11040. <https://doi.org/10.1073/pnas.080611210>.
- 11- D'Ambrosio E., De Girolamo A.M., Barca E., Ielpo P., and Rulli M.C. 2017. Characterising the hydrological regime of an ungauged temporary river system: a case study. Environmental Science and Pollution Research 24(16): 13950-13966. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7169-0>.
- 12- Engebretsen A., Vogt R.D., and Bechmann M. 2019. SWAT model uncertainties and cumulative probability for decreased phosphorus loading by agricultural Best Management Practices. Catena 175: 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.004>.
- 13- Faramarzi M., Abbaspour K.C., Adamowicz W.L.V., Lu W., Fennell J., Zehnder A.J.B., and Goss G.G. 2017. Uncertainty based assessment of dynamic freshwater scarcity in semi-arid watersheds of Alberta, Canada. Journal of Hydrology Regional Studies 9: 48-68. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2016.11.003>.
- 14- Flynn K.F., and Van Liew M.W. 2011. Evaluation of SWAT for sediment prediction in a mountainous snowmelt-dominated catchment. Transactions of the ASABE 54(1): 113-122. <https://doi.org/10.13031/2013.36265>.
- 15- Grusson Y., Sun X., Gascoin S., Sauvage S., Raghavan S., Anctil F., and Sánchez-Pérez J.M. 2015. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed. Journal of Hydrology 531: 574-588. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.10.070>.
- 16- Hasan M.A., and Pradhanang S.M. 2017. Estimation of flow regime for a spatially varied Himalayan watershed using improved multi-site calibration of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. Environmental Earth Sciences. Springer Berlin Heidelberg 76(23). <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7134-3>.
- 17- Jalowska A.M., and Yuan Y. 2019. Evaluation of SWAT impoundment modeling methods in water and sediment simulations. JAWRA Journal of the American Water Resources Association 55(1): 209-227. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12715>.
- 18- Jeong J., Yang J., Han S., Seo Y.S., and Hong Y. 2020. Assessment of coupled hydrologic and biogeochemical Hg cycles in a temperate forestry watershed using SWAT-Hg. Environmental Modelling & Software 126: 104644. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104644>.
- 19- Kalra A., and Ahmad S. 2011. Evaluating changes and estimating seasonal precipitation for the Colorado River Basin using a stochastic nonparametric disaggregation technique. Water Resources Research 47(5): 1-26. <https://doi.org/10.1029/2010WR009118>.
- 20- Kheiri S., Solak C.N., Edlund M.B., Spaulding S., Nejadshattari T., Asri Y., and Hamdi S.M.M. 2018. Biodiversity of diatoms in the Karaj River in the Central Alborz, Iran. Diatom Research 33(3): 355-380. <https://doi.org/10.1080/0269249X.2018.1557747>.
- 21- Kulkarni A.V., Rathore B.P., Singh S.K., and Ajai. 2010. Distribution of seasonal snow cover in central and western Himalaya. Annals of Glaciology 51(54): 123-128. <https://doi.org/10.3189/172756410791386445>.
- 22- Lamba J., Thompson A.M., Karthikeyan K.G., Panuska J.C., and Good L.W. 2016. Effect of best management practice implementation on sediment and phosphorus load reductions at subwatershed and watershed scale using SWAT model. International Journal of Sediment Research 31(4): 386-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.004>.
- 23- Li X., and Williams M.W. 2008. Snowmelt runoff modelling in an arid mountain watershed, Tarim Basin, China. Hydrological Processes 22(19): 3931-3940. <https://doi.org/10.1002/hyp.7098>.
- 24- Liu R., Xu F., Zhang P., Yu W., and Men C. 2016. Identifying non-point source critical source areas based on multi-factors at a basin scale with SWAT. Journal of Hydrology 533: 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.024>.
- 25- Mengistu A.G., van Rensburg L.D., and Woyessa Y.E. 2019. Techniques for calibration and validation of SWAT model in data scarce arid and semi-arid catchments in South Africa. Journal of Hydrology: Regional Studies 25: 100621. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100621>.
- 26- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., and Veith T.L. 2007. Model evaluation

- guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- 27- Moriasi D.N., Gitau M.W., Pai N., and Daggupati P. 2015. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE* 58(6): 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- 28- Nash J., and Sutcliffe I. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- 29- Navratil O., Esteves M., Legout C., Gratiot N., Nemery J., Willmore S., and Grangeon T. 2011. Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *Journal of Hydrology* 398(3-4): 246-259. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.025>.
- 30- Neitsch S.L. 2005. Soil and Water Assessment Tool. User's Manual Version 2005 476.
- 31- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., and Williams J. 2011. Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute.
- 32- Niraula R., Kalin L., Srivastava P., and Anderson C.J. 2013. Identifying critical source areas of nonpoint source pollution with SWAT and GWLF. *Ecological Modelling* 268: 123-133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.08.007>.
- 33- Noor H., Vafakhah M., Taheriyoun M., and Moghadasi M. 2014. Hydrology modelling in Taleghan mountainous watershed using SWAT. *Journal of Water and Land Development* 20(1): 11-18. <https://doi.org/10.2478/jwld-2014-0003>.
- 34- Prasannakumar V., Vijith H., Abinod S., and Geetha N.J.G.F. 2012. Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology. *Geoscience Frontiers* 3(2): 209-215. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.11.003>.
- 35- Rahman K., Maringanti C., Beniston M., Widmer F., Abbaspour K., and Lehmann A. 2013. Streamflow Modeling in a Highly Managed Mountainous Glacier Watershed Using SWAT: The Upper Rhone River Watershed Case in Switzerland. *Water Resources Management* 27(2): 323-339. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0188-9>.
- 36- Rostamian R., Jaleh A., Afyuni M., Mousavi S., Heidarpour M., Jalalian A., and Abbaspour K. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53(5): 977-988. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.5.977>.
- 37- Singh V., and Goyal M.K. 2016. Analysis and trends of precipitation lapse rate and extreme indices over north Sikkim eastern Himalayas under CMIP5ESM-2M RCPs experiments. *Atmospheric Research* 167: 34-60. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.005>.
- 38- Talebizadeh M., Morid S., Ayyoubzadeh S.A., and Ghasemzadeh M. 2010. Uncertainty analysis in sediment load modeling using ANN and SWAT model. *Water Resources Management* 24(9): 1747-1761. <https://doi.org/10.1007/s11269-009-9522-2>.
- 39- Viviroli D., Du HH., Messerli B., Meybeck M., and Weingartner R. 2007. Mountains of the world , water towers for humanity: Typology, Mapping, and Global Significance 43:1-13. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>.
- 40- Wang W., Xie Y., Bi M., Wang X., Lu Y., and Fan Z. 2018. Effects of best management practices on nitrogen load reduction in tea fields with different slope gradients using the SWAT model. *Applied Geography* 90: 200-213. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.08.020>.
- 41- Williams J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 11(5): 965-974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>.
- 42- Wu F., Zhan J., Wang Z., and Zhang Q. 2015. Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 79: 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2014.08.002>.
- 43- Wu L., Long T yu., Liu X., and Ma X. 2013. Modeling impacts of sediment delivery ratio and land management on adsorbed non-point source nitrogen and phosphorus load in a mountainous basin of the three Gorges reservoir area, China. *Environmental Earth Sciences* 70(3): 1405-1422. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2227-0>.
- 44- Zeiger S.J., and Hubbart J.A. 2016. A SWAT model validation of nested-scale contemporaneous stream flow, suspended sediment and nutrients from a multiple-land-use watershed of the central USA. *Science of The Total Environment* 572: 232-243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.178>.
- 45- Zhang G., Su X., Ayantobo O.O., Feng K., and Guo J. 2021. Spatial interpolation of daily precipitation based on modified ADW method for gauge-scarce mountainous regions: A case study in the Shiyang River Basin. *Atmospheric Research* 247: 105167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105167>.



Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model

B. Sadeghi¹, B. Farhadi Bansouleh^{2*}, A. Bafkar³, M. Ghobadi⁴

Received: 22-01-2022

Revised: 07-02-2022

Accepted: 10-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Sadeghi B, Farhadi Bansouleh B., Bafkar A., and Ghobadi M. 2022. Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model. Journal of Water and Soil 36(2): 185-196. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74628.1133](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74628.1133)

Introduction

The rapid growth of the world's population, followed by an increase in the need for water, has put great pressure on water resources, so it is necessary to plan for the optimal use and increase of efficiency of this vital resource. Sunflower is one of the most important oilseed crops that is mainly cultivated in Kermanshah province. Therefore, determining the appropriate sowing time of this crop for maximum production and water use efficiency is of particular importance. Because field experiments are costly and time-consuming, researchers use crop growth simulation models to determine the optimal planting time for each crop in a specific environment and climate. The use of simulation models minimizes the limitations of field experiments and allows the analysis of plant responses to environmental stresses and management scenarios. The objective of this study was to determine the optimal planting date of the Farrokh sunflower cultivar in four regions of Kermanshah province (Kermanshah, Islam Abad, Sarpol Zahab, and Kangavar) in order to maximize yield and water use efficiency using the AquaCrop model.

Materials and Methods

A field experiment was conducted at the Research Farm of Razi University, Kermanshah, Iran in order to calibrate and validate the crop parameters in the AquaCrop model. The experiment was performed in a randomized complete block design with eight irrigation treatments in three replications. The irrigation treatments were the application of 60, 80, 100, and 120% of irrigation requirement (T1, T2, T3, and T4), 20 and 40% deficit irrigation in vegetative phase (T5 and T6), and 20 and 40% deficit irrigation in reproductive phase (T7 and T8). The crop water requirement was calculated based on the daily weather data collected from an automated meteorological station at the Research Farm using the FAO Penman-Monteith equation. During the growing season, canopy cover, biomass, and soil moisture were measured weekly. The crop parameters were calibrated based on the measured data in treatments T1, T3, T6, and T7 and validated with four treatments T2, T4, T6, and T8. In the calibration and validation stages, the statistical indices including compatibility index (d) and root mean square error (RMSE) were used to evaluate the model outputs. The calibrated model was used to simulate crop growth based on daily weather data for 30 years (1988-2017) in four synoptic stations in Kermanshah province (Kermanshah, Islam Abad, Sarpol Zahab, and Kangavar) and for several different planting dates. The crop water productivity was calculated based on simulated grain yield and seasonal crop evapotranspiration. Finally, the model outputs under different planting dates were analyzed to determine the most appropriate planting time from the perspective of maximum production and maximum water use efficiency.

Results and Discussion

Statistical indicators show that the model has simulated the parameters of biomass, crop canopy, and soil moisture in the calibration stage with good accuracy. T1 and T6 treatments in biomass simulation, T7, T6, and

1, 2 and 3- Graduated M.Sc and Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: bfarhadi2001@yahoo.com)

4- Associate Professor, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Razi University, Kermansh, Iran

T3 treatments in crop canopy simulation, and T3 and T7 treatments in soil moisture simulation had the highest accuracy. The accuracy of the model outputs in the validation stage for biomass and canopy cover was as accurate as in the calibration stage, while the accuracy of the simulated soil moisture in the validation stage was not high except in T4 treatment. Based on the model results, grain yield, seasonal evapotranspiration and water productivity were determined. According to the results, it can be said that in the study period (1988 -2017), grain yield has generally increased with a slight slope. The results showed that the planting date, which maximizes grain yield and water productivity, varies in the studied regions. According to the model results, planting in the second decade of May and the second decade of June will lead to the highest grain yield and water productivity in Kermanshah, respectively. Planting in the third decade of May showed the highest grain yield and crop water productivity in Islam Abad. In Sarpol Zahab, which has the highest temperature among the studied stations, planting in the last decade of March and the first decade of April has the highest grain yield and water productivity, respectively. In Kangavar, which is located in the east of Kermanshah province and has the coldest climate, by cultivating sunflower in the last decade of May and the first decade of June, respectively, the highest grain yield and water productivity can be achieved.

Conclusion

Due to the fact that some crop parameters of crop growth simulation models are variety specific, in this study, the crop parameters of the AquaCrop model for Farrokh sunflower cultivar were calibrated and validated. The accuracy of the calibrated model for estimating biomass and canopy cover was higher than soil moisture. The simulation results showed that the values of the studied parameters (grain yield and seasonal evapotranspiration) have changes according to the planting time in each region. The highest crop yield can be obtained in Sarpol Zahab, Islam Abad, Kermanshah, and Kangavar regions (west to east of the province) by cultivation in the last decade of March, last decade of April, the second decade of May, and last decade of May, respectively. In all study areas except Islamabad, planting date that resulted in maximum water productivity was different from the planting date that had maximum grain yield station and delayed planting had the highest water productivity.

Keywords: AquaCrop, Planting date, Productivity, Simulation, Sunflower



مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۱۹۶-۱۸۵

بررسی تاثیر تاريخ كشت روى عملكرد و بهره‌ورى مصرف آب آفتابگردان با استفاده از مدل AquaCrop

بهناز صادقی^۱ - بهمن فرهادی بانسوله^{۲*} - على بافكار^۳ - مختار قبادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

زمان کشت یکی از عواملی است که روی میزان آب مصرفی، عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گیاهان تأثیرگذار است. مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه، ابزارهای مفیدی برای ارزیابی تأثیر تاریخ کشت روی پارامترهای مورد اشاره و تعیین زمان مناسب کشت می‌باشند. در این مطالعه به منظور تعیین تاریخ مناسب کشت آفتابگردان در استان کرمانشاه از مدل AquaCrop استفاده شد. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای گیاهی مدل AquaCrop آزمایشی مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با هشت تیمار (تیمارهای ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی در کل دوره رشد و تیمارهای ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره رویشی و دوره زایشی) در سه تکرار اجرا گردید. رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از مدل واسنجی شده، براساس آمار هواشناسی ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۷) برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) و برای چند تاریخ کشت مختلف شبیه‌سازی گردید. مقادیر عملکرد دانه، تبخیر و تعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب بر اساس خروجی‌های مدل AquaCrop تعیین گردید. نتایج بیانگر این بود که با توجه به تغییرات پارامترهای هواشناسی در ۳۰ سال مورد بررسی، عملکرد پتانسیل دانه در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی بوده است. همچنین نتایج نشان داد تاریخ کشت مناسب که منجر به بالاترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب می‌شود در مناطق مختلف متفاوت است. مناسب‌ترین تاریخ کشت به منظور دستیابی به حداکثر عملکرد دانه در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به ترتیب دهه‌های اول فروردین، دوم اردیبهشت، سوم اردیبهشت و اول خرداد تعیین گردید. دهه‌های دوم فروردین، اول اردیبهشت، سوم خرداد و دوم خرداد از نظر بهره‌وری مصرف آب مناسب‌ترین تاریخ کشت برای آفتابگردان به ترتیب در ایستگاه‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: آفتابگردان، بهره‌وری، تاریخ کشت، شبیه‌سازی، مدل AquaCrop

مقدمه

برنامه‌ریزی در جهت استفاده بهینه از منابع آب و افزایش

بهره‌وری به‌خصوص در بخش کشاورزی ضروری به نظر می‌رسد. با اعمال مدیریت صحیح در سیستم آب، خاک و گیاه می‌توان ضمن افزایش محصول، یک کشاورزی پایدار ایجاد نمود. تاریخ کاشت عامل مهمی است که بر طول دوران رشد رویشی و زایشی گیاهان و نهایتاً کیفیت و کمیت محصول تولیدی تأثیر می‌گذارد. دما، نور خورشید و سایر عوامل هواشناسی به شکل منفرد یا همراه باهم رشد و تولید گیاه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و با تغییر در تاریخ کاشت، پارامترهای هواشناسی نیز در طول دوره رشد تغییر می‌کنند. همچنین تاریخ کاشت، مراحل فنولوژیکی گیاه و کل تولید زیست‌توده را کنترل نموده و در کارایی تبدیل زیست‌توده به عملکرد مؤثر است (Khichar and

۱، ۲ و ۳ - به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی و استادیاران گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

(*) - نویسنده مسئول: (Email: bfarhadi2001@yahoo.com)

۴ - دانشیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

DOI: 10.22067/JSW.2022.74628.1133

محصولات زراعی و مدیریت آب در خاک ارائه شده است که البته نیاز به واسنجی داشته و متغیرهای ورودی آنها نسبتاً زیاد است (Momeni et al., 2008). فائو در سال ۲۰۰۹، مدل شبیه‌سازی AquaCrop را بر اساس معادله دورنباس و کاسام و با اصلاحاتی روی آن ارائه نمود که محاسبات آن بر اساس گام روزانه می‌باشد (Steduto et al., 2009). سیستم گیاه در مدل AquaCrop با پنج مؤلفه اصلی فنولوژی، تاج پوشش گیاهی، عمق ریشه‌دهی، تولید زیست‌توده و محصول قابل برداشت تعریف می‌شود. مدل AquaCrop که تکامل و توسعه یافته مدل Budget است، دارای ساختار پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر بوده و با چهار جزء اساسی سر و کار دارد: خاک، گیاه (رشد، توسعه و عملکرد)، اتمسفر (رژیم حرارتی، بارش، نیاز تبخیری و غلظت دی‌اکسید کربن) و روابط بین بخشی شرایط محیطی، تنش‌ها و واکنش گیاه (Raes et al., 2009). جنبه‌های مفهومی و پایه‌ای مدل را استدیو و همکاران در سال ۲۰۰۹ (Steduto et al., 2009) تشریح کرده‌اند و الگوریتم و نحوه استفاده از نرم‌افزار را راس و همکاران در سال ۲۰۰۹ (Raes et al., 2009) ارائه نموده‌اند. تودوروویک و همکاران (Ramezani, 2019; Todorovic et al., 2009)، برای شبیه‌سازی رشد گیاه آفتابگردان تحت سناریوهای آبی در جنوب ایتالیا، سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST را با هم مقایسه نمود و طبق نتایج تحقیق، تفاوت قابل توجهی بین سه مدل مشاهده نشد، اما استفاده از مدل AquaCrop به دلیل نیاز به اطلاعات ورودی کمتر در شرایطی که اطلاعات کافی در دسترس نباشد، پیشنهاد شد. ابراهام و همکاران (Abrha et al., 2012) کارایی مدل AquaCrop برای برآورد عملکرد و تعیین تاریخ کاشت مناسب پنج رقم جو در کشورهای آمریکا، ایتالیا، اتیوپی و سوریه بررسی کردند. بر پایه نتایج این بررسی، مدل AquaCrop، امکان برآورد مناسب عملکرد جو بر پایه داده‌های محدود محیطی را به خوبی داشت. از مدل AquaCrop در زیمبابوه (۲۰۱۴) برای تعیین تاریخ کاشت مناسب ارزن مرواریدی، سویا و آفتابگردان نیز استفاده شد (Dera et al., 2014). در مطالعه‌ای دیگر از مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی WOFOST برای تعیین تاریخ کاشت بهینه جو در منطقه ماهیدشت کرمانشاه استفاده شد (Ahmadi and Farhadi Bansoulehi, 2010). احمدپور (Ahmadpour, 2013) از مدل AquaCrop برای تعیین بهترین زمان کاشت گیاه ذرت در کرمانشاه استفاده کرد و نتیجه گرفت که کاشت گیاه در اواسط فروردین ماه (اوایل ماه آوریل) عملکرد بهتری را به همراه خواهد داشت. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاهی می‌توان اثر پارامترهایی که قابل تغییر هستند (از جمله تاریخ کاشت) را بررسی و بهترین حالت آن پارامتر را جهت تولید بیشتر و یا افزایش بهره‌وری مصرف آب تعیین نمود. از آنجا که در استان کرمانشاه بعد از کاشت غلات پاییزه (گندم و جو) گیاه آفتابگردان به عنوان کشت دوم در

(Niwas, 2006)، به‌طور معمول، در هر منطقه برای کشت هر گیاه یک بازه زمانی در نظر گرفته می‌شود (Rao et al., 2001). مطالعات متعددی در مناطق مختلف برای تعیین بازه زمانی مناسب کشت محصولات انجام شده است (۹). با توجه به اینکه آزمایش‌های مزرعه‌ای پرهزینه و زمان‌بر هستند و در برخی شرایط امکان‌پذیر نمی‌باشند، محققان از مدل‌های شبیه‌سازی رشد محصول برای تعیین تاریخ کاشت بهینه محصولات در شرایط محیطی خاص استفاده می‌کنند (Khaleghi, 2019). استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات میدانی را به حداقل رسانده و امکان تحلیل واکنش گیاه به تنش‌های محیطی و سناریوهای مدیریتی را فراهم می‌کند (Oiganji et al., 2016). لازم به ذکر است که مدل‌ها به‌طور کامل نمی‌توانند جایگزین مطالعات مزرعه‌ای شوند و استفاده ترکیبی از مدل‌های شبیه‌سازی و آزمایش‌های مزرعه‌ای راهکار قابل قبولی می‌باشد (Farahani et al., 2009). دقت نتایج حاصل از مدل‌ها به دقت داده‌های ورودی بستگی دارد. در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها قادر به ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات دراز مدت آن خواهند بود (Farahani et al., 2009; Mohammadi et al., 2015). مدل‌های شبیه‌ساز رشد گیاهی با شبیه‌سازی محیط مورد نظر، امکان پیش‌بینی آنچه در مزرعه رخ خواهد داد را فراهم می‌کنند. آفتابگردان یکی از محصولات مهم کشاورزی در ایران و استان کرمانشاه می‌باشد که در سطح نسبتاً وسیعی کشت می‌شود. بر اساس آمارنامه‌های وزارت جهاد کشاورزی، حدود ۱۷ درصد سطح زیرکشت آفتابگردان آجیلی در استان کرمانشاه کشت می‌شود. گیاه آفتابگردان در محدوده وسیعی از تاریخ‌های کشت رشد می‌کند، اما تاریخ کشت بهینه باعث انطباق مراحل رشد گیاه با شرایط مطلوب محیطی شده و موجب افزایش عملکرد می‌شود (Bange et al., 1997). بنابراین تعیین مناسب‌ترین زمان کشت این گیاه جهت افزایش تولید یا بهره‌وری مصرف آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بررسی‌های صورت گرفته نشان‌دهنده این مطلب می‌باشد که تاریخ کشت در نقاط مختلف جهان نیاز به بهینه‌سازی دارد. محققین با انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای تاریخ کشت مناسب آفتابگردان را در برخی از مناطق کشور تعیین کرده‌اند. مظاهری‌لقب و همکاران (Mazaheri laqab et al., 2011)، صفاری (Safari, 2006)، میرزایی و همکاران (Mirzaei et al., 2012) و خواجه پور و سیدی (Khajehpour and Seyedi, 2000) به ترتیب تاریخ‌های ۳۰ فروردین را در قروه کردستان، نیمه دوم اردیبهشت در کرمان، ۲۰ خرداد در اسلام‌آبادغرب و ۷ اردیبهشت در اصفهان را به عنوان تاریخ کشت مناسب آفتابگردان در این مناطق پیشنهاد کردند. در دهه‌های اخیر مدل‌های متعددی از قبیل CERES، EPIC، WOFOST، CROPSYST و غیره برای شبیه‌سازی رشد

فصل بهار به‌طور وسیع کشت می‌شود و با بررسی مطالعات فوق و اهمیت مدل AquaCrop در تعیین تاریخ کشت و توجه به این مهم که تاکنون تاریخ کشت بهینه و بهره‌وری آب و عملکرد گیاه آفتابگردان در استان کرمانشاه مورد بررسی و ارزیابی قرار نگرفته است، لذا این مطالعه با هدف بررسی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب آفتابگردان (رقم فرخ) با استفاده از مدل AquaCrop در تاریخ کشت‌های مختلف در چهار شهرستان استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) انجام گردیده است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی با مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹ دقیقه و ارتفاع ۱۳۲۰ متر از سطح دریا اجرا گردید. در این منطقه متوسط بارندگی ۴۵۶ میلی‌متر و میانگین درجه حرارت سالانه حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بافت خاک مزرعه تحقیقاتی تا عمق ۶۰ سانتی‌متری رسی و از عمق ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری لوم رسی سیلتی می‌باشد. برخی از خصوصیات فیزیکی خاک منطقه مطالعاتی در جدول ۱ ارائه شده است.

به منظور تعیین تاریخ کشت مناسب برای آفتابگردان در منطقه کرمانشاه به کمک مدل AquaCrop، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی و با هشت تیمار (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰) درصد نیاز آبی واقعی در کل دوره رشد (به‌ترتیب تیمارهای T1، T2، T3 و T4) و تیمارهای ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره رویشی (به‌ترتیب T5 و T6) و ۲۰ و ۴۰ درصد کم‌آبیاری در دوره زایشی (به‌ترتیب T7 و T8) در سه تکرار انجام گردید. برای برآورد نیاز آبی گیاه آفتابگردان در طرح آزمایشی از داده‌های روزانه هواشناسی در زمان اجرای طرح (سال ۱۳۹۶) و فرمول پنمن - مانتیث فائو (Allen *et al.*, 1998) استفاده شد. این داده‌ها از ایستگاه هواشناسی خودکار

مزرعه دریافت و مبنای محاسبات آبیاری قرار گرفتند. لازم به ذکر است که علت انتخاب تیمار ۲۰ درصد بیش‌آبیاری، عدم اطمینان کافی به روش تعیین نیاز آبی تیمار شاهد (با روش پنمن مانتیث فائو) در منطقه مورد مطالعه بود (Mansouri, 2016). دور آبیاری با توجه به خصوصیات فیزیکی خاک هفت روز در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که جهت اطمینان از سبز شدن بذرها در مراحل اول رشد دور آبیاری کمتر از ۷ روز در نظر گرفته شد به طوری که تنش آبی به بوته‌ها وارد نشود. آب در اولین آبیاری (خاکاب) و مراحل بعد از آن تا قبل از استقرار کامل بوته‌ها به‌طور مساوی به کرت‌ها داده شد. با توجه به کوچک بودن طول مزرعه (۴ متر) و بسته بودن انتهای کرت‌ها، راندمان آبیاری برابر ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. حجم آب لازم جهت ورود به هر جویچه با توجه به نیاز ناخالص آبی و داشتن مساحت کرت‌ها، محاسبه گردید. از آبیاری هفتم به بعد که بوته‌ها به استقرار کامل (مرحله شش برگه) رسیدند، اعمال تیمارها آغاز گردید. به این صورت که بعد از محاسبه نیاز آبیاری برای تیمار شاهد، حجم آب لازم جهت آبیاری سایر تیمارها ضریبی از حجم آب لازم برای آبیاری تیمار شاهد در نظر گرفته شد. اساس محاسبه نیاز آبی تیمار شاهد برای مراحل پنجم تا هشتم آبیاری، نمونه‌برداری از خاک به تعداد سه تکرار و از دو عمق ۱۵ و ۴۵ سانتی‌متری (با توجه به گسترش و عمق ریشه در مراحل مذکور) قبل از انجام آبیاری، محاسبه درصد حجمی رطوبت در آن زمان و رساندن رطوبت خاک به ظرفیت زراعی مزرعه بود. از آبیاری هفتم تا شانزدهم با استفاده از داده‌های هواشناسی و کاربرد رابطه پنمن مانتیث فائو نیاز آبی تیمار شاهد محاسبه گردید. اشاره به این نکته ضروری است که برای اعمال دقیق تیمارها، از مرحله شروع اعمال تیمارها، آبیاری با استفاده از شیلنگ و کنتور حجمی با دقت ۰/۱ لیتر انجام شد. کلیه مراحل کاشت، داشت و برداشت با نظارت مشاور زراعی طرح انجام گردید. به دلیل این که در مدل شبیه‌سازی رشد گیاهی AquaCrop، تأثیر علف‌های هرز، آفات و سایر عوامل خارجی در نظر گرفته نشده است، به محض پیدایش علف هرز، وجین انجام می‌گرفت.

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی
Table 1- Soil physical characteristics of experimental farm

عمق خاک	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی	رطوبت اشباع	رطوبت نقطه پژمردگی	ظرفیت زراعی
Soil depth (cm)	Soil texture	Hydraulic conductivity (cm.hr ⁻¹)	Saturated moisture (m ³ .m ⁻³)	Permanent wilting point (m ³ .m ⁻³)	Field capacity (m ³ .m ⁻³)
0-30	Clay	0.42	0.55	0.22	0.42
30-60	Clay	0.42	0.55	0.22	0.42
60-90	Silty clay loam	0.50	0.52	0.23	0.43

جمع‌آوری داده

توجه به خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی ایجاد گردید. برای هر کدام از تیمارهای آبیاری یک فایل آبیاری که حاوی تاریخ و عمق آب آبیاری بود در قسمت فایل‌های مدیریتی ایجاد شد. فایل گیاهی از مهم‌ترین فایل‌های مورد نیاز برای اجرای مدل می‌باشد و حاوی پارامترهای متعددی است که برخی از آنها امکان اندازه‌گیری در محل را نداشتند. در این شرایط پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری نیستند بایستی برآورد گردند. منظور از واسنجی مدل برآورد پارامترهای (گیاهی) مدل است به گونه‌ای که نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت داشته باشد. در این مطالعه، مدل، بر اساس وزن زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک واسنجی گردید. فایل گیاهی واسنجی شده توسط منصوری (Mansouri, 2016) به عنوان فایل گیاهی اولیه برای مدل تعریف گردید. مدل بر اساس چهار تیمار (T1، T3، T6 و T7) واسنجی و بر اساس چهار تیمار دیگر (T2، T4، T5 و T8) صحت‌سنجی گردید.

ارزیابی آماری مدل

برای ارزیابی نتایج مدل از آماره‌های شاخص سازگاری (d) و شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (روابط ۲ و ۳). در این روابط پارامترهای P_i ، O_i ، $\bar{P}$ و $\bar{O}$ به ترتیب مقادیر مشاهده شده، مقادیر شبیه‌سازی شده، میانگین مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و تعداد مشاهدات است. شاخص سازگاری یک پارامتر توصیفی است که مقدار آن از صفر تا یک متغیر است و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کارتر است و مقادیر شبیه‌سازی شده قابل اطمینان‌تر هستند. مقدار این شاخص در حالت مطلوب یک می‌باشد و به صورت رابطه (۲) قابل محاسبه است.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \quad (2)$$

$$0 \leq d \leq 1$$

$$O' = (O_i - \bar{O})$$

$$P' = (P_i - \bar{P})$$

شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی می‌باشد. این شاخص معیار خوبی برای مقایسه خطاهای پیش‌بینی شده توسط یک مجموعه داده است و برای مقایسه چند مجموعه داده کاربرد ندارد. مقدار آن به صورت رابطه (۳) قابل محاسبه است.

برای واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای مدل، اندازه تاج پوشش گیاهی، وزن زیست‌توده و رطوبت خاک قبل از هر آبیاری (هر هفته) اندازه‌گیری شد. تاج پوشش گیاهی از طریق گرفتن تصویر با استفاده از منوپاد از سطح فوقانی گیاهان در مراحل مختلف رشد و با استفاده از تحلیل تصویر گرفته شده در نرم‌افزار Arc-GIS با دقت مناسبی به دست آمد. در هر نمونه‌برداری، سه بوته از ردیف‌های نمونه‌برداری هر کرت برداشت شد. ساقه، برگ و دانه‌ها از هم جدا و پس از اندازه‌گیری سطح برگ گیاهان، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۷۰ درجه در دستگاه آون قرار گرفتند و بعد از خشک شدن، وزن خشک ساقه، برگ و دانه اندازه‌گیری و مجموع وزن آنها به عنوان وزن زیست‌توده در نظر گرفته شد. قبل از هر آبیاری رطوبت خاک در اعماق ۱۵ و ۴۵ سانتی‌متری به روش وزنی (خشک کردن نمونه در آون) اندازه‌گیری شد.

معرفی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop مدلی برای نشان دادن واکنش محصول نسبت به آب است، به این معنا که این مدل، رابطه بین میزان محصول تولیدی و تنش آبی که در اثر فقدان آب کافی به وسیله بارش یا آبیاری برای محصول در طول دوره رشد ایجاد شده را نشان می‌دهد. رابطه‌ای که هسته اصلی مدل AquaCrop را تشکیل می‌دهد (رابطه ۱)، به شرح زیر است:

$$B = Wp \times \sum Tr \quad (1)$$

که در آن B میزان زیست‌توده تولید شده بر حسب کیلوگرم، Wp بهره‌وری مصرف آب بر حسب کیلوگرم زیست‌توده تولید شده بر مترمربع بر میلی‌متر آب تجمعی مصرفی که در طی دوره رشد باعث تولید زیست‌توده شده و Tr تعرق گیاهی بر حسب میلی‌متر می‌باشد. این مدل رشد گیاه را به صورت روزانه شبیه‌سازی می‌کند و به سه دسته داده جهت اجرا نیاز دارد (Steduto et al., 2009) که عبارتند از: داده‌های اتمسفری (مانند بارندگی، تعداد روزهای آفتابی، دمای حداکثر و حداقل و تبخیر)، داده‌های مربوط به گیاه (مانند فنولوژی، عمق ریشه و میزان ماده خشک) و داده‌های مربوط به خاک (مانند بافت خاک و میزان رطوبت اولیه خاک).

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

مدل AquaCrop برای اجرا نیاز به فایل‌های هواشناسی، خاکشناسی، پارامترهای گیاهی و مدیریتی دارد. داده‌های روزانه هواشناسی از ایستگاه هواشناسی خودکار موجود در مزرعه تحقیقاتی اخذ و در قالب فایل‌های مورد نیاز به مدل معرفی گردید. فایل خاک با

مورد مطالعه (۲۰۱۷ - ۱۹۸۸) تهیه گردید. مقدار ETo با استفاده از رابطه پنمن-مانیتث (Allen et al., 1998) محاسبه گردید. سپس فایل آبیاری به گونه‌ای تعریف گردید که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد و مدل برای محدوده‌ای از تاریخ کشت‌های رایج در منطقه (جدول ۲) اجرا و مقادیر عملکرد پتانسیل دانه و مجموع تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد برای هر اجرای مدل در یک فایل اکسل ذخیره گردید. ضمناً مقدار بهره‌وری مصرف آب نیز از تقسیم عملکرد دانه به تبخیر و تعرق کل گیاه محاسبه و به فایل نتایج اضافه گردید. در ادامه با توجه به نتایج به دست آمده تاریخ کشت‌های بهینه برای رسیدن به حداکثر تولید و حداکثر بهره‌وری مصرف آب تعیین گردید.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (3)$$

اجرای مدل

مدل واسنجی شده برای شرایط آب و هوایی چهار ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه، اسلام‌آبادغرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور در استان کرمانشاه اجرا گردید. در ابتدا برای هر ایستگاه یک فایل هواشناسی بر اساس داده‌های روزانه هواشناسی (دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETo) در دوره

جدول ۲- محدوده تاریخ کشت مورد مطالعه در ایستگاه‌های مختلف

Table 2- Range of studied cultivation date in various stations

ایستگاه هواشناسی Weather Station	محدوده تاریخ کشت Cultivation date range
کنگاور Kangavar	۱۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد 5 May – 15 June
کرمانشاه Kermanshah	۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد 25 April – 15 June
اسلام‌آبادغرب Eslam Abad Gharb	۵ اردیبهشت تا ۲۵ خرداد 15 April – 15 June
سرپل‌ذهاب Sarpol Zahab	۲۵ اسفند تا ۳۱ فروردین 15 March – 20 April

جدول ۳- پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل AquaCrop برای آفتابگردان (رقم فرخ)

Table 3- Calibrated crop parameters of AquaCrop model for sunflower (Farokh cultivar)

پارامتر Parameter	واحد (Unit)	مقدار Value	روش Method
مدت زمان از کاشت تا جوانه زنی (Duration from sowing to Emergence)	GDD'	60	اندازه‌گیری شده (Measured)
مدت زمان از کاشت تا آغاز پیری (Duration from sowing to start senescence)	GDD	1040	اندازه‌گیری شده (Measured)
مدت زمان از کاشت تا رسیدن به بیشینه پوشش گیاهی (Duration from sowing to maximum canopy)	GDD	820	اندازه‌گیری شده (Measured)
مدت زمان از کاشت تا شروع گلدهی (Duration from sowing to flowering)	GDD	640	اندازه‌گیری شده (Measured)
طول دوره گل‌دهی (Length of the flowering stage)	GDD	200	اندازه‌گیری شده (Measured)
دمای بالا (Upper temperature)	°C	30	پیش فرض (Default)
دمای پایه (Base temperature)	°C	4	پیش فرض (Default)
تعداد بوته در هکتار (Number of plants per ha)	Plants/ha	100000	اندازه‌گیری شده (Measured)
بیشینه عمق موثر ریشه (Maximum effective rooting depth)	cm	80	اندازه‌گیری شده (Measured)

نتایج و بحث

واسنجی و صحت سنجی مدل AquaCrop

مدل AquaCrop با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک در طول دوره رشد در تیمارهای T1، T3، T6، T7 و واسنجی گردید. پارامترهای گیاهی واسنجی شده مدل به شرح جدول ۳ می‌باشد.

صحت‌سنجی مدل واسنجی شده بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده در تیمارهای T2، T4، T6 و T8 انجام شد. در این مرحله پارامترهای گیاهی که در مرحله واسنجی تعیین شدند، بدون تغییر باقی مانده و مدل AquaCrop برای چهار تیمار دوم اجرا گردید و دقت مدل در شبیه‌سازی تاج پوشش گیاهی، زیست‌توده و رطوبت خاک مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر شاخص‌های آماری برای پارامترهای زیست‌توده، تاج پوشش گیاهی و رطوبت خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۴ گزارش شده است. نتایج بیانگر این است که مدل، تمام تیمارها را در مرحله واسنجی با دقت خوبی شبیه‌سازی نمود. تیمارهای T1 و T6 در شبیه‌سازی زیست‌توده، تیمارهای T7، T6 و T3 در شبیه‌سازی تاج پوشش گیاهی و تیمارهای T3 و T7 در شبیه‌سازی رطوبت خاک با بیشترین میزان دقت، شبیه‌سازی شدند. نتایج مرحله صحت‌سنجی برای پارامترهای زیست‌توده و تاج پوشش گیاهی همانند مرحله واسنجی از دقت بالایی برخوردار بود، حال آن‌که دقت نتایج مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک در مرحله صحت‌سنجی به جز در تیمار T4 چندان بالا نبود.

عملکرد دانه بر اساس تاریخ کاشت

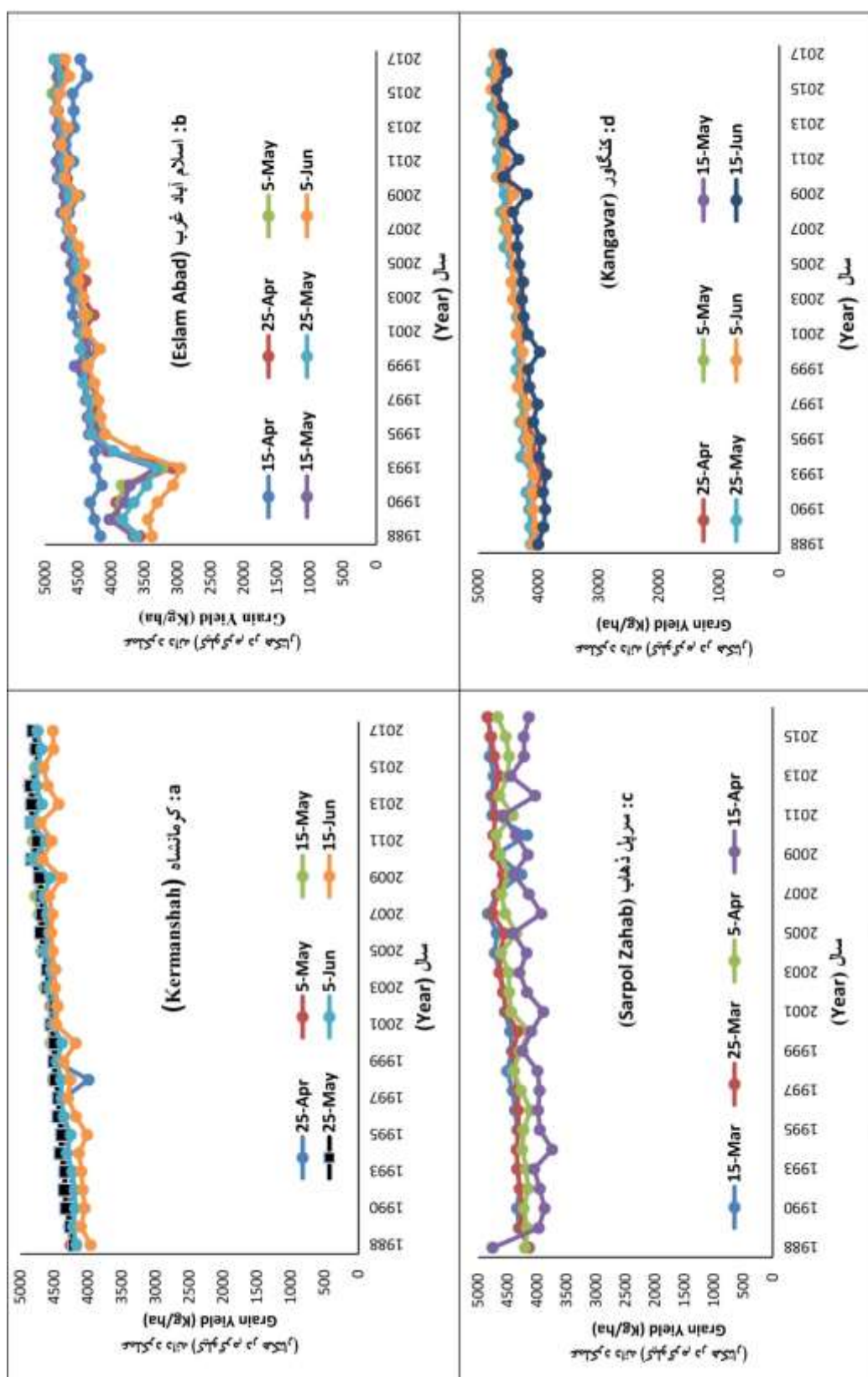
مدل واسنجی شده AquaCrop برای تاریخ کشت‌های مختلف و بر اساس داده‌های روزانه هواشناسی ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۷) ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه اجرا گردید. مقادیر عملکرد دانه برآورد شده بر اساس تاریخ کشت‌های مورد بررسی و برای

سال‌های مختلف در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به این نمودارها می‌توان بیان کرد علی‌رغم نوسانات سالانه، عملکرد دانه با شیب اندکی روند افزایشی داشته است. با توجه به یکسان بودن فایل‌های خاک، گیاه و مدیریت آبیاری این تفاوت عملکرد ناشی از تغییرات پارامترهای هواشناسی می‌باشد. تغییرات پارامترهای هواشناسی (تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETO)، دمای هوا و دی‌اکسید کربن) در بازه زمانی مورد مطالعه نشان داد که در این مدت هر سه پارامتر هواشناسی روند افزایشی داشته‌اند. افزایش دما در دوره رشد با کاهش طول دوره همراه بوده و از طرفی افزایش میزان دی‌اکسیدکربن باعث افزایش میزان فتوسنتز و عملکرد گیاه می‌شود (Thompson et al., 2017). با توجه به افزایش عملکرد به نظر می‌رسد که تأثیر مثبت افزایش میزان دی‌اکسیدکربن روی عملکرد دانه بیشتر از تأثیر منفی افزایش دمای هوا بوده است.

نتایج همچنین بیانگر تغییرات عملکرد دانه با توجه به تاریخ کشت در هر سال می‌باشد. میانگین عملکرد دانه، تبخیر و تعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب برای تاریخ کشت‌های مورد بررسی در ایستگاه‌های هواشناسی کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل ذهاب و کنگاور در جدول ۵ گزارش شده است. بیشترین میزان عملکرد دانه آفتابگردان در ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل ذهاب و کنگاور به ترتیب برابر با ۴۵۸۵ کیلوگرم در هکتار (دهه سوم اردیبهشت)، ۴۴۴۱ کیلوگرم در هکتار (دهه دوم اردیبهشت)، ۴۵۲۲ کیلوگرم در هکتار (دهه اول فروردین) و ۴۳۷۴ کیلوگرم در هکتار (دهه دوم خرداد) به دست آمد که این تاریخ کشت‌ها با تاریخ کشت‌های واقعی در منطقه تقریباً مطابقت دارند. معمولاً آفتابگردان در مناطق معتدل سرد مانند استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، کردستان، کرمانشاه، خراسان شمالی، زنجان و همدان از دهه سوم فروردین تا ۱۵ خرداد می‌توان کشت می‌گردد، اما مناسب‌ترین تاریخ کاشت نیمه دوم اردیبهشت می‌باشد.

جدول ۴- شاخص‌های آماری بین پارامترهای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده جهت واسنجی و صحت‌سنجی
Table 4- Statistical indicators between measured and simulated parameters for calibration and validation

مرحله Phase	تیمار Treatment	رطوبت خاک Soil moisture		تاج پوشش گیاهی Crop Canopy		زیست توده Biomass	
		d	RMSE	d	RMSE	d	RMSE
Calibration	T1	0.80	45.4	0.91	13.3	1	0.5
	T3	0.99	8.2	1	2	0.98	0.9
	T6	0.94	22.9	0.96	1.2	1	0.3
	T7	0.97	15.5	1	1.6	0.98	0.8
Validation	T2	0.47	48.4	0.98	1.7	0.98	0.9
	T4	0.97	17.3	0.95	10.6	0.97	0.7
	T5	0.69	63.8	1	2.3	0.98	0.8
	T8	0.49	131.6	1	0.5	0.99	0.4



شکل ۱- عملکرد دانه برآورد شده در تاریخ کشت‌های مختلف با مدل AquaCrop در ایستگاه‌های (a) کرمانشاه، (b) اسلام آباد غرب، (c) سرپل ذهاب و (d) کنگاور
Figure 1- Simulated grain yield under various sowing dates using AquaCrop in stations a) Kermanshah, b) Eslam Abad, c) Sarpol Zahab and d) Kangavar

جدول ۵- میانگین عملکرد دانه، تبخیر و تعرق فصلی و بهره‌وری مصرف آب در ایستگاه‌های مورد مطالعه در تاریخ‌های مختلف کشت
Table 5- Average grain yield, seasonal evapotranspiration and water productivity in the studied stations at different sowing dates

ایستگاه Station	تاریخ کشت Sowing date	عملکرد دانه Grain yield (kg.ha ⁻¹)	تبخیر و تعرق فصلی Seasonal Evapotranspiration (mm)	بهره‌وری آب Water Productivity (m ³ .kg ⁻¹)
کرمانشاه Kermanshah	25 April	4504	674	0.67
	5 May	4564	670	0.68
	15 May	4585	692	0.66
	25 May	4563	686	0.67
	5 June	4495	662	0.68
	15 June	4359	630	0.69
اسلام‌آباد Eslam Abad	15 April	4328	606	0.71
	25 April	4441	624	0.71
	5 May	4412	630	0.70
	15 May	4356	626	0.70
	25 May	4204	604	0.70
	5 June	3986	570	0.70
سرپل‌ذهاب Sarpol Zahab	15 March	4351	656	0.66
	25 March	4522	644	0.70
	5 April	4402	624	0.71
	15 April	4146	584	0.71
	25 April	3662	520	0.70
کنگاور Kangavar	25 April	4427	562	0.79
	5 May	4408	564	0.78
	15 May	4425	556	0.80
	25 May	4374	534	0.82
	5 June	4221	502	0.84
	15 June	3978	490	0.81

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، شبیه‌سازی رشد گیاه آفتابگردان با استفاده از مدل واسنجی‌شده AquaCrop، بر اساس آمار هواشناسی ۳۰ ساله برای ایستگاه‌های سینوپتیک استان کرمانشاه (کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور) و برای چند تاریخ کشت مختلف انجام شده است. نتایج بیانگر این بود که با توجه به تغییرات پارامترهای هواشناسی در ۳۰ سال مورد بررسی، تاریخ کشت مناسب که منجر به بالاترین عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب می‌شود در مناطق مختلف متفاوت است. همچنین میزان عملکرد دانه در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه افزایشی بوده است و بیش‌ترین مقدار عملکرد در شهرستان‌های سرپل‌ذهاب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به ترتیب با کشت در دهه‌های اول فروردین، دوم اردیبهشت، سوم اردیبهشت و اول خرداد تولید می‌شود. نتایج تعیین تاریخ کاشت که منجر به حداکثر بهره‌وری مصرف آب می‌شود، نیز نشان داد که این تاریخ کشت با تاریخ کشت منجر به حداکثر عملکرد دانه متفاوت بوده و کشت تأخیری بالاترین بهره‌وری مصرف آب را دارد. با تأخیر در زمان کاشت و گرم شدن هوا طول دوره رشد کوتاه‌تر شده که معمولاً همراه با کاهش عملکرد و

همان‌طوری که از جدول هم مشخص است بیشترین عملکرد دانه مربوط به ایستگاه کرمانشاه بوده که به تناسب آن بهره‌وری آب حداکثر نبوده و نشان از مصرف آب بیشتری نسبت به ایستگاه کنگاور که حداکثر بهره‌وری به خود اختصاص داده است دارد. بیشترین میزان بهره‌وری مصرف آب بر اساس عملکرد دانه برای ایستگاه‌های کرمانشاه، اسلام‌آباد غرب، سرپل‌ذهاب و کنگاور به ترتیب ۰/۶۹ کیلوگرم بر متر مکعب (دهه سوم خرداد)، ۰/۷۱ کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم اردیبهشت)، ۰/۷۱ کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم فروردین) و ۰/۸۴ کیلوگرم بر متر مکعب (دهه دوم خرداد) به دست آمد. با توجه به این ارقام هرچند به نظر می‌رسد که عملکرد در این تاریخ‌های کشت کاهش یافته است ولی مقدار مصرف آب کاهش یافته و در نهایت منجر به افزایش مقدار بهره‌وری آب گردیده است. تغییرات این ارقام مربوط به عملکرد و بهره‌وری با توجه به تغییر تاریخ کشت در ایستگاه‌های مورد بررسی صورت گرفته است. نتایج این تحقیق از نظر توانایی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد دانه و بهره‌وری مصرف آب با تحقیقات سایر محققین همخوانی دارد (Dera et al., 2014 ; Todorovic et al., 2009).

حداکثر نبوده و نشان از مصرف آب بیشتری نسبت به ایستگاه کنگاور که حداکثر بهره‌وری به خود اختصاص داده است دارد. این مورد بیانگر این نکته است که ممکن است با افزایش عملکرد میزان بهره‌وری آب افزایش پیدا نکند. هر چند که این تحقیق در مورد عملکرد دانه و میزان بهره‌وری در تاریخ‌های بهینه کشت آفتابگردان انجام شده است اما کارایی این مدل منحصر به این موارد نیست و این مدل ابزاری توانمند به منظور اعمال مدیریت‌های مختلف آب و خاک و گیاه می‌باشد.

تبخیر و تعرق فصلی خواهد بود. با توجه به این که میزان کاهش این پارامترها یکسان نیست، زمانی که نسبت عملکرد به تبخیر و تعرق فصلی بیشینه بود به عنوان تاریخ کشت مناسب برای این هدف تعیین گردید. بیش‌ترین مقدار بهره‌وری مصرف آب در ایستگاه‌های سرپل‌دهاب، اسلام‌آبادغرب، کرمانشاه و کنگاور (غرب به شرق استان) به ترتیب با کشت در دهه‌های دوم فروردین، اول اردیبهشت، سوم خرداد و دوم خرداد به‌دست می‌آید. در مجموع بیشترین عملکرد دانه مربوط به ایستگاه کرمانشاه بوده که به تناسب آن بهره‌وری آب

منابع

1. Abrha B., Delbecque N., Raes D., Tsegay A., Todorovic M., Heng L., and Deckers S. 2012. Sowing strategies for barley (*Hordeum vulgare* L.) based on modeled yield response to water with AquaCrop. *Experimental Agriculture* 48(02): 252-271. <https://doi.org/10.1017/S0014479711001190>.
2. Ahmadi M., and Farhadi Bansouleh B. 2010. The effect of germination date on barley yield in Mahidasht region of Kermanshah using WOFOST plant growth simulation model. The first international conference on plant, water, soil and air modeling. Kerman, Iran. (In Persian)
3. Ahmadvpour A. 2013. Predicting corn crop yield under different irrigation managements using WOFOST and AquaCrop models in Kermanshah region. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
4. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Rome, FAO, Irrigation and Drainage Paper No.56.
5. Bange M.P., Hammer G.L., and Rickert K.G. 1997. Environmental control of potential yield of sunflower in the subtropics. *Australian Journal of Agriculture Research* 48: 231- 240. <https://doi.org/10.1071/A96079>.
6. Dera J., Mpfu L.T., and Tavirimirwa B. 2014. Response of pearl millet varieties to different dates of sowing at Makoholi and Kadoma research stations, Zimbabwe. *Academia Journal of Agricultural Research* 2(4): 110-113. <http://dx.doi.org/10.15413/ajar.2014.0116>.
7. Farahani H.J., Gabriella I., and Oweis T.Y. 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal* 101 (3): 469-476. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0182s>.
8. Khajepour M.R., and Seyed F. 2000. Effect of planting date on components and seed and oil yield of sunflower cultivars. *Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 4(2): 117-127. (In Persian)
9. Khaleghi M. 2019. Evaluation of the sunflower yield, water productivity and soil salinity simulation under water and salinity stresses using the AquaCrop model. *Journal of Water and Soil Resources Conservation* 8(2): 15-37. (In Persian with English abstract)
10. Khichar M.L., and Niwas R. 2006. Microclimatic profiles under different sowing environments in wheat. *Journal of Agro Meteorology* 8: 201-209. <https://doi.org/10.54386/jam.v8i2.1048>.
11. Mansouri M. 2016. Spatial variation of sunflower yield under deficit irrigation regimes using AquaCrop-GIS model. Master Thesis in Irrigation and Drainage, Razi University, Kermanshah. (In Persian with English abstract)
12. Mazaherilaqab H., Salavati S., and Mahmoudi R. 2011. Reaction of sunflower yield (*Helianthus annuus* L.) of Armavirski cultivar to the date and density of cultivation in dry land conditions of Qorveh, Kurdistan. *Crop Production Technology* 3(2): 63-74. (In Persian with English abstract)
13. Mirzaei Z., Berari M., Rezaei zad A., and Mehrabi A.S.H. 2012. Effect of planting date on growth indices of new sunflower hybrids (*Helianthus annuus* L.) in the cold temperate region of Kermanshah. *Journal of Crop Physiology* 4(13): 5-20. (In Persian with English abstract)
14. Mohammadi M., Ghahraman B., Davary K., Ansari H., and Shahidi A. 2015. Validation of AquaCrop model for simulation of winter wheat yield and water use efficiency under simultaneous salinity and water stress. *Journal of Water and Soil* 29(1): 67-84. (In Persian with English abstract)
15. Momeni R., Behbahani M.R., Montazer A.A., and Nazarifar M.H. 2008. Application of CropSyst plant growth model to investigate management analyzes of increasing wheat water consumption productivity. second national conference on irrigation and drainage networks management, Shahid Chamran Irrigation and Drainage Network of Ahvaz. (In Persian)
16. Oiganji E., Igbadun H.E., Mudiare O.J., and Oyeboode M.A. 2016. Calibrating and validating AquaCrop model for maize crop in Northern zone of Nigeria. *Agriculture Engineering International CIGR Journal* 18(3): 1-13.
17. Raes D., Steduto P., Hsiao T.C., and Fereres E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: reference manual annexes. *Agronomy Journal* 101(3): 426-437.

- <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
18. Ramezani M., Babazadeh H., and Sarai Tabrizi M. 2019. Simulating barley yield under different irrigation levels by using AquaCrop model. *Irrigation Sciences and Engineering (JISE)* 41(4): 161-172. (In Persian with English abstract)
19. Rao N.K., Gadgil S., Rao S.P., and Savithri K. 2000. Tailoring strategies to rainfall variability-The choice of the sowing window. *Current Science* 78(10): 1216-1230.
20. Safari M. 2006. Effects of planting date on seed yield, and yield components of six sunflower cultivars in Kerman. *Pajouhesh Va Sazandgi* 144: 73-139. (In Persian with English abstract)
21. Steduto P., Hsiao T.C., Raes D., and Fereres E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal* 101: 426-437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.
22. Todorovic M., Albrizio R., Zivotic L., Abi Saab M., Stockle C., and Steduto P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal* 101: 509-521. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0166s>.
23. Thompson M., Gamage D., Hirotsu N., Martin A., and Seneweera S. 2017. Effects of Elevated Carbon Dioxide on Photosynthesis and Carbon Partitioning: A Perspective on Root Sugar Sensing and Hormonal Crosstalk. *Frontiers in Physiology* 8(578): 1-13. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00578>.



Assessment of Water Status and Its Critical Stages in Dryland Barley Genotypes (*Hordeum vulgare*) Using Crop Water Stress Index (CWSI)

V. Feiziasl^{1*}

Received: 03-04-2022

Revised: 10-04-2022

Accepted: 08-05-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Feiziasl V. 2022. Assessment of Water Status and Its Critical Stages in Dryland Barley Genotypes (*Hordeum vulgare*) Using Crop Water Stress Index (CWSI). Journal of Water and Soil 36(2): 197-213. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.75527.1146](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.75527.1146)

Introduction

Barley could be grown under low-input and harsh conditions because of its wide adaptability to drought, and heat stresses. Nonetheless, the water stress leads to yield reduction when drought stress occurs during stem elongation and grain filling stages. In rainfed areas, water and heat stress occur together, specifically after anthesis, amplifying the adverse effects of water stress via disrupting water uptake of crops. In this regard, measurement of canopy temperature (T_c) by infrared thermometry is a non-destructive method that can effectively characterize the water status of plants. There is a linear relation between T_c and transpiration, which increases upon stomata closure. Since stomata is very sensitive to environmental variations and moisture reduction in the plant and it is very difficult to measure, therefore, T_c is the preferred factor to determine the crop water status. The T_c was used to calculate the practical Crop Water Stress Index (CWSI) by Idso et al. (1981) and Jackson et al. (1981). Dold et al., (2017) reported a positive significant correlation between CWSI and transpiration, daily soil water content, and plant production. Negative significant correlations between CWSI and pure photosynthesis rate, transpiration, and stomatal conductance were also reported. This study was aimed to: (i) assess the water stress effects on dryland barley genotypes using T_c , (ii) identify the upper limit for T_c affecting performance and reducing barley grain yield, (iii) determine the critical point of water stress, and (iv) apply CWSI to select the most suitable barley genotypes for both rainfed and supplemental irrigation conditions.

Materials and Methods

To determine the crop water stress index (CWSI) and assess water status of dryland barley genotypes, an experiment was carried out in a split plot arrangement based on randomized complete block design with 15 genotypes in three replications at the Dryland Agricultural Research Institute, Maragheh (46° 45' E, and 37° 26' N), Iran in the 2015-2018 cropping seasons. The main plots included rainfed (as stress conditions), and supplemental irrigation (two times: 50 mm irrigation in the sowing time and 30 mm irrigation in the booting stage) as non-water stress conditions. The sub-plots included 15 barley genotypes (GaraArpa, 71411, Abidar, Ansar, ARM-ICB, ChiCm/An57//Albert, Dobrynya, Kuban-06, Makoei, Redical, Sahand, Sahand/C-25041, Sararood1, Ste/Antares/YEA762 and Valfajr). The barley genotypes were planted by Wintersteiger planter in six-row plots with 8 m long and 1.20 m wide (20 cm row spacing). The sowing rate was 380 seeds per m^2 based on the thousand kernel weight (TKW) of each genotype. Seeds were treated by Penconazole fungicide. The planting dates were October 4, 2015, and October 7, 2017. In each plot, two canopy temperatures (T_c) were measured using infrared thermometer Model A-1 in six crop reproductive stages from the half of ear emerged above flag leaf ligule stage (GS55) to the soft dough stage (GS85). Measuring time was between 1:00 to 2:00 pm.

Results and Discussion

The results indicated that the upper baseline for non-transpiring of dryland barley genotypes ($T_c - T_a =$

1- Assistant Professor, Dryland Agricultural Research Institute (DARI), Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Maragheh, Iran

(* - Corresponding Author Email: v.feiziasl@areeo.ac.ir)

0.0008VPD + 5.89; VPD: vapor pressure deficit) was 5.9 °C (ranged from 5.5 to 6.9) which is equal to 32.4 °C green canopy and 9.0 to 11.1 mm/day evapotranspiration. Non-stressed baseline or lower baseline ($T_c - T_a = -2.4662VPD + 9.15$; $R^2 = 0.97^{**}$) showed that CWSI threshold value was 0.75 which is equal to 24.3 °C (23.7 to 26.1 °C) T_c under supplemental irrigation and 23.3 to 24.7 °C under water stress conditions. Additionally, CWSI threshold was equal to 7.3 mm/day evapotranspiration and 5.02 kPa VPD. On the other hand, results revealed that when T_c exceeded 25 °C, biological yield, thousand kernel weight (TKW) decreased significantly, followed by grain yield in different barley genotypes. The slope of the CWSI calibration equation ($T_c - T_a = -2.4662VPD + 9.15$) is often more negative in hot and dry areas, and tends to zero in cold and humid areas. Therefore, its negativity indicates the conditions of moisture stress for barley genotypes in the dryland phase. The CWSI threshold for barley genotypes growth stages happened at 248 (6th June) days from sowing time (4th – 7th October) which is equal to flowering stage (ZGS60). According to CWSI quantity, Ansar, ChiCm/An57//Albert, Sahand/C-25041 and Ste/Antares//YEA762 were grouped in the tolerance class under stress (dryland) conditions. However, Abidar, Sahand/C-25041, GaraArpa, ChiCm/An57//Albert and Makooei were placed in the tolerance class under non-stress (supplemental irrigation) conditions.

Conclusion

The CWSI could estimate the intensity of heat and water stresses in the grain filling stage for barley genotypes in cold and semi-arid areas. The average of canopy temperature threshold values were 24.8 and 24.0 °C for dryland barley genotypes in supplemental irrigation and dryland conditions, respectively. In addition, these indices could be used to estimate heat and water stress tolerance levels for barley genotypes.

Keywords: Dryland and supplemental irrigation, Canopy temperature, Water stress threshold

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۱۹۷-۲۱۳

ارزیابی وضعیت آبی و مراحل بحرانی آن در ژنوتیپ‌های جو (*Hordeum vulgare*) دیم با استفاده از شاخص تنش آبی گیاه (CWSI)

ولی فیضی اصل^{*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۱۸

چکیده

تنش رطوبتی حاصل از کمبود بارندگی (تنش خشکی) و گرما (تنش گرمایی) از عمده‌ترین تنش‌های محیطی می‌باشد که بر تولید محصولات زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک اثر منفی می‌گذارد. مطالعه به‌منظور تعیین آستانه تنش رطوبتی با استفاده از پارامترهای تنش گرمایی مرتبط با وضعیت آبی گیاه و شناسایی و معرفی لاین‌های مقاوم به این تنش‌ها انجام گرفت. آزمایش به‌صورت کرت‌های خرد شده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و در شرایط تنش آبی (دیم) و بدون تنش آبی (۵۰ میلی‌متر آبیاری تکمیلی در زمان کاشت و ۳۰ میلی‌متر در مرحله آبستن) در کرت اصلی و ۱۵ ژنوتیپ جو در کرت فرعی در دو سال زراعی (۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم (مراغه) به اجرا در آمد. صفات گیاهی، عملکرد، اجزای عملکرد، دمای پوشش سبز (Tc) در ۶ مرحله از ظهور برگ پرچم (ZGS55) الی خمیری نرم (ZGS85) و NDVI در ۷ مرحله از ظهور اولین گره (ZGS31) الی خمیری نرم (ZGS85) اندازه‌گیری شد. با استفاده از شاخص CWSI، آستانه تنش رطوبتی برای ژنوتیپ‌های جو ۰/۷۵ و آستانه دمای بحرانی ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد معادل با ۷/۳ میلی‌متر بر روز تبخیر-تعرق پتانسیل (ET₀) و ۴/۹۹ کیلوپاسکال کمبود فشار بخار هوا (VPD) تعیین شد. حداکثر تنش رطوبتی قابل تحمل (CWSI) به عنوان مبنای توقف کامل تعرق و فتوسنتز در گیاه جو، Tc و تبخیر-تعرق پتانسیل (ET₀) به ترتیب ۱/۰۴، ۳۲/۷ درجه سانتی‌گراد و ۱۱/۰۱ میلی‌متر بر روز به‌دست آمد. شروع مرحله بحرانی از ۲۰ خرداد (۲۶۱ روز از اول مهر ماه) معادل با شروع گلدهی (ZGS60) بود. در نهایت ژنوتیپ‌های انصار، ChiCm/An57//Albert، Sahand/C-25041 و Ste/Antares/YEA762 مقاوم به تنش و مناسب برای شرایط دیم و ژنوتیپ‌های آیدر، Sahand/C-25041، قره‌آرپا، ChiCm/An57//Albert و ماکویی برای شرایط آبیاری تکمیلی توصیه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: آستانه تنش رطوبتی، دمای پوشش سبز، شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

مقدمه

داشتن بتاگلوکان (β -glucan) زیاده‌تر آن نسبت به سایر غلات افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است (Erkan et al., 2006). این ماده در پایین آوردن کلسترول، کنترل گلوکز و انسولین خون و نیز کاهش خطر سرطان مؤثر است (Mokhtari et al., 2014). مطابق آمار ۳۹ سال موجود (۹۸-۶۰)، سطح زیر کشت جو در ایران حدود ۱/۷۹ میلیون هکتار می‌باشد که ۶۲ درصد از سطح زیر کشت و ۳۵ درصد از تولید جو در کشور به‌صورت دیم می‌باشد. مطابق این آمار، میانگین

قدمت و سازگاری زیاد جو در مقابل شرایط نامساعد محیطی از جمله فقر عناصر غذایی، خشکی و شوری، این گیاه را متناسب برای شرایط سخت و متغیر دیم تبدیل کرده است. اگرچه حدود ۸۵ درصد جو دنیا صرف تغذیه دام می‌شود (Fischbeck, 2002)، اما در سال‌های اخیر، علاقه به استفاده از جو در تغذیه انسان نیز به‌دلیل

۱- استادیار پژوهشی موسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، مراغه، ایران

(Email: v.feiziasl@areeo.ac.ir)

*) - نویسنده مسئول:

دامنه تغییر این شاخص بین صفر تا یک می‌باشد که در آن مقدار صفر نشانگر مواجه نبودن گیاه با تنش آبی و ایده‌آل‌ترین شرایط از لحاظ انجام تعرق و عدد یک گویای حداکثر تنش آبی وارد شده بر گیاه و توقف کامل تعرق می‌باشد (Idso et al., 1981). دولت و همکاران (Dold et al., 2017) گزارش کردند، بین شاخص CWSI و تبخیر-تعرق، محتوی آب خاک به‌صورت روزانه و تولید اقتصادی گیاهان مختلف همبستگی معنی‌داری وجود داشت. همچنین همبستگی منفی و معنی‌دار بین شاخص CWSI و سرعت فتوسنتز خالص گیاه، تعرق گیاه، هدایت روزنه‌ای و همبستگی مثبت و معنی‌دار آن با کمبود فشار بخار^۴ در دو شرایط بدون تنش آبی (آبیاری کامل) و تنش آبی به اثبات رسیده است (Lawlor and Cornic, 2002). فیضی اصل و همکاران (Feiziasl et al., 2014) با استفاده از این روش، حد مبنای بالا ($T_c - T_a \leq 6$) را به مفهوم شرایط بدون تعرق برای گندم دیم، ۶ درجه سانتی‌گراد (دمای پوشش سبز ۶ درجه سانتی‌گراد بیش از دمای هوا) تعیین کردند. آنها نشان دادند که بین شاخص CWSI و ویژگی‌های عملکرد دانه، وضعیت رطوبتی برگ (RWC) و میزان بارندگی همبستگی منفی و معنی‌داری ($p < 0.01$)، با تبخیر-تعرق پتانسیل و آب تخلیه شده از خاک تا عمق ۵۰ سانتی‌متری همبستگی مثبت و معنی‌دار ($p < 0.01$) وجود داشت. لیانگ (Liang, 2004) معتقد است، روش گیاه مبنای CWSI بدون نیاز به نمونه‌برداری تخریبی از خاک و گیاه و تنها از طریق تعیین T_c در مراحل زایشی گیاه به‌ویژه مرحله پر شدن دانه که گیاه با حداکثر تنش‌های رطوبتی و حرارتی مواجه می‌باشد، به آسانی می‌تواند میزان شدت تنش‌های وارد شده بر گیاه را تعیین و شرایط مناسب برای کشت ژنوتیپ‌های مورد بررسی را پیش‌بینی و همچنین راهکارهای مقابله با آن را مشخص نماید. همچنین مطابق نظر ایشان از این شاخص می‌توان در پیش‌بینی عملکرد محصول جو، برنامه‌های آبیاری و شناسایی برخی بیماری‌ها نیز استفاده نمود. با توجه به مطالب یادشده، ارزیابی مقاومت به تنش رطوبتی ارقام و لاین‌های جو دیم با T_c ، تعیین حد مبنای بالا برای شناسایی زمان توقف تعرق و فتوسنتز و میزان کاهش تولید جو دیم، شناسایی زمان شروع تنش آبی گیاه و معرفی ژنوتیپ‌های مناسب برای شرایط دیم و آبیاری تکمیلی و همچنین کاربردی نمودن CWSI در مدیریت مزارع جو دیم در مناطق سرد و نیمه سرد از اهداف این پژوهش بود.

مواد و روش‌ها

این آزمایش با ۱۵ لاین پیشرفته و رقم جو در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار و در شرایط دیم و آبیاری

عملکرد دانه این محصول در شرایط دیم ۸۹۱ کیلوگرم در هکتار با دامنه ۴۲۸ تا ۱۳۱۰ کیلوگرم در هکتار و برای شرایط آبی ۲۶۶۹ کیلوگرم در هکتار می‌باشد که در ۱۰ سال اخیر، با معرفی ارقام جدید از سوی موسسه تحقیقات کشاورزی دیم و ترویج یافته‌های کارآمد در بهبود عملکرد این گیاه به ۱۰۹۵ کیلوگرم در هکتار با دامنه ۹۱۹ تا ۱۳۱۰ کیلوگرم در هکتار ارتقاء یافته است. اگرچه میانگین عملکرد دانه گندم دیم در مدت مشابه تاحدودی نزدیک (۸۷۶ کیلوگرم در هکتار) به عملکرد بلندمدت جو دیم می‌باشد، اما دامنه نوسانات آن (۴۲۴ تا ۱۵۱۳ کیلوگرم در هکتار) بیش از دو برابر دامنه نوسانات جو دیم است (Ahmadi et al., 2019) که این امر نشان می‌دهد، جو دیم از پایداری عملکرد نسبی بیشتری در مقایسه با گندم دیم در ایران برخوردار است.

اگرچه جو نسبت به سایر غلات به تنش خشکی متحمل‌تر است، ولی در دو مرحله ساقه رفتن و تشکیل دانه نسبت به کمبود آب به شدت حساس بوده و تنش رطوبتی در این مراحل منجر به کاهش شدید عملکرد آن می‌شود. تنش رطوبتی در شرایط دیم تنها به دلیل کمبود بارندگی و محدودیت آب رخ نمی‌دهد، بلکه عوامل دیگری مانند تنش گرمایی به‌ویژه پس از مرحله گلدهی، باعث برهم زدن تعادل جذب و مصرف آب و تشدید پدیده تنش آبی می‌شود (Elbashier et al., 2012). پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای مقابله با تنش آبی و گرمای آخر فصل در گیاهان زراعی ارائه می‌دهند. آگرونومیست‌ها علاوه بر شناسایی ارقام مقاوم، با مطالعه تعادل آب در سیستم گیاه- خاک از طریق روش‌های زراعی و فیزیولوژیک و شناسایی مراحل بحرانی وقوع تنش آبی، مناسب‌ترین روش زراعی را برای مقابله با آن معرفی می‌نمایند (Feiziasl et al., 2014). امروزه، استفاده از دمای پوشش سبز^۱ (T_c) با تکنیک رادیومتری (دمای رادیومتریک^۲) گیاه مینا (به صورت زمینی یا سنجش از راه دور)، یکی از موثرترین روش‌های غیرتخریبی در تعیین وضعیت آبی گیاه شناخته شده است (Fitzgerald et al., 2006). زیرا T_c با میزان تعرق از روزه‌ها رابطه خطی دارد و با بسته شدن روزه‌ها افزایش می‌یابد (Pipatsitee et al., 2018). با استفاده از این تکنیک، پارامتر کاربردی شاخص تنش آبی گیاه^۳ (CWSI) محاسبه می‌شود که اولین بار به‌طور همزمان توسط ایدسو و همکاران (Idso et al., 1981) و جکسون و همکاران (Jackson et al., 1981) معرفی شد. شاخص CWSI بر اساس تعادل انرژی به‌دست می‌آید که از یک سری شرایط آب و هوایی، دامنه‌ای از تفاوت دمای پوشش سبز و دمای هوا بین دو حد پائین (بدون تنش رطوبتی یا تعرق کامل) و حد بالا (تنش کامل رطوبتی یا بدون تعرق) محصور می‌شود (Colaizzi et al., 2012).

3- Crop Water Stress Index (CWSI)

4- Vapor pressure deficit (VPD)

1- Canopy temperature (CT)

2- Radiometric temperature

$$CWSI = \frac{dT_m - dt_l}{dT_u - dt_l} \quad (۱)$$

در این رابطه:

dT_m : تفاوت دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) بر حسب سانتی‌گراد

dT_u : حد بالای تفاوت دمای پوشش سبز و دمای هوا (حد مبنای بالا) بر حسب سانتی‌گراد و

dt_l : حد پائین تفاوت دمای پوشش سبز و دمای هوا (حد مبنای پائین) بر حسب سانتی‌گراد می‌باشد.

به منظور تعیین حد مبنای بالا، تفاوت دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) در ساعت ۱۳ الی ۱۴ به مدت ۸ روز در خشک‌ترین تیمار (از طریق مشاهده علائم ظاهری در تیمارهای دیم مانند لوله‌ای شدن برگ‌ها) برای هر ژنوتیپ اندازه‌گیری و میانگین آنها به عنوان حد مبنای بالا ($dT_m = (T_c - T_a)_m$) برای جو معرفی شد (Ayeneh et al., 2002).

برای تعیین حد مبنای پائین که خود یک رگرسیون خطی است، از داده‌های فاز آبیاری تکمیلی استفاده شد که از لحاظ رطوبتی نزدیک به شرایط ایده‌آل برای ارقام دیم محسوب می‌شوند. برای تعیین حد مبنای پائین به مدت ۶ روز، تفاوت دمای پوشش سبز با هوای مجاور ($T_c - T_a$)_l در تیمار بدون تنش رطوبتی در ساعت ۱۳ الی ۱۴ اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از فشار بخار اشباع و رطوبت نسبی هوا میزان کمبود فشار بخار هوا از طریق رابطه (۲) محاسبه شد (Tilling et al., 2007):

$$dT_l = (T_c - T_a)_l = a - b(VPD)_m \quad (۲)$$

در این رابطه:

$(T_c - T_a)_l$: تفاوت دمای پوشش سبز گیاه و هوا در شرایط مطلوب بر حسب سانتی‌گراد (حد مبنای پائین)
 $(VPD)_m$: کمبود فشار بخار هوا بر حسب میلی‌بار و a : ضرائب رگرسیون می‌باشد.

پس از محاسبه شاخص‌های CWSI برای ۱۵ ژنوتیپ مورد بررسی در دو شرایط تنش آبی (دیم) و بدون تنش آبی (آبیاری تکمیلی)، مقادیر آستانه دمای بحرانی (T_c)، تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_0)، کمبود فشار بخار نسبی هوا (VDP) برای تمامی ژنوتیپ‌ها از طریق این شاخص محاسبه و وضعیت مقاومت به تنش رطوبتی و گرمایی آخر فصل ژنوتیپ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

تکمیلی به میزان ۵۰ میلی‌متر در زمان کاشت بعلاوه ۳۰ میلی‌متر در مرحله آبستنی (Tavakoli, 2013) در سال‌های زراعی ۹۵-۱۳۹۴ و ۹۷-۱۳۹۶ (آزمایش در سال زراعی ۹۶-۱۳۹۵ با مجموع بارندگی سالیانه ۲۶۳/۹ میلی‌متر به عنوان خشکسالی متوقف شد) در ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم (مراغه) به اجرا درآمد که آمار هواشناسی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

آزمایش در سیستم تناوبی لگوم (ماشک)- جو اجرا شد. آماده‌سازی بستر بذر با روش‌های معمول خاک‌ورزی به صورت گاو آهن قلمی به علاوه دیسک در پائیز و کاشت با بذرکار آزمایشی وینترشتایگر انجام گرفت. هر کرت آزمایشی شامل ۶ ردیف کاشت به طول ۸ متر و به فاصله خطوط ۲۰ سانتی‌متر بود. میزان بذر مصرفی بر اساس ۴۰۰ دانه در مترمربع و با توجه به وزن هزار دانه ژنوتیپ‌ها محاسبه و اعمال شد (Roostaei et al., 2021). کشت در دهه اول مهر ماه پس از ضدعفونی بذر علیه بیماری‌های قارچی به کمک سموم سیستمیک انجام گرفت. در فاز آبیاری بلافاصله بعد از کاشت اقدام به ۵۰ میلی‌متر آبیاری و در مرحله آبستنی گیاه ۳۰ میلی‌متر دیگر به روش بارانی شد. قبل از انجام کاشت نمونه خاکی به روش مرکب از محل اجرای آزمایش تهیه و نتایج تجزیه‌ها نشان داد (جدول ۲)، عناصر قابل جذب فسفر (۹ میلی‌گرم در کیلوگرم)، پتاسیم (۲۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم)، آهن (۵ میلی‌گرم در کیلوگرم)، منگنز (۱۲ میلی‌گرم در کیلوگرم)، روی (۰/۹ میلی‌گرم در کیلوگرم) و مس (۱/۴ میلی‌گرم در کیلوگرم) در خاک بیش از حد بحرانی توصیه شده برای غلات دیم بود (Feiziasl et al., 2009)، لذا فقط اقدام به مصرف کود اوره به میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار که ۶۰ کیلوگرم در هکتار آن همزمان با کاشت به صورت جایگذاری و ۴۰ کیلوگرم در هکتار به صورت سرک در اولین فرصت در بهار همزمان با بارندگی‌های موثر بهاری (۱۰ الی ۱۵ میلی‌متر بارندگی در دو روز متوالی) مصرف شد (Feiziasl, 2017).

T_c در زمان حداکثر تنش دمایی و آبی (ساعت ۱۳ الی ۱۴) در مراحل ظهور برگ پرچم (ZGS39) تا اوایل مرحله خمیری شدن دانه (ZGS73) به مدت ۸ روز با استفاده از دماسنج فروسرخ (مدل A-1 ساخت انگلستان) در روزهای بدون وزش باد در تمامی ژنوتیپ‌ها قرائت شد. در هر کرت ۲ قرائت به صورت اسکن از کل کرت (با حذف نیم متر از طرفین کرت‌ها) با زاویه میل دستگاه حدود ۴۵ درجه و فاصله تقریبی ۰/۵ متر انجام گرفت (Acevedo et al., 2002). با استفاده از رابطه (۱) شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) بر مبنای سه پارامتر محیطی دمای هوا (T_a)، دمای پوشش سبز (T_c) گیاه و کمبود فشار بخار هوا (VDP) محاسبه شد (Roy and Ophori, 2014).

جدول ۱- آمار هواشناسی ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه در سال‌های اجرای آزمایش و میانگین بلند مدت (۲۰ ساله)

Table 1- Meteorological data for dryland agriculture research station in 2015 – 2018 cropping season and long term (20 years), Maragheh

سال Year	بارندگی Rainfall (mm)	میانگین دمای کمینه Mean Min. Temperature (°C)	میانگین دمای حداکثر Mean Max. Temperature (°C)	میانگین دما Mean Temperature (°C)	تعداد روزهای زیر صفر Days of below zero °C	رطوبت نسبی هوا Relative humidity (%)	تبخیر Evaporation (mm)
2015-2016	437	2.9	11.9	7.4	116	59.7	1005
2016-2017	264	1.0	11.2	15.2	126	41.9	1216
2017-2018	423	3.6	13.3	8.4	102	85.0	1050
Long term	361	4.2	14.5	5.3	124	53.4	716

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش در عمق ۰ الی ۲۵ سانتی‌متری
Table 2- Soil physical and chemical properties of experiment location (0-25 cm depth)

سال Year	pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	درصد اشباع SP (%)	کربنات کلسیم معادل CaCO ₃ (%)	کربن آلی OC (%)	نیترژن کل Total N	فسفر قابل جذب P (av.)	پتاسیم قابل جذب K (av.)
2015-2016	8.0	0.80	57.2	3.2	0.70	0.13	15.6	532
2017-2018	7.8	0.71	52.0	7.4	0.72	0.14	10.1	661
سال Year	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn	مس Cu	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay	بافت خاک Soil Texture
2015-2016	5.0	11.8	1.0	1.7	45	41	14	Loam
2017-2018	5.4	13.2	0.9	1.8	40	43	17	Loam

نتایج و بحث

عملکرد دانه

نتایج عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها نشان داد، بیشترین این صفت در شرایط دیم با ۳۱۶۹ کیلوگرم در هکتار به رقم آیدر و کمترین آن با ۱۴۴۶ کیلوگرم در هکتار به رقم والفجر اختصاص یافت. میانگین عملکرد دانه در شرایط دیم ۲۶۱۱ کیلوگرم در هکتار بود. در شرایط آبیاری تکمیلی بیشترین عملکرد دانه با ۴۰۰۱ کیلوگرم در هکتار به رقم آیدر و کمترین آن با ۲۶۲۹ کیلوگرم در هکتار به رقم سرارود ۱ اختصاص یافت و میانگین این صفت برای شرایط آبیاری تکمیلی ۳۴۲۱ کیلوگرم در هکتار بود که نسبت به شرایط دیم ۸۱۰ کیلوگرم در هکتار افزایش نشان داد. بنابراین متوسط کارایی استفاده از آبیاری تکمیلی در این پژوهش ۱۰/۱۳ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر می‌باشد که حداقل آن با ۵/۸ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر به رقم سهند و حداکثر آن با ۲۱/۶ کیلوگرم در هکتار بر میلی‌متر مربوط به رقم والفجر بود. اختلاف عملکرد بین ارقام در شرایط دیم (۱۷۲۳ کیلوگرم در هکتار) حدود ۱/۳ برابر بیشتر از شرایط آبیاری تکمیلی (۱۳۷۲ کیلوگرم در هکتار) بود و این نشان دهنده نزدیکی بیشتر عملکرد دانه ژنوتیپ‌ها با انجام آبیاری تکمیلی است (شکل ۱).

به‌منظور سهولت تفسیر نتایج، مقادیر شاخص CWSI و سایر پارامترها با استفاده از روش گومز (Gomes, 1985) به کلاس‌های مختلفی مانند حساس (S)، نیمه حساس (MS)، نیمه مقاوم (MT) و مقاوم (T) گروه‌بندی و در توصیه نهایی استفاده شد:

$$\begin{aligned} X_i \leq \bar{X} - SD & \text{ Low } & \text{Susceptible (S)} \\ \bar{X} - SD < X_i \leq \bar{X} + SD & \text{ Medium } & \text{Moderately susceptible (MS)} \\ \bar{X} + SD < X_i \leq \bar{X} + 2SD & \text{ High } & \text{Moderately Tolerant (MT)} \\ X_i > \bar{X} + 2SD & \text{ Very high } & \text{Tolerant (T)} \end{aligned} \quad (3)$$

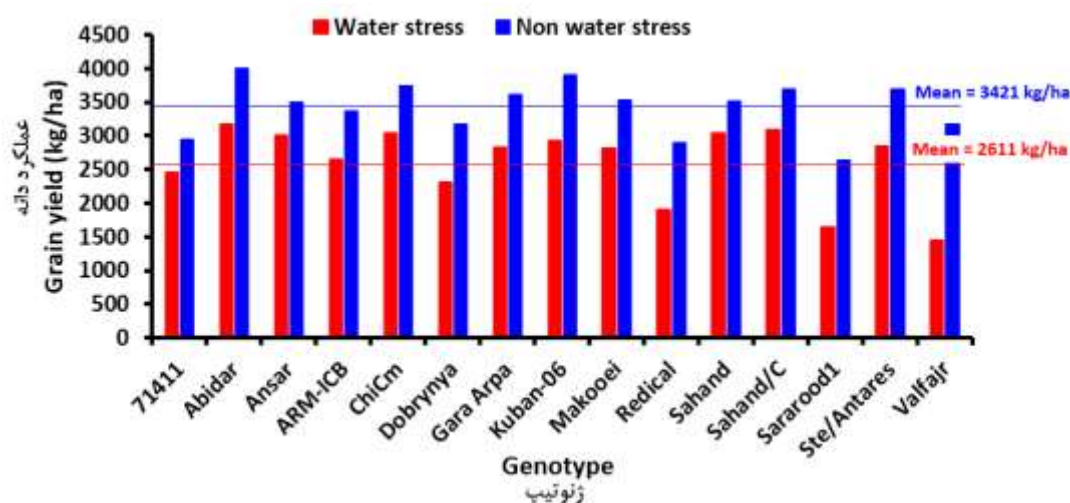
در این رابطه:

X_i : مقدار ویژگی مورد نظر مانند CWSI، T_c ، ET_0 و VPD

$\bar{X}$: میانگین ویژگی مورد نظر و

SD: انحراف معیار ویژگی مورد نظر می‌باشد.

پس از انجام محاسبات لازم، از طریق رابطه بین $(T_c - T_a)$ با شاخص CWSI، آستانه تنش آبی برای جو دیم تعیین شد. همچنین با استفاده از تغییرات شاخص CWSI و ارتباط آن با تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_0) و بارندگی، زمان دقیق وقوع اولین تنش آبی و شدت آن در طول دوره رشد گیاه جو مشخص گردید. معادلات با استفاده از نرم افزار Curveexpert 2.6.3 تعیین و نمودارها در Excel ترسیم شدند.



شکل ۱- عملکرد دانه ژنوتیپ‌های جو در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

Figure 1- Grain yield of barley genotypes in dryland and supplemental irrigation conditions.

نتایج سایرین می‌باشد. معمولاً شیب منحنی با مراحل فنولوژیک گیاه تغییر می‌کند، به نحوی که در مراحل رویشی گیاه شیب منحنی منفی‌تر و عرض از مبدا آن مثبت‌تر از مراحل زایشی است (Idso, 1982). افزون بر آن، شرایط اقلیمی، نوع خاک و واریته گیاهی از عوامل دیگری هستند که بر روی این ضرایب تأثیرگذارند (Bucks *et al.*, 1985). بنابراین، منفی بودن شیب رگرسیون ($-2/47$) و مثبت بودن عرض از مبدا ($+9/15$) حد مبنای پائین در پژوهش حاضر به دلیل پائین بودن میزان تعرق پتانسیل برای ژنوتیپ‌های سازگار با شرایط دیم در مقایسه با ارقام آبی و انجام آبیاری تکمیلی به جای آبیاری کامل در تعیین حد مبنای پائین مورد انتظار بود (Lawlor and Cornic, 2002, Tavakoli, 2012).

دامنه کمبود فشار بخار هوا (VPD) در خط مبنای پائین $1/84$ الی $4/16$ کیلوپاسکال و اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) برای این دامنه به ترتیب $4/61$ الی $-1/33$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شکل ۲). پس از محاسبه CWSI برای این دامنه (شکل ۳الف)، معادل این دامنه برای T_c به ترتیب $22/7$ الی $30/6$ درجه سانتی‌گراد به دست آمد (شکل ۳ب). در پژوهش توبیله و همکاران (Tubaileh *et al.*, 1986) دامنه VPD برای جو در مرحله قبل از سنبله‌دهی $1/2$ الی $3/8$ کیلوپاسکال و بعد از مرحله سنبله‌دهی $1/9$ الی $4/1$ کیلوپاسکال تعیین شد، با توجه به اینکه تعیین دمای پوشش سبز در پژوهش حاضر بیشتر در مرحله سنبله‌دهی و پر شدن دانه انجام گرفت، در نتیجه، نتایج دامنه کمبود فشار بخار هوا (VPD) چه از لحاظ مقدار دامنه و چه از لحاظ حدود نهایی با نتایج توبیله و همکاران (Tubaileh *et al.*, 1986) برای مرحله بعد از سنبله‌دهی مطابقت دارد.

تعیین آستانه تنش رطوبتی با شاخص CWSI

برای محاسبه شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) ابتدا حد مبنای پائین از طریق رابطه رگرسیونی بین کمبود فشار بخار هوا (VPD) با اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) در شرایط آبیاری تکمیلی (بدون تنش) تعیین گردید. این رابطه از نوع خطی کاهشی است که در سطح احتمال یک درصد ($P \leq 0.01$) معنی‌دار می‌باشد و تغییرات کمبود فشار بخار هوا (VPD) توانست ۹۷ درصد از تغییرات اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) را توجیه نماید (شکل ۲):

$$T_c - T_a = -2.4662 \times VPD + 9.1529$$

$$R^2 = R = 0.97^{**}$$

$$SE = 0.2950$$
(۴)

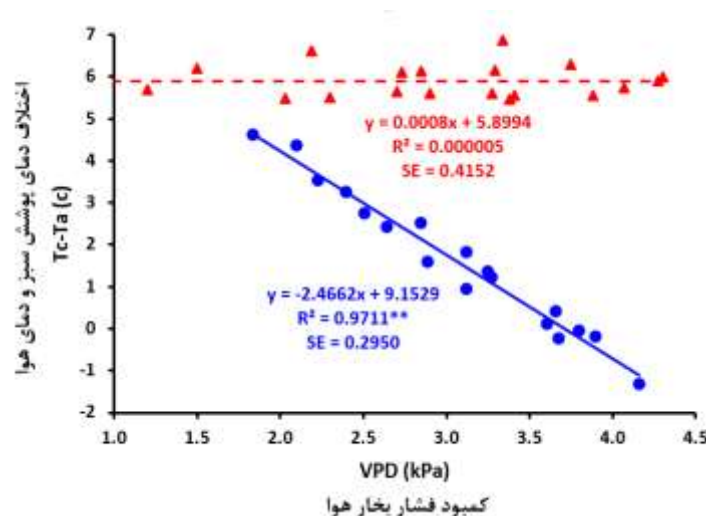
در این رابطه:

VPD: کمبود فشار بخار هوا (کیلوپاسکال) و

$T_c - T_a$: اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا (درجه سانتی‌گراد)

می‌باشد.

مطابق این رابطه، شیب منحنی $-2/47$ و عرض از مبدا آن $+9/15$ می‌باشد که هرکدام از این اعداد دارای مفهوم خاصی از لحاظ تنش رطوبتی و شرایط محیطی می‌باشند (شکل ۲). سایرین شیب این منحنی را برای جو در مرحله قبل از سنبله‌دهی $1/7$ تا $-2/25$ و بعد از سنبله‌دهی $-0/97$ تا $-1/23$ گزارش کرده‌اند (Idso, 1982; Tubaileh *et al.*, 1986). معمولاً در مناطق گرم و خشک شیب منحنی منفی‌تر و در مناطق سرد و مرطوب میل به سمت صفر می‌کند (Feiziasl *et al.*, 2014). مقایسه شیب منحنی با نتایج سایرین نشان می‌دهد که مقدار آن در مرحله بعد از ظهور سنبله، منفی‌تر از



شکل ۲- خطوط مبنای بالا و پائین برای تعیین شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) در ژنوتیپ‌های جو دیم
Figure 2- Lower and upper base-lines to determine CWSI for dryland barley genotypes.

بررسی و به ویژه شرایط محیطی مانند سال و تیمارهای اعمال شده دیم و آبیاری تکمیلی بر روی ژنوتیپ‌های جو بوجود آمده است (Mamnouie et al., 2006). مطابق این نتایج، اگرچه دمای بحرانی برای تحت تنش قرار دادن ژنوتیپ‌های جو دیم به طور متوسط از ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد (Tc) شروع و با افزایش آن شدت این تنش نیز افزایش می‌یابد اما در متوسط دمای پوشش سبز ۳۲/۷ درجه سانتی‌گراد (معادل با ۵.۸ °C (Tc-Ta) دیگر ژنوتیپ‌های جو قادر به تحمل این دما برای ادامه فتوسنتز نیستند (جدول ۳). در نتیجه، تعرق در این دما کاملاً متوقف و به دنبال آن فتوسنتز نیز به صفر می‌رسد. همانطوریکه بیان شد، این اعداد بر روی نمودارها دارای دامنه می‌باشند. این دامنه برای دمای بحرانی پوشش سبز (Tc) یا آستانه شروع تنش رطوبتی بر روی ژنوتیپ‌های جو، ۲۲/۷ الی ۳۰/۹ درجه سانتی‌گراد (متوسط ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد) معادل با ۶/۲ الی ۷/۷ میلی‌متر بر روز تبخیر-تعرق پتانسیل است (جدول ۳). مطابق این نتایج، با افزایش هر ۱/۴ درجه سانتی‌گراد به دمای پوشش سبز، شاخص CWSI به میزان ۰/۰۴۸ و Tc-Ta یک درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (شکل ۳ الف و ب). ویلیامز (Williams, 1974) آستانه دمای بحرانی جو را ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد برای مرحله سنبله‌دهی تا خمیری نرم تعیین کرد که این نتایج با نتیجه به دست آمده از پژوهش حاضر مطابقت دارد. با توجه به اثرات منفی افزایش دمای محیط در مرحله سنبله‌دهی و گلدهی، پژوهشگران دمای بهینه‌ای برای این دوره حساس گیاه معرفی کرده‌اند. کائو و موس (Cao and Moss, 1989) دمای بهینه محیط را برای حداکثر سرعت رشد و ظهور برگ در ژنوتیپ‌های مختلف جو ۲۰/۱ الی ۲۱/۸ درجه سانتی‌گراد در اطاقک‌های رشد تعیین کردند. گل و همکاران (Gol et al., 2017)

گسترده‌ی نسبی دامنه VPD در خط مبنای پائین نشان می‌دهد (شکل ۲) که می‌توان از خط مبنای پائین در مکان‌های دیگری برای ارزیابی تنش رطوبتی و حرارتی ژنوتیپ‌های جو دیم استفاده نمود (Gardner and Shock, 1989).

حد مبنای بالا برای جو دیم ۵/۹ درجه سانتی‌گراد (Tc-Ta=5.9 °C) تعیین شد (شکل ۲) که نشانگر وضعیت اشباع هوا از بخار آب، توقف کامل تعرق در گیاه و در نتیجه بیشترین تنش وارد شده بر گیاه می‌باشد. در این حد، مقدار شاخص تنش رطوبتی وارد شده بر گیاه بیشترین مقدار و برابر با ۱/۰۴ برآورد (CWSI=1.04) شد (شکل ۳ الف). توبیله و همکاران (Tubaileh et al., 1986) حد مبنای بالا را برای جو در مرحله قبل و بعد از سنبله‌دهی به ترتیب ۵/۵ و ۶/۳ درجه سانتی‌گراد و ریزا و همکاران (Rizza et al., 2004) آن را ۶/۱ درجه سانتی‌گراد محاسبه نمودند که این نتایج بسیار نزدیک به نتیجه حاصل از پژوهش حاضر می‌باشند.

با توجه به اینکه در محاسبه ویژگی‌های مهم و کاربردی حاصل از خط مبنای پائین و بالا (به ویژه پائین) مانند تعیین آستانه بحرانی تنش رطوبتی گیاه (CWSI)، دمای پوشش سبز (Tc)، تبخیر-تعرق پتانسیل (ET₀) و کمبود فشار بخار هوا (VPD) از کل بانک اطلاعاتی جمع‌آوری شده مربوط به ۱۵ ژنوتیپ جو در دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی استفاده شد، به همین دلیل، در اغلب موارد این نمودارها در محل تلاقی مورد نظر متغیر مستقل (Tc، Tc-Ta، ET₀ و VPD) و متغیر وابسته (CWSI) بر روی معادله، دارای دامنه هستند. بر این اساس، در محاسبه این پارامترها علاوه بر محاسبه از طریق معادله مربوطه، از طریق شکل (۳ الف، ب، ج و د) دامنه داده‌ها نیز برآورد و در جدول (۳) ارائه شد. دامنه‌ها بیشتر به دلیل تنوع در ژنوتیپ‌های مورد

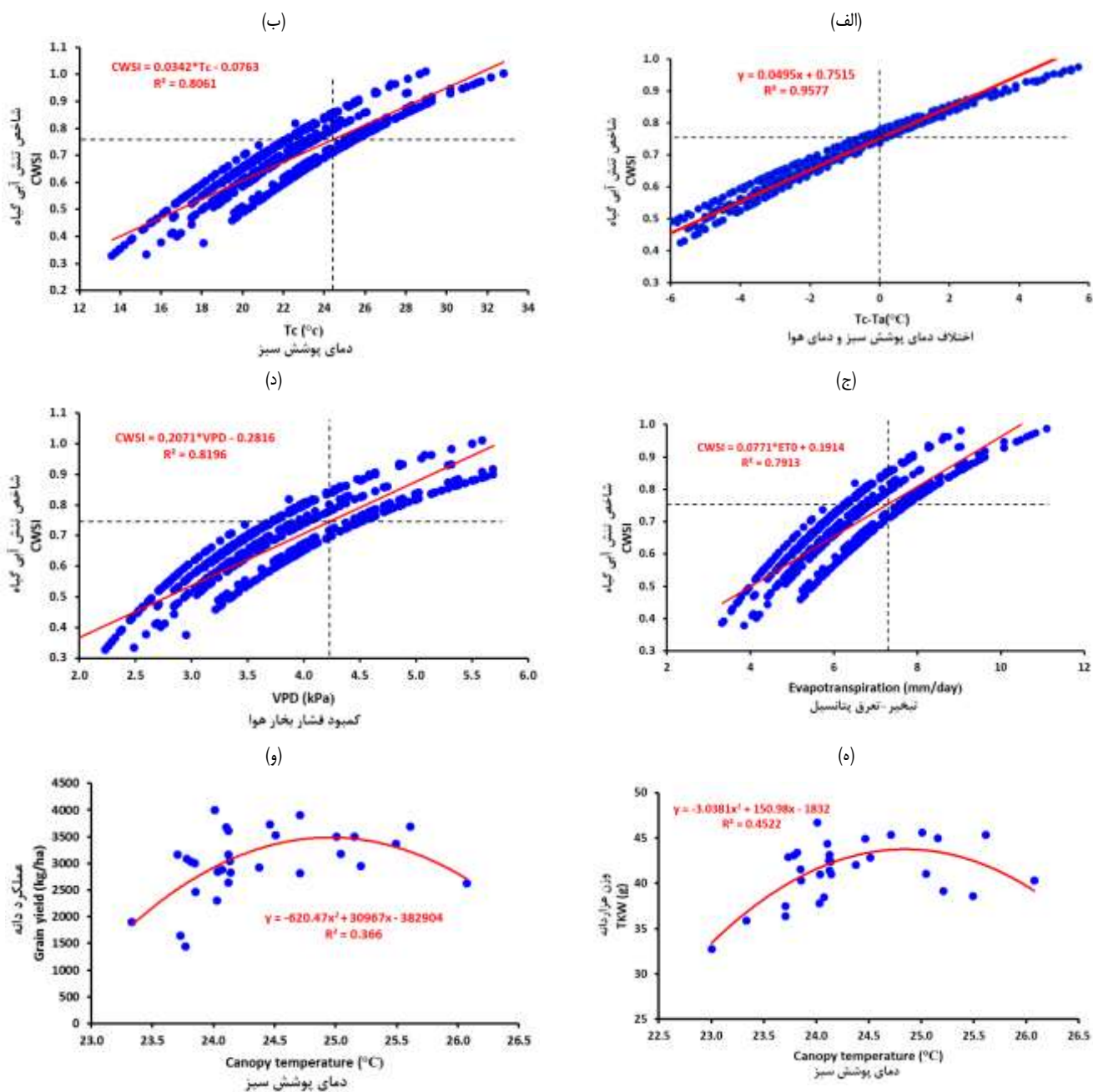
خروجی از چرخه فتوسنتز مانع انتقال الکترون در این چرخه می‌شوند. در تنش گرمایی بالا، تغییر ساختمان کلروپلاست‌ها گزارش شده است. در درجه حرارت بالای متوسط، نفوذپذیری غشای تیلاکوئیدها با مشکل مواجه شده و در اثر آن شیب پروتون، چرخه فتوفسفریلاسیون و در نهایت کمپلکس سیتوکروم b6f (از اجزای جذب نور) تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در حالی که هاگالا و همکاران (Hakala et al., 2012) دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد و بالاتر از آن را تنش گرمایی خیلی شدید برای جو در مرحله سنبله‌دهی در شرایط کشور فنلاند معرفی کردند. پژوهشگران دیگری نیز دمای بحرانی برای توقف فتوسنتز و بسته شدن کامل روزه‌ها را برای گندم و جو ۳۰ الی ۳۲ درجه سانتی‌گراد گزارش کرده‌اند (Trnka et al., 2014; Pradhan and Prasad, 2015; Hlaváčová et al., 2017) که تاحدودی با نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر مطابقت دارد. خلاصه ویژگی‌های کاربردی مربوط به خط مبنای بالا و پائین برای جو دیم در شرایط آزمایش به اختصار در جدول ۳ ذکر شده است.

ارزیابی وضعیت تنش رطوبتی و گرمایی در ژنوتیپ‌های جو دیم

یکی از بحث‌های مهم که در تنش‌های گرمایی و رطوبتی مطرح می‌باشد، پیش‌بینی دقیق زمان و مرحله وقوع این تنش‌ها است که با اطلاع از آن می‌توان از طریق مدیریت کاشت (تاریخ کاشت)، انتخاب ارقام مناسب (زودرس) و مدیریت‌های زراعی مانند مصرف بهینه کودهای نیتروژنی و یا در صورت امکان انجام آبیاری تکمیلی (برای هسته‌های بذری) تنش‌های به وجود آمده را بدون وارد شدن صدمات جدی به تولید محصول مدیریت نمود (Feiziasl et al., 2014). شروع روز بحرانی یا تاریخ آستانه تنش آبی بر اساس دامنه پائین به دست آمده برای شاخص CWSI که در آن میزان شاخص CWSI از ۰/۷ عبور می‌کند، ۲۶۱ روز پس از ابتدای مهر ماه (حدود ۲۰ خرداد ماه) و در مرحله شروع گلدهی (ZGS60) بود که در یک هفته منتهی به آن میزان تبخیر-تعرق پتانسیل به ۹/۶ میلی‌متر بر روز رسید (شکل ۴). فیضی اصل و همکاران (Feiziasl et al., 2014) این تاریخ را برای گندم دیم در این منطقه هفته آخر اردیبهشت ماه (۲۶ اردیبهشت) و یک هفته قبل از ظهور سنبله تعیین کردند. از سوی دیگر، مراحل رشدی جو دیم در این منطقه، حدود ۲۰ روز زودتر از گندم دیم می‌باشد، لذا به نظر می‌رسد، فاصله ۲۵ روزه بین شروع روز بحرانی گندم و جو دیم نشان می‌دهد که جو دیم نسبت به گندم دیم از مقاومت بیشتری به تنش رطوبتی و گرمای آخر فصل برخوردار است.

دمای مطلوب بین ۱۷ الی ۲۳ درجه سانتی‌گراد را برای گیاه جو گزارش کردند که دمای بیش از این محدوده می‌تواند تنش‌های گرمایی و رطوبتی را برای گیاه به ویژه در شرایط دیم در پی داشته باشد. پژوهشگران زیادی گزارش کرده‌اند که افزایش دمای پوشش سبز به بیش از ۲۵ درجه سانتی‌گراد در مرحله سنبله‌دهی باعث کاهش معنی‌دار وزن هزاردانه و عملکرد دانه در جو می‌شود (Dias et al., 2009; Daničić et al., 2019). در پژوهش حاضر نیز افزایش دمای پوشش سبز به بیش از ۲۴/۹ درجه سانتی‌گراد باعث کاهش وزن هزاردانه (شکل ۳) و به دنبال آن کاهش عملکرد دانه جو (شکل ۳و) شد که این احتمالاً بیشتر به دلیل کاهش تعداد گل‌های بارور و افزایش عقیمی آنها و همچنین کاهش رشد ریشه و جذب آب در مرحله سنبله‌دهی می‌باشد (Umesh and Ferris, 1994; Hakala et al., 2012).

همانطوری که مطرح شد، حداکثر دمای قابل تحمل برای گیاه جو در پژوهش حاضر زمانی است که دمای پوشش سبز ۵/۹ درجه سانتی‌گراد بیش از دمای محیط ($T_c - T_a > 5.8^\circ C$) و یا دمای پوشش سبز بیش از ۳۲/۷ درجه سانتی‌گراد ($T_c > 32.7^\circ C$) باشد که این مقدار را حد مبنای بالا برای جو دیم در مناطق سرد و نیمه سرد در مرحله سنبله‌دهی و پرشدن دانه ارقام و ژنوتیپ‌های مختلف جو می‌توان معرفی نمود (شکل ۲). با توجه به اینکه ژنوتیپ‌های مختلف واکنش‌های دمایی متفاوتی از خود نشان می‌دهند (Hlaváčová et al., 2017) در نتیجه، این حد نیز بر روی نمودار مربوطه دارای دامنه‌ای است که کمترین آن ۵/۵ درجه سانتی‌گراد ($T_c - T_a = 5.5^\circ C$) و بیشترین آن ۶/۹ درجه سانتی‌گراد ($T_c - T_a = 6.9^\circ C$) می‌باشد (شکل ۲). با تبدیل این دامنه به T_c ، حد مبنای بالا برای جو دیم دارای دامنه دمای پوشش سبز ۳۲/۱ الی ۳۴/۲ درجه سانتی‌گراد خواهد بود (شکل ۳الف و ب). این نشان می‌دهد، چنانچه اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) در ژنوتیپ‌های مختلف جو دیم به ۵/۵ الی ۶/۹ درجه سانتی‌گراد و یا دمای پوشش سبز به ۳۲/۱ الی ۳۴/۲ درجه سانتی‌گراد (معادل با ۹/۰ الی ۱۱/۱ میلی‌متر تبخیر-تعرق پتانسیل) برسد (شکل ۳ج)، علاوه بر تنش گرمایی، جذب آب نیز به شدت با مشکل مواجه شده و در نتیجه تنش رطوبتی نیز در شرایط دیم گریبانگیر گیاه خواهد شد. در چنین شرایطی گیاه به منظور حفظ آب، منافذ خود را کاملاً بسته و مبادله اکسیژن و دی اکسید کربن و در نهایت فتوسنتز متوقف می‌شود (Klink et al., 2011). مطابق نظر دایاس و همکاران (Dias et al., 2009) تنش گرمایی متوسط (۳۵ الی ۴۰ درجه سانتی‌گراد) می‌تواند فتوسنتز را بدون آسیب رساندن به چرخه فتوسیستم II متوقف نماید. با این حال، وقتی دمای هوا تا حد ۴۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد، کمپلکس‌های اکسیژن



شکل ۳- رابطه بین اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا (الف)، دمای پوشش سبز (ب)، تبخیر-تعرق پتانسیل (ج) و کمبود فشار بخار هوا (د) با شاخص CWSI و رابطه بین دمای پوشش سبز با وزن هزاردانه (ه) و عملکرد دانه (و) جو دیم

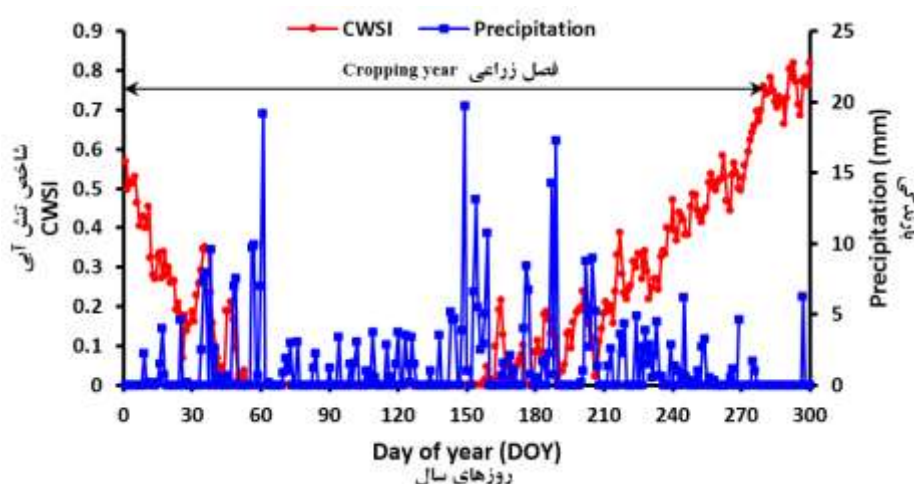
Figure 3- Relations between canopy-air temperature difference (a), canopy temperature (b), potential evapotranspiration (c) and vapor pressure deficit (d) with CWSI and relations between canopy temperature and 1000-kernel weight (e) and grain yield (and) of dryland barley genotypes

جدول ۳- ویژگی‌های عمومی خط مبنای بالا و پائین برای جو دیم
Table 3- General properties of lower and upper base-lines for dryland barley

خط مبنا Base line	Traits	ویژگی	حد پائین Lower limit	حد بالا Upper limit	دامنه Range
پائین Lower	Vapor pressure deficit (Kpa)	کمبود فشار بخار هوا	1.84	4.16	2.30
	Canopy - air temperature difference (°C)	اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا	4.61	-1.23	4.61
	Crop Water Stress Index (CWSI)	شاخص تنش آبی گیاه	0.980	0.699	0.281
	Canopy temperature (°C)	دمای پوشش سبز	30.9	22.7	8.2
	Potential evapotranspiration (mm/day)	تبخیر-تعرق پتانسیل	6.2	7.7	1.5
	Threshold canopy temperature (°C)	آستانه دمای بحرانی		24.2	
	Days of CWSI threshold	تاریخ شروع آستانه تنش آبی	248 days from sowing date		
بالا Upper	Vapor pressure deficit (kPa)	کمبود فشار بخار هوا	6.29	6.63	0.34
	Canopy - air temperature difference (°C)	اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا	5.48	6.87	1.39
	Crop Water Stress Index (CWSI)	شاخص تنش آبی گیاه	1.02	1.09	0.07
	Canopy temperature (°C)	دمای پوشش سبز	21.1	34.2	2.1
	Potential evapotranspiration (mm/day)	تبخیر-تعرق پتانسیل	9.0	11.1	2.1
	Maximum temperature stress applied (°C)*	حداکثر تنش وارد شده بر گیاه		32.4	

*: این مقدار نشان دهنده متوسط آستانه توقف کامل تعرق در جو دیم می‌باشد.

: This value indicates the average complete threshold of transpiration in dryland barley



شکل ۴- تغییرات روزانه بارندگی و شاخص CWSI در طول دوره رشد جو

Figure 4- Variation of daily precipitation and CWSI during cropping seasons for dryland barley genotypes

سرارود ۱ اختصاص یافت (جدول ۴). آزمون t بین دو شرایط تنش رطوبتی برای آستانه CWSI نشان داد ($t = 2.56^*$) این دو شرایط تفاوت معنی‌داری ($P \leq 0.05$) با یکدیگر دارند و این آستانه در شرایط آبیاری تکمیلی به طور میانگین به میزان 0.1 بیشتر از شرایط دیم است (جدول ۵). ضریب تغییرات آستانه شاخص CWSI در شرایط دیم 0.38 درصد و شرایط آبیاری تکمیلی 2.3 درصد است که این نشان می‌دهد، اگرچه در داخل هر دو گروه تغییرات در بین ژنوتیپ‌ها ناچیز می‌باشد اما تغییرات در شرایط آبیاری تکمیلی 5 برابر بیشتر از دیم است. به بیان دیگر، در ظاهر تغییرات چندانی بین

برای ارزیابی وضعیت تنش رطوبتی و گرمایی ژنوتیپ‌های جو در دو شرایط آبیاری تکمیلی و دیم از آستانه تنش پارامترهای CWSI، ET_0 و VPD استفاده شد (جدول ۴). تغییرات اختلاف دمای پوشش سبز و دمای هوا ($T_c - T_a$) به طور متوسط 99 درصد از تغییرات شاخص CWSI را در هر دو شرایط رطوبتی توجیه نمود. در شرایط دیم بیشترین ضریب تبیین به میزان 98 درصد به دو رقم آبی‌در و سرارود ۱ و کمترین آن به میزان 95 درصد به رقم ماکویی و ژنوتیپ ARM-ICB اختصاص یافت. در شرایط آبیاری تکمیلی بیشترین ضریب تبیین با 0.98 به رقم آبی‌در و کمترین آن با 0.94 به رقم

زیادی به شرایط تنش رطوبتی و گرمای آخر فصل دارند. ثانیاً این شاخص در بین ژنوتیپ‌ها و هر دو شرایط دامنه بسیار پائینی دارد و در شرایط آبیاری تکمیلی این شاخص مقداری پائین‌تر از شرایط دیم است. شاید علت آن عدم تنوع ژنتیکی بین ۱۵ ژنوتیپ انتخاب شده و یا پوشش گیاهی غیرمتراکم آنها در شرایط مزرعه‌ای باشد، زیرا مشاهدات مزرعه‌ای نشان داد، ژنوتیپ‌های مورد بررسی در مرحله زایشی در هر دو شرایط دیم و آبیاری تکمیلی توانایی پوشش کامل سطح خاک را نداشتند. معمولاً کاربرد شاخص CWSI در اندازه‌گیری دمای سطحی توسط ماهواره یا سنجنده‌های هوایی به شرایط سطح پوشیده از گیاه محدود می‌شود و در این حالت، دمای اندازه‌گیری شده سطحی برابر با دمای کانوپی خواهد بود. این محدودیت از کارایی این شاخص برای شرایط پوشش گیاهی غیرمتراکم در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی می‌کاهد (Fashae et al., 2015). به منظور رفع این معضل، موران و همکاران (Moran et al., 1994) ایده شاخص پوشش سبز/ دمای گیاه^۱ (VIT) را برای توصیف رابطه بین تفاوت دمای سطح و دمای هوا (Ts - Ta) در مقابل پوشش گیاهی^۲ (VC) جهت معرفی شاخص جدیدی تحت عنوان شاخص کمبود آب^۳ (WDI) ارائه دادند. این شاخص توانایی ارزیابی تأخیر- تعرق را در هر دو زمین با پوشش متراکم و غیرمتراکم دارد. فیضی اصل و همکاران (Feiziasl et al., 2022) با استفاده از شاخص WDI آستانه دمای بحرانی پوشش گیاهی (۲۴/۳) درجه سانتی‌گراد، حد مبنای بالا (۳۴/۶) درجه سانتی‌گراد) و زمان شروع آستانه دمای بحرانی (۲۵۴) روز پس از کاشت) را برای جو دیم محاسبه و ارقام مناسب را برای هر دو شرایط با دقت بیشتری معرفی نمودند. نتایج آنها نشان داد، این ویژگی‌ها به ترتیب ۱/۸ سانتی‌گراد، ۱/۹ درجه سانتی‌گراد و ۹ روز بیشتر و ارقام مناسب برای هر دو شرایط متفاوت از شاخص CWSI بود.

نتیجه‌گیری

مطابق نتایج این پژوهش زمانی که دمای پوشش گیاهی ۵/۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای هوا (Tc-Ta=5.9 °C) باشد، اشباع هوا از بخار آب، توقف کامل تعرق گیاه و فتوسنتز و در نتیجه بیشترین تنش وارد شده بر گیاه جو اتفاق می‌افتد که به عنوان حد مبنای بالا برای جو دیم در مناطق سرد و نیمه سرد محسوب می‌شود که این حد معادل با ۳۲/۷ درجه سانتی‌گراد Tc می‌باشد. در این حد ژنوتیپ‌های جو قادر به تحمل تنش گرمایی و به دنبال آن تنش رطوبتی نیستند و به منظور حفظ آب خود، منافذ خود را کاملاً بسته و تعرق و مبادله اکسیژن و دی‌اکسید کربن متوقف و در نهایت فتوسنتز به صفر تنزل می‌یابد.

ژنوتیپ‌های مورد بررسی از لحاظ آستانه تنش رطوبتی (CWSI) مشاهده نمی‌شود، شاید دلیل این امر انتخاب ژنوتیپ‌ها از آزمایش‌های پیشرفته و تشابه ژنتیکی آنها در مقاومت به تنش رطوبتی و سازگاری با شرایط سخت است اما تفاوت این دو گروه از لحاظ آماری معنی‌دار است. با این حال، در شرایط دیم بیشترین آستانه تنش رطوبتی به میزان ۰/۷۵۷ مشترکاً به رقم ماکویی و Kuban-06 (هر دو در کلاس مقاوم) و کمترین آن به میزان ۰/۷۴۸ به رقم انصار و ژنوتیپ Sahand/C-25041 (هر دو در کلاس حساس) اختصاص یافت. انحراف معیار (SD=0.003) آستانه تنش رطوبتی در شرایط دیم نشان می‌دهد که به نظر بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این شرایط تفاوت چندانی وجود ندارد اما از لحاظ مقاومت به تنش گرمایی و رطوبتی آخر فصل، ژنوتیپ‌ها در کلاس‌های مختلفی قرار گرفتند. در شرایط آبیاری تکمیلی، بیشترین آستانه CWSI به ترتیب به ژنوتیپ ARM-ICB (۰/۷۸۸)، سه‌د (۰/۷۸۱) و انصار (۰/۷۷۸) (هر سه در کلاس مقاوم) و کمترین آن به ترتیب به رقم والفجر (۰/۷۴۱)، آبی‌در (۰/۷۴۳)، قره‌آرپا (۰/۷۴۳) و Sahand/C-25041 (۰/۷۴۳) (همه در کلاس حساس) اختصاص یافت. انحراف معیار (SD=0.015) آستانه تنش رطوبتی در شرایط آبیاری تکمیلی نشان می‌دهد که بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی در این شرایط تفاوت جزئی وجود دارد اما این تفاوت جزئی آنها را در کلاس‌های مختلف قرار داد (جدول ۵). به بیان دیگر، اولاً آستانه تنش رطوبتی برای ژنوتیپ‌های مختلف جو دیم ۰/۷۵ الی ۰/۷۶ می‌باشد که می‌توان عبور از مقدار ۰/۷۵ را مبنای شروع تنش رطوبتی و گرمایی برای جو در نظر گرفت. ثانیاً از لحاظ مقاومت به تنش رطوبتی و گرمای آخر فصل، اگرچه بین دو شرایط آبیاری تکمیلی و دیم اختلاف از طریق آزمون t معنی‌دار ($P \leq 0.05$) می‌باشد اما از لحاظ اعداد شاخص CWSI تفاوت زیادی (حداقل ۰/۰۰۲ و حداکثر ۰/۰۴ و به‌طور میانگین ۰/۰۱) بین این دو شرایط و همچنین بین ژنوتیپ‌های مورد بررسی مشاهده نمی‌شود. ثالثاً آستانه تنش رطوبتی برای جو در پژوهش حاضر (۰/۷۵ الی ۰/۷۶) عدد نسبتاً بالایی به نظر می‌رسد (جدول ۵). توبیله و همکاران (Tubaileh et al., 1986) دامنه این شاخص را در دو شرایط رطوبت متوسط خاک ۰/۲۴ الی ۰/۷۸ و در رطوبت کم ۰/۵۷ الی ۱/۰ در یک خاک لوم رسی تعیین کردند. آنها حد آستانه این شاخص را برای جو ۰/۴۶ گزارش کردند. تحقیقات ریزا و همکاران (Rizza et al., 2004) بر روی ۸۹ ژنوتیپ جو، دامنه CWSI را ۰/۴۴ تا ۰/۹۷ نشان داد. مقایسه نتایج پژوهش حاضر با نتایج سایرین نشان می‌دهد اولاً به نظر آستانه تنش رطوبتی گیاه برای جو در پژوهش حاضر بالا است و یا اینکه ژنوتیپ‌های گزینش شده در موسسه تحقیقات کشاورزی دیم برای شرایط دیم مقاومت نسبتاً

جدول ۴- روابط شاخص تنش آبی گیاه (CWSI) برای ژنوتیپ‌های جو نیم در شرایط تنش آبی (S) و بدون تنش آبی (N) (n = 24)

Genotype	ژنوتیپ	شرایط Condition	Equation (Tc-Ta) with CWSI	R ²	Equation Tc with CWSI	R ²	Equation ET ₀ with CWSI	R ²	Equation VPD with CWSI	R ²
71411		S	CWSI = 0.0476 (Tc-Ta) + 0.7514	0.96**	CWSI = 0.0300Tc + 0.0358	0.82**	CWSI = 0.0686 ET ₀ + 0.2636	0.81**	Tc-Ta = -3.1288 VPD + 15.503	0.68**
		N	CWSI = 0.0539 (Tc-Ta) + 0.7667	0.95**	CWSI = 0.034Tc - 0.0904	0.86**	CWSI = 0.0811 ET ₀ + 0.1456	0.85**	Tc-Ta = -3.3452 VPD + 17.5	0.74**
Abidar	آبدر	S	CWSI = 0.0464 (Tc-Ta) + 0.7513	0.98**	CWSI = 0.0335Tc - 0.0567	0.71**	CWSI = 0.0764 ET ₀ + 0.2005	0.70**	Tc-Ta = -3.5895 VPD + 17.994	0.58**
		N	CWSI = 0.0475 (Tc-Ta) + 0.7431	0.98**	CWSI = 0.0352Tc - 0.102	0.89**	CWSI = 0.0801 ET ₀ + 0.164	0.88**	Tc-Ta = -3.8848 VPD + 19.459	0.83**
Ansar	انصار	S	CWSI = 0.0432 (Tc-Ta) + 0.7483	0.96**	CWSI = 0.0303Tc + 0.0257	0.79**	CWSI = 0.0685 ET ₀ + 0.262	0.79**	Tc-Ta = -3.4286 VPD + 16.988	0.68**
		N	CWSI = 0.0586 (Tc-Ta) + 0.7782	0.97**	CWSI = 0.0382Tc - 0.1827	0.89**	CWSI = 0.0942 ET ₀ + 0.064	0.87**	Tc-Ta = -3.6988 VPD + 19.136	0.79**
ARM-ICB		S	CWSI = 0.0458 (Tc-Ta) + 0.7517	0.95**	CWSI = 0.0305Tc + 0.016	0.76**	CWSI = 0.0708 ET ₀ + 0.2426	0.76**	Tc-Ta = -3.2317 VPD + 16.193	0.60**
		N	CWSI = 0.0592 (Tc-Ta) + 0.7875	0.95**	CWSI = 0.0378Tc - 0.1761	0.84**	CWSI = 0.096 ET ₀ + 0.0552	0.82**	Tc-Ta = -3.4622 VPD + 18.236	0.64**
ChuCm/An57/Albert		S	CWSI = 0.0442 (Tc-Ta) + 0.7499	0.96**	CWSI = 0.0304Tc + 0.0259	0.79**	CWSI = 0.0696 ET ₀ + 0.2573	0.79**	Tc-Ta = -2.7338 VPD + 13.79	0.60**
		N	CWSI = 0.0517 (Tc-Ta) + 0.7505	0.96**	CWSI = 0.0405Tc - 0.2274	0.91**	CWSI = 0.0978 ET ₀ + 0.0431	0.90**	Tc-Ta = -4.3384 VPD + 21.766	0.83**
Dobrynya		S	CWSI = 0.0468 (Tc-Ta) + 0.7505	0.96**	CWSI = 0.0308Tc + 0.0104	0.81**	CWSI = 0.07 ET ₀ + 0.2484	0.79**	Tc-Ta = -3.2804 VPD + 16.355	0.69**
		N	CWSI = 0.0531 (Tc-Ta) + 0.7634	0.95**	CWSI = 0.0353Tc - 0.1206	0.86**	CWSI = 0.084 ET ₀ + 0.1271	0.83**	Tc-Ta = -3.5377 VPD + 18.369	0.75**
Gara Arpa	قره آریا	S	CWSI = 0.0453 (Tc-Ta) + 0.7522	0.96**	CWSI = 0.0322Tc - 0.0251	0.63**	CWSI = 0.0754 ET ₀ + 0.2097	0.63**	Tc-Ta = -3.342 VPD + 16.856	0.45**
		N	CWSI = 0.0485 (Tc-Ta) + 0.7427	0.95**	CWSI = 0.0383Tc - 0.1812	0.90**	CWSI = 0.089 ET ₀ + 0.0957	0.88**	Tc-Ta = -4.1896 VPD + 21.106	0.84**
Kuban-06		S	CWSI = 0.0472 (Tc-Ta) + 0.7539	0.96**	CWSI = 0.0303Tc + 0.0186	0.68**	CWSI = 0.0713 ET ₀ - 0.2366	0.68**	Tc-Ta = -3.0351 VPD + 15.40	0.49**
		N	CWSI = 0.0519 (Tc-Ta) + 0.7555	0.95**	CWSI = 0.0358Tc - 0.1291	0.90**	CWSI = 0.0838 ET ₀ + 0.1283	0.87**	Tc-Ta = -3.7059 VPD + 19.014	0.83**
Makoei	ماکویی	S	CWSI = 0.0486 (Tc-Ta) + 0.7571	0.95**	CWSI = 0.0286Tc + 0.0505	0.70**	CWSI = 0.0667 ET ₀ + 0.2606	0.70**	Tc-Ta = -2.7630 VPD + 14.290	0.50**
		N	CWSI = 0.0557 (Tc-Ta) + 0.7668	0.97**	CWSI = 0.041Tc - 0.2381	0.87**	CWSI = 0.1009 ET ₀ + 0.0269	0.85**	Tc-Ta = -4.1195 VPD + 20.879	0.75**
Redical		S	CWSI = 0.0426 (Tc-Ta) + 0.7485	0.97**	CWSI = 0.0301Tc + 0.0462	0.79**	CWSI = 0.0666 ET ₀ + 0.2904	0.78**	Tc-Ta = -3.4538 VPD + 16.679	0.70**
		N	CWSI = 0.052 (Tc-Ta) + 0.7474	0.96**	CWSI = 0.041Tc - 0.2395	0.91**	CWSI = 0.0976 ET ₀ + 0.0417	0.88**	Tc-Ta = -4.3636 VPD + 21.856	0.84**
Sahand	سهند	S	CWSI = 0.0473 (Tc-Ta) + 0.7524	0.96**	CWSI = 0.0342Tc - 0.073	0.78**	CWSI = 0.0810 ET ₀ + 0.1695	0.77**	Tc-Ta = -3.6219 VPD + 18.186	0.61**
		N	CWSI = 0.0594 (Tc-Ta) + 0.7813	0.97**	CWSI = 0.0417Tc - 0.2614	0.89**	CWSI = 0.1044 ET ₀ - 0.0011	0.86**	Tc-Ta = -4.0665 VPD + 20.879	0.79**
Sahand C-25041		S	CWSI = 0.0441 (Tc-Ta) + 0.7475	0.97**	CWSI = 0.0356Tc - 0.0992	0.78**	CWSI = 0.0821 ET ₀ - 0.1671	0.79**	Tc-Ta = -4.0709 VPD + 20.106	0.66**
		N	CWSI = 0.0507 (Tc-Ta) + 0.7425	0.97**	CWSI = 0.0394Tc - 0.2071	0.91**	CWSI = 0.0919 ET ₀ + 0.075	0.88**	Tc-Ta = -4.2402 VPD + 21.294	0.86**
Sararood1	سارارود ۱	S	CWSI = 0.045 (Tc-Ta) + 0.7485	0.98**	CWSI = 0.0354Tc - 0.0916	0.77**	CWSI = 0.0811 ET ₀ - 0.1773	0.77**	Tc-Ta = -3.9660 VPD + 19.516	0.66**
		N	CWSI = 0.0546 (Tc-Ta) + 0.7721	0.94**	CWSI = 0.0279Tc + 0.0446	0.79**	CWSI = 0.0668 ET ₀ + 0.2395	0.78**	Tc-Ta = -2.4691 VPD + 13.495	0.57**
Ste/Antares/YEA762		S	CWSI = 0.0472 (Tc-Ta) + 0.7537	0.96**	CWSI = 0.0307Tc + 0.0159	0.72**	CWSI = 0.0713 ET ₀ + 0.2421	0.72**	Tc-Ta = -3.135 VPD + 15.678	0.55**
		N	CWSI = 0.0551 (Tc-Ta) + 0.7725	0.95**	CWSI = 0.0332Tc - 0.0778	0.86**	CWSI = 0.0806 ET ₀ + 0.1449	0.86**	Tc-Ta = -3.1863 VPD + 16.935	0.71**
Valfajr	والفجر	S	CWSI = 0.0457 (Tc-Ta) + 0.7514	0.97**	CWSI = 0.0342Tc - 0.0615	0.72**	CWSI = 0.0796 ET ₀ + 0.1894	0.72**	Tc-Ta = -3.6891 VPD + 18.216	0.57**
		N	CWSI = 0.0456 (Tc-Ta) + 0.7412	0.97**	CWSI = 0.0384Tc - 0.1691	0.88**	CWSI = 0.0885 ET ₀ - 0.1158	0.87**	Tc-Ta = -4.3923 VPD + 21.679	0.80**
Mean	میانگن	S	CWSI = 0.0436 (Tc-Ta) + 0.7487	0.99**	CWSI = 0.0429Tc - 0.2641	0.99**	CWSI = 0.0958 ET ₀ + 0.0793	0.99**	Tc-Ta = -5.2259 VPD + 25.547	0.99**
		N	CWSI = 0.0447 (Tc-Ta) + 0.7376	0.99**	CWSI = 0.0447Tc - 0.316	0.99**	CWSI = 0.1007 ET ₀ + 0.0284	0.97**	Tc-Ta = -5.4007 VPD + 26.556	0.99**

S: Stress, N: Non stress, * and **: Significant at the 5% and 1% level of probability, respectively

جدول ۵- تعیین آستانه دمای بحرانی (T_c)، تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) و کمبود فشار بخار نسبی هوا (VPD) با استفاده از شاخص تنش رطوبتی گیاه (CWSI) در ژنوتیپ‌های جو دیم در دو شرایط تنش و بدون تنش آبی

Table 5- Determination of critical canopy temperature (T_c), potential evapotranspiration (ET_p) and vapor pressure deficit (VPD) thresholds using crop water stress index (CWSI) for dryland barley genotypes under stress and non-stress conditions.

Genotype	ژنوتیپ	آستانه شاخص تنش آبی		آستانه دمای پوشش سبز		آستانه تبخیر-تعرق پتانسیل		آستانه کمبود فشار بخار اشباع	
		Non stress	Stress	Non stress	Stress	Non stress	Stress	Non stress	Stress
71411		0.767 M	0.751 M	25.2 M	23.9 M	7.7 MT	7.1 M	5.23 M	4.95 M
Abidar	آبیدار	0.743 S	0.751 M	24.0 S	24.1 M	7.2 MS	7.2 M	5.01 MS	5.01 M
Ansar	انصار	0.778 T	0.748 S	25.2 M	23.8 M	7.6 M	7.1 M	5.17 M	4.95 M
ARM-ICB		0.788 T	0.752 M	25.5 T	24.1 M	7.6 M	7.2 M	5.27 M	5.01 M
ChiCm/An57/Albert		0.763 M	0.750 M	24.5 M	23.8 M	7.4 M	7.1 M	5.02 MS	5.04 M
Dobrynya		0.763 M	0.751 M	25.0 M	24.0 M	7.6 M	7.2 M	5.19 M	4.99 M
Gara Arpa	گاره آرپا	0.743 S	0.752 M	24.1 MS	24.1 M	7.3 M	7.2 M	5.04 MS	5.04 M
Kuban-06		0.756 M	0.757 T	24.7 M	24.4 T	7.5 M	7.3 MT	5.13 M	5.07 MT
Makoei	ماکویی	0.767 M	0.757 T	24.5 M	24.7 T	7.3 M	7.4 T	5.07 M	5.17 T
Redical		0.747 M	0.749 MS	24.1 MS	23.3 S	7.2 MS	6.9 S	5.01 MS	4.83 S
Sahand	سهند	0.781 T	0.752 M	25.0 M	24.1 M	7.5 M	7.2 M	5.13 M	5.02 M
Sahand/C-25041		0.743 S	0.748 S	24.1 MS	23.8 M	7.3 M	7.1 M	5.02 MS	4.94 MS
Saravod	سارود	0.772 M	0.749 MS	26.1 T	23.7 MS	8.0 T	7.0 MS	5.47 T	4.92 MS
Site/Antares/YEA762		0.773 M	0.754 MT	25.6 T	24.0 M	7.8 T	7.2 M	5.31 MT	5.00 M
Valfajr	والفجر	0.741 S	0.751 M	23.7 S	23.8 M	7.1 S	7.1 M	4.94 S	4.94 M
Mean	میانگین	0.762 M	0.751 M	24.8 M	24.0 M	7.5 M	7.1 M	5.13 M	4.99 M
Min	حداقل	0.741	0.748	23.7	23.3	7.1	6.9	4.94	4.83
Max	حداکثر	0.788	0.757	26.1	24.7	8.0	7.4	5.47	5.17
SD	انحراف معیار	0.015	0.003	0.69	0.32	0.2	0.1	0.14	0.08
CV	ضریب تغییرات	2.03	0.38	2.8	1.3	3.3	1.8	2.78	1.57
t test (Stress vs Non stress)		2.56*		4.02**		4.50**		3.22**	

M: Medium, S: susceptible, T: Tolerant, MS: Moderately susceptible, MT: Moderately Tolerant

سپاسگزاری

با توجه به اینکه مقاله حاضر از پروژه تحقیقی شماره ۹۴۱۰۵-۱۵-۲-۱۵ موسسه تحقیقات کشاورزی دیم استخراج شده است، لذا از موسسه و بخش تحقیقات مدیریت منابع که امکانات لازم را در اختیار مجری پروژه قرار داده‌اند، تشکر می‌نمایم.

در حالی که دمای بحرانی برای تنش رطوبتی در ژنوتیپ‌های جو دیم از ۲۴/۲ درجه سانتی‌گراد ($T_c \geq 24.2^\circ\text{C}$) در مرحله شروع گلدهی (ZGS60) شروع و با افزایش آن شدت این تنش افزایش می‌یابد و منجر به کاهش شدید جذب آب و در نتیجه همراه با تنش گرمایی، تنش رطوبتی نیز گریبانگیر گیاه می‌شود. اگر چه اختلاف زیادی در آستانه تنش رطوبتی بین شرایط دیم ($\text{CWSI}=0.751$) و آبیاری تکمیلی ($\text{CWSI}=0.762$) وجود نداشت اما این اختلاف از لحاظ آماری معنی‌دار ($t = 2.56^*$) بود و شاخص CWSI توانایی لازم را در تفکیک ژنوتیپ‌های مناسب برای شرایط دیم و آبیاری تکمیلی داشت.

منابع

1. Acevedo E., Silva P., and Silva H. 2002. Wheat growth and physiology. p 53-89. In: B.C. Curtis, S. Rajaram, H. Gómez Macpherson (eds). Bread wheat Improvement and Production. Cereals Officer, Crop and Grassland Service, FAO.
2. Ahmadi K., Ebadzadeh H., Ebdeshah H., Kazemian A., and Rafiee M. 2019. Agricultural statistics of Iran cropping year 2016-2017. Agronomy Production; Ministry of Agriculture, Planning and Economic Deputy, Information Technology Center: Tehran, Iran. (In Persian)
3. Ayeneh A., Van Ginkel M., Reynolds M.P., and Ammar K. 2002. Comparison of leaf, spike, peduncle, and canopy temperature depression in wheat under heat stress. Field Crops Research 79: 173-184. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00138-7](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00138-7).
4. Bucks D., Nakavamma F., French O., Regard W., and Alexander W. 1985. Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. Agricultural Water Management 10: 61-79. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(85\)90035-6](https://doi.org/10.1016/0378-3774(85)90035-6).
5. Cao W., and Moss DN. 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. Crop Science 29: 1018-1021. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900040038x>.
6. Colaizzi PD., Oshaughnessy SA., Evett SR., and Howell TA. 2012. Using plant canopy temperature to improve irrigated crop management. Proceedings of the Central Plains Irrigation Conference. February 21-22, 2012, Colby, Kansas. p. 203-223.
7. Daničić M., Zekić V., Mirosavljević M., Lalić B., Putnik-Delić M., Maksimović I., and Dalla Marta A. 2019. The response of spring barley (*Hordeum vulgare* L.) to climate change in Northern Serbia. Atmosphere 10: 14. <https://doi.org/10.3390/atmos10010014>.
8. Dias AS., Lidon FC., and Ramalho JC. 2009. Heat stress in Triticum: Kinetics of Fe and Mn accumulation. Brazilian Journal of Plant Physiology 21(2): 153-164. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202009000200008>.
9. Dold C., Hatfield JL., Prueger J., Sauer T., Büyükcangaz H., and Rondinelli, W., 2017. Long-term application of the crop water stress index in midwest agro-ecosystems. Agronomy Journal 109: 2172-2181. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.09.0494>.
10. Elbashier EME., Tahir ISA., Saad AI., and Ibrahim MAS. 2012. Wheat genotypic variability in utilizing nitrogen fertilizer for a cooler canopy under a heat-stressed irrigated environment. African Journal of Agricultural Research 7(3): 385-392. <https://doi.org/10.5897/AJAR11.525>.
11. Erkan H., Celik S., Bilgi B., and Koxsel H. 2006. A new approach for the utilization of barley in food products: Barley tarhana. Food Chemistry 97: 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.03.018>.
12. Fashae M., Sanaee Nejad S., and Davary, K. 2015. Soil moisture estimation using MODIS images (Case Study: Mashhad plain area). Water and Soil 29(6): 1735-1748. <http://doi.org/10.22067/JSW.V29I6.34978>.
13. Feiziasl V., Fotovat A., Astarai A., Lakzian A., Mousavi SB. 2014. Effect of optimized nitrogen application in reducing drought stress effect on grain yield of some rainfed bread wheat genotypes. Seed and Plant Production Journal 30(2): 169-198. <http://doi.org/10.22092/sppj.2017.110544>.
14. Feiziasl V., Jafarzadeh J., Pala M., and Mosavi SB. 2009. Determination of micronutrient critical Levels by plant response column order procedure for dryland wheat (*T. aestivum* L.) in Northwest of Iran. International Journal of Soil Science 4(1): 14-19. <http://doi.org/10.3923/ijss.2009.14.26>.
15. Feiziasl V. 2017. Evaluation of dryland barley (*Hordum vulgare*) genotypes response to the nitrogen rates and application times. Water and Soil 31(2): 490-508. <http://doi.org/10.22067/jsw.v31i2.53350>.
16. Feiziasl V., Fotovat A., Astarai A., Lakzian A., and Mousavi Shalmani MA. 2014. Determination of soil and

- plant water balance and its critical stages for rainfed wheat using Crop Water Stress Index (CWSI). *Water and Soil* 28(4): 804-817. <http://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.29119>.
17. Feiziasl V., Jafarzadeh J., Sadeghzadeh B., and Mousavi Shalmani MA. 2022. Water deficit index to evaluate water stress status and drought tolerance of rainfed barley genotypes in cold semi-arid area of Iran. *Agricultural Water Management* 262: 107395. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107395>.
 18. Fischbeck G. 2002. Contribution of barley to agriculture: a brief overview, In: G. A. Slafer, et al. (Eds.), *Barley Science: Recent Advances from Molecular Biology to Agronomy of Yield and Quality*, Food Products Press, an imprint of The Haworth Press, Inc., pp. 1-14. pp. 1-14.
 19. Fitzgerald GJ., Rodriguez D., Christensen K., Belford R., Sadras VO., and Clarke TR. 2006. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precis. Agric* 7: 233-248. <https://doi.org/10.1007/s11119-006-9011-z>.
 20. Gardner BR., and Shock CC. 1989. Interpreting the crop water stress index. ASAE Paper No: 89-2642.
 21. Gol L., Tomé F., and Korff MV. 2017. Floral transitions in wheat and barley: interactions between photoperiod, abiotic stresses, and nutrient status. *Journal of experimental botany* 68(7): 1399-1410. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx055>.
 22. Gomes FP. 1985. *Curso de estatística experimental*. São Paulo: Nobel, 467p.
 23. Hakala K., Jauhiainen L., Himanen SJ., Rötter R., Salo T., and Kahiluoto, H., 2012. Sensitivity of barley varieties to weather in Finland. *Journal of Agricultural Science* 150: 145-160. <https://doi.org/10.1017/S0021859611000694>.
 24. Hlaváčová M., Klem K., Smutná P., Škarpa P., Hlavinka P., Novotná K., Rapantová B., and Trnka M. 2017. Effect of heat stress at anthesis on yield formation in winter wheat. *Plant, Soil and Environment* 63: 139-144. <https://doi.org/10.17221/73/2017-PSE>.
 25. Idso SB. 1982. Nonwater stress baselines: A key to measuring and interpreting water stress. *Agricultural Meteorology* 27: 59-70. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90020-6).
 26. Idso SB., Jackson RD., Pinter PJ., Reginato RJ., and Hatfield JL. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol* 24: 45-55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7).
 27. Irmak S., Istanbuloglu E., and Irmak A. 2008. An Evaluation of Evapotranspiration model complexity against performance in comparison with Bowen Ratio Energy Balance measurements. *Transactions of the ASABE* 51(4):1295-1310. <http://doi.org/10.13031/2013.25246>.
 28. Jackson RD., Idso SB., Reginato RJ., and Pinter PJ., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17: 1133-1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>.
 29. Klink K., Crawford CJ., Wiersma JJ., and Stuthman D.D. 2011. Climate variability and the productivity of barley and oats in Minnesota. *CURA Report* 41: 12-18.
 30. Lawlor DW., and Cornic C. 2002. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. *Plant, Cell and Environment* 25: 275-294. <http://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00814.x>.
 31. Liang S. 2004. Quantitative remote sensing of land surfaces. John Wilcy and Sons, Inc. <http://doi.org/10.1002/047172372X>.
 32. Mamnouie E., Ghazvini RF., Esfahany M., and Nakhoda B. 2006. The effects of water deficit on crop yield and the physiological characteristics of barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. *Journal of Agricultural Science and Technology* 8: 211-219.
 33. Mokhtari F., Esfarjani F., and Kargar Fard M. 2014. The effect of combined aerobic exercise and barley β -glucan on lipid profile and glucose blood of women with diabet type two. *Iranian Journal of Diabetes and Lipid Disorders (ijddl)* 13(4) :340-351
 34. Moran MS., Clarke TR., Inoue Y., and Vidal A., 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environment* 49: 246-263. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90020-5).
 35. Pipatsitee P., Eiumnoh A., Praseartkul P., Taota K., Kongpugdee S., Sakulleerungroj K., and Cha-um S. 2018. Application of infrared thermography to assess cassava physiology under water deficit condition. *Plant Production Science* 21(4): 398-406. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1530943>.
 36. Pradhan GP., Prasad PVV. 2015. Evaluation of wheat chromosome translocation lines for high temperature stress tolerance at grain filling stage. *PLoS One* 10: 1-20. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0116620>.
 37. Rizza F., Badeck FW., Cattivelli L., Lidestri O., Di Fonzo N., and Stanca AM. 2004. Use of a water stress index to identify barley genotypes adapted to rainfed and irrigated conditions. *Crop Science* 44: 2127-2137. <http://doi.org/10.2135/cropsci2004.2127>.
 38. Roostaei M., Feiziasl V., Eskandari I., and Jafarzadeh J. 2021. Technical guidelines for dryland wheat cultivation for Eastern Azarbaijan cold areas. *Agricultural Jihad Organization of Eastern Azarbaijan*. 25 p.
 39. Roy S., and Ophori D. 2014. Estimation of crop water stress index in almond orchards using thermal aerial imagery. *Journal of Spatial Hydrology* 12.
 40. Tavakoli AR. 2013. Effects of sowing date and limited irrigation on yield and yield components of five rainfed

- wheat varieties in Maragheh region. *Journal of Crop Production and Processing (JCPP)* 2(6): 87-97.
41. Tavakoli AR. 2012. Single irrigation and sowing date for rainfed barley in Maragheh region and estimation of production functions. *Journal of Agricultural Engineering Research* 13(2): 39-56. <http://doi.org/10.22092/JAER.2012.100271>.
42. Tilling K., Leary GJO., Ferwerda JG., Jones SD., Fitzgerald GJ., Rodriguez D., and Belford R. 2007. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. *Field Crops Reserch* 104: 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.023>.
43. Trnka M., Rötter RP., Ruiz-Ramos M., Kersebaum KCh, Olesen JE., Žalud Z., and Semenov MA. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4: 637–643. <https://doi.org/10.1038/nclimate2242>.
44. Tubaileh AS., Sammis TW., and Lugg D.G. 1986. Utilization of thermal infrared thermometry for detection of water stress in spring barley. *Agric. Water Manage* 42: 75–85. [https://doi.org/10.1016/0378-3774\(86\)90007-7](https://doi.org/10.1016/0378-3774(86)90007-7).
45. Umesh K., and Ferris H. 1994. Influence of temperature and host plant on the interaction between *pratylenchus neglectus* and *meloidogyne chitwoodi*. *Journal of Nematology* 26(1): 65-71. <http://doi.org/10.1007/s10661-011-2206-4>.
46. Williams GDV. 1974. A critical evaluation of a biophotothermal time scale for barley. *International Journal of Biometeorology* 18: 259–271. <https://doi.org/10.1007/BF01463714>.



Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate

E. Asrari^{1*}, H. Talebi²

Received: 04-05-2021

Revised: 11-11-2021

Accepted: 31-5-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Asrari E., and Talebi H. 2022. Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate. Journal of Water and Soil 36(2): 215-224. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.67423.1026](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.67423.1026)

Introduction

In the last few decades, due to process of shifting from traditional activities and based on manual activities to industrial ones, the need for using oil and coal and its derivatives has increased. Using these materials has caused some problems for environment as hydro carbon contamination. Soil is a major contributor to the various kinds of pollution, especially hydro carbon pollution. Due to the importance of soil in the life cycles and its vitally direct and indirect influence on all the organisms and human being, elimination of this pollutant is necessary. For this reason, some different methods have been developed. In this research, capability of soil washing by sodium dodecyl sulfate ionic detergent has been measured. In order to fulfill the existing necessity and solve this problem, a wide-ranging effort has been started from the past until now, which can be referred to the issue of washing contaminated soil as one of the issues raised. At the beginning of this technology, washing with pure water was considered and after a while, it was invalidated due to inefficiency in the tested cases. With advances in this emerging technology, the discussion of stronger solvents was explored, in which detergents became more attractive due to their lower potential toxicity and environmental degradability. Actually, the effect of major parameters on removing the hydrocarbons has been investigated and in this research has been afforded to purify polluted soil with creosote by considering actual conditions in industry.

Materials and Methods

The first sample has been taken from original soil of Razi industrial estate. It has coarse sandy loam texture with 31% clay, 11% silt and 57% of sand, pH equal 7, organic matter amount 2.3 % weight and density equal 1/8 gram per m³. Therefore, pure soil was extracted from 6 layers of soil to the depth of 0.5 m from Razi industrial area in Isfahan. Then, it was mixed by a concrete mixer specific to the block making. Afterwards, creosote was added evenly during stirring so the soil was contaminated deliberately. After storing in the laboratory for 3 weeks and homogeneity, the initial sample was chosen and its contamination was measured. This measurement was based on the amount of added oil to the certain volume of soil (about 30000 milligram in each kilogram). For avoiding error and having assurance from the amount of initial contamination, the sample was transferred to the laboratory and 25 gr of it was taken. Its hydrocarbon texture was extracted by solvent and its polar compositions were removed by passing on the silica gel absorbent. Then, a hydrocarbon was measured. The real pollutant amount of sample was 26776 milligram in each kilogram of soil. Secondary samples were chosen from basic sample, these chosen samples were washed under the different planned conditions. After finishing several complementary washing stages in different conditions, the soil samples remaining from washing were dried under different conditions. Then the amount of remained contamination in each sample was measured and recorded separately. At the next stage, the recorded results were analyzed. Stay time, temperature, pollutant concentration and washer concentration has been chosen as variable parameters.

1- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran

(*- Corresponding Author Email: e_asrari@pnu.ac.ir)

2- M.Sc, Department of Civil Engineering , Payame Noor University, Shiraz, Iran

Results and Discussion

According to the results, washing by pure water and temperature of 30°C would not be successful but by increasing temperature, the removing efficiency increased. Increasing temperature to 90°C increased the efficiency up to 18.5%. In addition, adding detergent to the environment increased the success of this method in reducing sample pollution. Increasing efficiency up to 4 g/L of detergent increased the efficiency up to 40% directly, but there was no significant change for increasing more than this amount. At this stage, the results showed that in the presence of detergent, increasing temperature caused to increase efficiency directly. The only difference was that increasing temperature (without detergent) increased efficiency directly, but in presence of detergent, increasing efficiency was significance up to 50% and after that it increased very slightly. The last studied parameter was time. These changes included increasing efficiency due to increasing time from 10 min to 20 min. Removing pollutant efficiency has been reduced by increasing time. Under all optimum conditions, in temperature of 90°C for 20 minutes and 4 g/L surfactant, Hydrocarbon removing efficiency was 61%. The economically optimum temperature is 50°C with regard to economical cases and the slight difference resulting from increase of temperature from 50 to 90°C.

Conclusion

Generally, the results revealed the suitability of ionic sodium dodecyl sulfate for cleaning soil under conditions of contamination. But 39 % of pollutant in polluted soil after washing by considering optimal conditions has been reminded. It must be mentioned that due to inefficiency of this amount of contamination reduction from contaminated soils for the discharge of these soils into the environment, this method can be introduced as a pollution reduction or a method for pretreatment of complementary methods.

Keywords: Contaminated soil, Creosote, Soil washing, Surfactant

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۲۴-۲۱۵

بررسی شست‌وشوی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات

الهام اسراری^{۱*} - حامد طالبی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

چکیده

از گذشته تا کنون جهت پاکسازی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها از روش‌های متفاوت استفاده گردیده است که هرکدام از این روش‌ها دارای محاسن و معایب خاص خود بوده و شامل قابلیت‌هایی ویژه می‌باشند. در این پژوهش قابلیت روش شست‌وشو با استفاده از شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات و همچنین شناسایی عوامل مؤثر بر راندمان آن جهت کاهش کل هیدروکربن‌های نفتی خاک آلوده به روغن قطران بررسی گردید. برای این امر خاک بکر از منطقه صنعتی شهرک رازی اصفهان تهیه و با استفاده از روغن قطران به صورت تعمودی آلوده گردید. زمان ماند، دما، غلظت شوینده و غلظت آلاینده به عنوان متغیرهای این مطالعه در نظر گرفته شدند. بررسی نشان داد خاک منطقه دارای بافت شنی رسی لومی بود. پس از زمان ماند ۲۱ روز، میزان آلودگی آن ۲۶۷۷۶ میلی گرم در هر کیلوگرم خاک اندازه‌گیری شد. با استفاده از پایلوت صنعتی خاک‌شویی در شرایط متفاوت انجام گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه‌های شسته شده نشان داد، استفاده از محیط شست‌وشوی دارای آب خالص و دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد از موفقیت‌چندانی برخوردار نمی‌باشد، ولی افزایش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد موجب افزایش راندمان ۱۸/۵ درصدی و همچنین افزودن میزان ۴ گرم بر لیتر ماده شست‌وشو دهنده موجب افزایش ۴۰ درصدی راندمان است. تغییرات زمان ماند هم بر راندمان حذف هیدروکربن تأثیر داشت. در کل بررسی نتایج، شرایط بهینه را دمای ۹۰ درجه، زمان ۲۰ دقیقه و میزان ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت با راندمان ۶۱ درصد مشخص نمود که این نتیجه حاکی از مناسب بودن روش جهت کاهش آلودگی این نوع از خاک می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خاک آلوده، روغن قطران، شست‌وشوی خاک، شوینده یونی

مقدمه

خاک یکی از منابع مهم و ارزشمند طبیعی است به گونه‌ای که ۹۵ درصد غذای انسان از خاک حاصل می‌شود و بدون داشتن خاک سالم حیات و زندگی بر روی زمین امکان‌پذیر نخواهد بود (Wang et al., 2018). خاک به عنوان پالاینده طبیعت نیز محسوب می‌شود و علاوه بر این که تأمین کننده مواد غذایی است، خاصیت تصفیه‌کنندگی نیز دارد. این خاصیت خاک در اثر خواص فیزیکی،

شیمیایی و زیستی آن حاصل می‌گردد (Park and Son, 2017). در چند دهه اخیر افزایش سریع جمعیت نیاز به تأمین منابع را روز به روز گسترده‌تر نموده است و گسترش مصرف این منابع و عدم مدیریت صحیح آن منجر به آلودگی بیشتر محیط‌زیست شده و بشر را با بحران زیست محیطی روبرو کرده است (Kile and Chiou, 1989). امروزه به دلیل استفاده زیاد از ترکیبات نفتی به عنوان منبع تأمین مواد اولیه و انرژی در سراسر جهان، بیش از دو میلیون تن نفت در سال استخراج می‌شود و آلودگی ناشی از این ترکیبات در سطح جهان بسیار گسترده شده است (Hedayati, 2010). نشت ترکیبات نفتی تحت تأثیر نیروهای موینگی و ثقلی منجر به حرکت آلودگی به صورت عمودی در خاک‌های غیراشباع شده و موجب پر شدن خلل و فرج خاک می‌گردد و در صورت زیاد بودن مقدار نشتی، فاز مایع به سطح آب زیرین رسیده و از آنجا به همراه آب‌های زیرزمینی حرکت کرده و به دلیل وزن مخصوص کمتر نسبت به آب در سطح آب شناور باقی

۱- دانشیار گروه فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: e_asrari@pnu.ac.ir)

۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران (مهندسی محیط زیست)، دانشگاه پیام نور، شیراز، ایران

شوینده‌ی ۸۰-۷۰ TWEEN80 درصد بود.

حسانی و همکاران (Hosnani et al., 2019) در تحقیقی با موضوع حذف نفت خام از یک خاک آلوده با استفاده از سورفکتانت سدیم دودسل سولفات به روش خارج از محل، نتایج نشان داد که بهترین حالت جهت حذف نفت خام در غلظت ۰/۵ در صد وزنی سورفکتانت، ۵ درصد نفت خام، زمان ۱۵ دقیقه، سرعت همزنی ۲۰۰ دور بر دقیقه و دمای ۴۵ درجه بدست آمد و کاهش ۹۶ درصدی آلاینده در این سطح مشاهده شد. در نتیجه‌گیری تحقیق بیان شد شست‌وشوی خاک آلوده با سورفکتانت‌ها روشی کارآمد و مناسب می‌باشد. دژپنده و همکاران (Deshpande et al., 1999) تحقیقی در مورد انتخاب شست‌وشودهنده برای افزایش عملکرد شست‌وشوی خاک انجام داده‌اند. در این تحقیق کارکرد شست‌وشودهنده‌های یونی و غیریونی برای خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌ها بررسی گردید و طی آن مشخص شد که انتخاب شست‌وشودهنده مناسب براساس شرایط خاک آلوده می‌باشد و بسته به ماهیت آلودگی تعیین می‌گردد. بهانداری و همکاران (Bhandari et al., 1999) مطالعاتی بر روی اثر شست‌وشوی خاک بر سطوح شن‌های آلوده به مواد هیدروکربنه انجام داده‌اند که طی آن مشخص گردید وجود اکسیدهای فلزی در بافت خاک آلوده باعث کاهش راندمان روش شست‌وشوی خاک می‌گردد.

اوروم و همکاران (Urum et al., 2004) تحقیقاتی بر روی راندمان شست‌وشوی خاک آلوده به نفت خام انجام داده‌اند که طبق نتایج حاصل شده مشخص گردید حالت بهینه‌ی شناسایی شده زمان ده دقیقه می‌باشد. در این تحقیق پارامتر دما بررسی گردید و دمای زیر ۵۰ درجه سانتی‌گراد راندمان‌های کمتر را نشان داد و دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با بازده بیش از هفتاد و نه درصد بهترین دما شناسایی گردید. در تحقیقاتی که توسط مولیگان و افتخاری (Mulligan and Eftekhari, 2003) جهت بررسی اثر شوینده‌ی آنیونی (شوینده‌ی JBR425) انجام پذیرفت در آلودگی اولیه‌ی 1000ppm کاهش میزان آلودگی تا میزان ۶۷ درصد گزارش گردید. تحقیقاتی که توسط کاترین و همکاران (Catherine et al., 2003) در بررسی اثر شوینده‌ها بر خاک‌های ماسه‌ای انجام پذیرفت در آزمون با شوینده‌ی آنیونی JBR425 در کاهش میزان آلودگی تا میزان ۶۷ درصد آلودگی اولیه، این آزمون موفقیت‌آمیز گزارش گردید. پس از تحقیقات اولیه، اوروم و همکاران (Urum et al., 2004) در تحقیقاتی تکمیلی در زمینه‌ی شست‌وشوی خاک انجام دادند که طی آن مشخص گردید خاک‌هایی که آلودگی کمتر و ذرات درشت‌تر دارا می‌باشند طی عملیات شست‌وشوی خاک بازده بهتری دارند. در تحقیقات انجام شده توسط یانگ و ژو سال ۲۰۰۶ در خصوص شست‌وشوی خاک آلوده به فنانترن با استفاده از روش شست‌وشوی خاک با بهره‌گیری از سورفکتانت‌های SDBS و TX100 با موفقیت در کاهش ۸۹ درصد از آلودگی خاک در بهینه‌ترین حالت، روش در

می‌ماند و این امر خود موجب گسترش شدیدتر آلودگی می‌شود (Melali and Afyoni, 2011). وجود طیف متفاوتی از ترکیبات شیمیایی در پیکره مواد نفتی، باعث می‌گردد این مواد دارای خاصیت تجزیه‌پذیری و پایداری متفاوتی باشند به طوری که ورود برخی از آنها به آب و خاک می‌تواند به صورت طولانی مدت موجب آلودگی گردد. به‌طور کلی تجمع هیدروکربن‌های نفتی در خاک می‌تواند اثرات مخربی بر محیط زیست و سلامت انسان داشته باشد. زیرا آلاینده‌های موجود در خاک می‌تواند وارد زنجیره غذایی شده و سلامت تمامی جانداران به ویژه انسان را با خطر جدی مواجه می‌سازد (Liu, 2018). بنابراین پاکسازی خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی امری ضروری محسوب می‌گردد (Lau et al., 2014). در جهت تحقق ضرورت موجود و حل این معضل از گذشته تا به حال تلاش گسترده‌ای آغاز گردیده است که به بحث شست‌وشوی خاک آلوده به عنوان یکی از موارد مطرح شده می‌توان اشاره کرد. در ابتدای آغاز به کار این تکنولوژی، شست‌وشو با آب خالص مورد توجه قرار گرفت و پس از گذشت زمان به علت عدم کارایی در موارد آزمون شده از حیث اعتبار ساقط گشت. با پیشرفت در این تکنولوژی نوظهور بحث حلال‌های قوی‌تر مورد بررسی قرار گرفت که در این بین، شست‌وشو دهنده‌ها به علت سمیت بالقوه کمتر و قابلیت تجزیه‌پذیری زیست‌محیطی از جذابیت بیشتری برخوردار گردید (Deshpande et al., 1999).

در خصوص مباحث تحقیقاتی در امر قابلیت روش خاک‌شویی با شرایط مختلف در کاهش آلاینده‌های نفتی از خاک مطالعات متعددی انجام پذیرفته است که در ذیل به موارد مرتبط آن اشاره می‌گردد. در تحقیق انجام شده توسط صالحیان سال ۱۳۸۷ با موضوع شست‌وشوی خاک آلوده به گازوئیل با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات بیشترین حذف، در غلظت‌های ۲۰۰۰۰ ppm، pH برابر ۱۱ و غلظت شوینده‌ی یک درصد و با میزان راندمان ۴۵ درصد گزارش گردید (Salehian., 2008). به منظور بررسی بازدهی روش شست‌وشوی خاک با استفاده از دو نوع سورفکتانت یونی سدیم دودسیل سولفات و سورفکتانت غیریونی X100 بر خاک آلوده به ترکیبات نفتی تحقیقی توسط عندلیب مقدم (Andalib Moghadam, 2008) انجام پذیرفت که نشان دهنده افزایش راندمان با استفاده از شوینده‌ها بود و افزایش زمان شست‌وشو به یک ساعت و تکرار شست‌وشو، ۵۳/۳ درصد حذف ترکیبات آلیفاتیک و ۷۵/۷ درصد حذف ترکیبات آروماتیک را افزایش داد. تحقیقی که توسط مهراسبی و همکاران (Mehrasbi et al., 2006) در بررسی کارایی شست‌وشودهنده‌ها در پالایش خاک آلوده به گازوئیل انجام پذیرفت نشان دهنده این موضوع بود که افزایش سرعت و زمان همزدگی، کارایی حذف گازوئیل را افزایش داد و تغییرات pH بدون تاثیر بود. همچنین این محققان گزارش نمودند که کاهش میزان آلودگی با شست‌وشودهنده‌ی BRIJ35، به میزان ۶۵-۶۰ درصد و برای

بررسی توان روش مذکور در پاکسازی خاک آلوده ایجاد شده، با نوآوری آلودگی خاک با روغن قطران و نزدیک نمودن شرایط حاکم برآزمون‌ها به شرایط واقعی و قابل ایجاد در صنعت گردید.

مواد و روش‌ها

مواد و تجهیزات مورد استفاده

جهت تهیه نمونه خاک اولیه از خاک بکر محدوده نزدیک شهرک صنعتی رازی اصفهان با بستر دارای بافت ترکیبی ریز و درشت دارای سنگریزه شامل جزء معدنی با بافت شنی رسی لومی با در صد ترکیب ۳۲ درصد رس، ۱۱ درصد سیلت، ۵۷ درصد شن و pH برابر ۷، میزان مواد آلی ۲٫۳ درصد وزنی با دانسیته ۱/۹۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب برداشت گردید.

به منظور شست‌وشوی خاک آلوده از شوینده آنیونی سدیم دودسیل سولفات شرکت مرک آلمان با وزن مولکولی ۲۸۸/۳۸ گرم بر مول، چگالی ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد و نقطه بحرانی میسلی^۱ ۰/۱۷۳-۰/۲۳ در صد بهره‌گیری شد. همچنین در این تحقیق از تتراکلرواتیلن شرکت جی. تی. بیکر آمریکا و آب مقطر شرکت زلاب ایران نیز استفاده گردید.

برای شست‌وشوی اولیه ظروف و تجهیزات آزمایشگاهی از محلول‌های رقیق (۰/۱ مولار) اسید هیدروکلریک استفاده شد و همچنین از دستگاه‌های آزمایشگاهی همچون دستگاه شیکر شرکت فن آزما مدل TN52E، سانتریفیوژ EBA200 شرکت هیتیچ و اینفراکال سنجشگر کل هیدروکربن‌های نفتی و کل روغن و گریس شرکت ویلکس انتر پریس نیز بهره‌برداری گردید.

روش انجام آزمون

نمونه اولیه خاک غیرآلوده از لایه‌های مختلف خاک تا عمق ۰/۵ متری در محوطه خاکی نزدیک شهرک صنعتی رازی اصفهان برداشته شد. جهت برداشت نمونه ابتدا تعداد ۶ نمونه خاک غیرآلوده از اعماق مختلف تا عمق ۰/۵ متری محل برداشت شد (در این مرحله به منظور پیشگیری از متأثر شدن نتایج در اثر حذف ذرات درشت از عملیات غربالگری خاک خودداری و به جهت عدم تغییر بافت خاک در اثر حرارت، از گذاردن نمونه خاک در کوره پرهیز گردید). ابتدا نمونه خاک برداشت شده به منظور اختلاط کامل در دستگاه همزن ملات خشک ساز کاملاً مخلوط و نمونه اصلی از آن توزین و برداشت گردید. نمونه

مورد رفع این نوع از آلودگی موفق معرفی گردید (Yang and Zho, 2006). در پژوهشی که توسط ژویی با همکاری ژو (Zhoe and Zhu, 2008) در خصوص شست‌وشوی خاک آلوده به فنانترن با استفاده از سورفکتانت‌های SDS و TX100 انجام گرفت راندمان حاصل شده میزان ۸۷/۵ در صد اعلام گردید و در مقایسه نتیجه حاصل شده با نتیجه پژوهش گذشته که در آن از سورفکتانت‌های SDBS و TX100 با سایر شرایط مشابه این پژوهش استفاده گردیده بود اختلاف راندمان به صورت توانایی بالاتر سورفکتانت SDBS معرفی شد. در تحقیقات پنگ و همکاران (Peng et al., 2011) که جهت بررسی فاکتورهای مؤثر در کارایی خاکشویی با شست‌وشودهنده‌ها انجام گرفت. با استفاده از دو نوع متفاوت از شوینده تکرار آزمون انجام شد و طی آن مشخص گردید زمان شست‌وشو و سرعت شست‌وشو از فاکتورهای مهم در حذف هیدروکربن‌های آروماتیک می‌باشد، در ضمن این تحقیق مشخص نمود بهترین سرعت همزنی ۲۵۰ دور در دقیقه و بهترین زمان ۳۰ دقیقه جهت شوینده TX100 و زمان ۶۰ دقیقه جهت TW80 می‌باشد. در تحقیقاتی که توسط داووزا و همکارانش سال ۲۰۱۱ انجام گرفت خاک با بافت رسی و سنگی دارای سه نوع متفاوت از آلودگی با مواد آلی با استفاده از شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات مورد شست‌وشو قرار گرفت که نتایج حاصل شده بیانگر تفاوت راندمان چشمگیری بود و در موفق ترین حالت، کاهش آلودگی تا میزان ۸۹ در صد مشاهده گردید (Daveza et al., 2011). در تحقیقی که به منظور بررسی استخراج هیدروکربن‌های آروماتیک از خاک با تکنولوژی شست‌وشوی خاک توسط لائو و همکارانش (Lau et al., 2014) انجام پذیرفت با بررسی‌های به عمل آمده جهت جایگزینی حلال‌های آلی در روش شست‌وشوی خاک، با کسب راندمان قابل قبول در اثر استفاده از شست‌وشو دهنده‌ها، این مواد به عنوان جایگزین معرفی گردیدند.

شست‌وشوی خاک بعنوان فن آوری احیای احتمالی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و سایر مواد شیمیایی آلی هیدروفیل ارائه شده است ولی موفقیت این روش تحت تأثیر عوامل مختلفی مانند سطح ذرات و ویژگی‌های معدنی خاک آلوده، نوع آلودگی و خواص محیط شست‌وشو می‌باشد (Bhandari et al., 2000). نظر به هدف لحاظ شده برای انجام این پژوهش مبنی بر استفاده صنعتی از روش خاکشویی با بهره‌گیری از شوینده سدیم دودسیل سولفات جهت پاکسازی خاک آلوده شده به روغن قطران در محدوده شهرک صنعتی رازی اصفهان و با توجه به تأثیر به سزای عوامل مختلف شامل شرایط محیط شست و شو، نوع و جنس خاک آلوده، نوع و میزان آلاینده در کسب نتایج حاصل شده از خاکشویی‌های انجام گرفته در قبل و پژوهش‌های گذشته، به منظور افزایش اطمینان به نتایج و قابلیت استناد جهت برنامه‌ریزی و صرف هزینه، طی مطالعه حاضر سعی بر

۱- CMC به غلظتی از ماده شوینده اطلاق می‌شود که تشکیل میسل‌ها آغاز گردیده و با افزایش میزان ماده شوینده مونومرها به میسل تبدیل می‌گردند از دیگر خصوصیات این نقطه می‌توان کمترین کشش سطحی برای شوینده را ذکر نمود.

حقیقی قابل ایجاد در صنعت و افزایش اطمینان از نتایج حاصل جهت پرهیز از غربالگری و حذف قطعات درشت دانه خاک که استفاده از دستگاه‌های آزمایشگاهی به علت توان محدود ایجاد می‌نمود اقدام به طراحی و ساخت دستگاه با توان بالا در مقیاس کوچک صنعتی گردید.

اندازه‌گیری میزان آلودگی نمونه‌ها

اندازه‌گیری میزان آلودگی در خاک آلوده شده مصنوعی و نمونه‌های شسته شده با روش استخراج آلودگی به کمک حلال و قرائت میزان آلودگی با دستگاه بر اساس استاندارد متدهای (EPA و ASTM D ۷۰۶۶) به شرح ذیل انجام پذیرفت.

در هر اندازه‌گیری میزان ۲۵ گرم نمونه از خاک آلوده جهت شناسایی میزان کل هیدروکربن‌های نفتی انتخاب و عملیات انحلال بافت هیدروکربنی آن به کمک حلال تتراکلرواتیلن و دستگاه شیکر انجام گردید. سپس عملیات استخراج فاز مایع با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ آزمایشگاهی تکمیل گشت. پس از جداسازی ترکیبات قطبی وارد شده به حلال با استفاده از سیلیکا ژل، میزان وجود هیدروکربن‌های نفتی با استفاده از دستگاه سنجشگر کل آلودگی قرائت گردید. عدد حاصل شده به علت جامد بودن نمونه و براساس منحنی کالیبراسیون اصلاح و برای هر نمونه ثبت گردید.

اصلی با استفاده از روغن قطران ذغال سنگ تهیه شده از بازمانده ته تانکرهای حمل روغن آلوده گردید. با توجه به معین و مشخص بودن مقدار ماده آلاینده که به ازای هر کیلوگرم خاک بکر اضافه شده بود میزان 3000 mg/Kg آلودگی نمونه به راحتی محاسبه گردید، اما چون مقدار کل هیدروکربن نفتی موجود در خاک آلوده مصنوعی ایجاد شده می‌توانست متاثر از عوامل مختلفی گردد، خاک آلوده به مدت زمان سه هفته به صورت ایزوله نگهداری گردید و پس از اطمینان از جذب طبیعی آلودگی در خاک و بعد از همزنی مجدد، میزان آلودگی خاک مذکور اندازه‌گیری و ثبت گردید. پس از آن نمونه‌های متعدد از خاک آلوده بدست آمده برداشت گردید و با بهره‌گیری از دستگاه همزن صنعتی که به صورت پایلوت طراحی و ساخته شد و با استفاده از ماده شوینده یونی سدیم دودسیل سولفات، تحت شرایط متفاوت محیط شست و شو شامل: ۱- زمان همزنی ۲۰ دقیقه و میزان ۰ ماده شوینده ثابت و دمای ۳۰، ۵۰، ۷۰، ۹۰ درجه سانتی‌گراد متغیر ۲- دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان همزنی ۲۰ دقیقه ثابت و میزان ۰، ۲، ۴، ۶ گرم بر لیتر ماده شوینده متغیر ۳- دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد و میزان ۴ گرم بر لیتر شوینده ثابت و زمان‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۸۰ دقیقه متغیر شست و شو گردید و میزان آلودگی باقی مانده اندازه‌گیری و ثبت شد. با مقایسه نتایج پیشرفت مراحل، بهینه ترین فاکتورهای حاکم بر محیط شست‌وشو شناسایی گردید.

ساخت دستگاه پایلوت

به منظور نزدیک‌تر نمودن هر چه بیشتر شرایط آزمون‌ها به شرایط



شکل ۱- نمایی از پایلوت ساخته شده برای فرآیند خاکشویی

Figure 1- View of the pilot model prepared for the leaching process

نتایج و بحث

نتیجه آنالیز نمونه آلوده شده اولیه

در اندازه‌گیری آلودگی مصنوعی ایجاد شده در نمونه خاک بکر آلوده شده توسط روغن قطران علی‌رغم انتظار (بر اساس میزان مخلوط شده روغن و خاک انتظار عدد 30000 mg/Kg می‌رفت) میزان آلودگی برابر با 26776 mg/kg ثبت گردید.

بررسی تاثیر تغییرات دما بر حذف آلودگی خاک

افزایش دما در محیط شست‌وشو حاوی آب خالص (غلظت ۰ گرم بر لیتر ماده شوینده) از دمای ۳۰ به ۹۰ درجه سانتی‌گراد با کاهش همواره بیشتر آلودگی خاک همراه بود که علت این امر را می‌توان افزایش دما و به واسطه آن افزایش جنبش مولکولی و کاهش چسبندگی ماده آلاینده به ذرات خاک بیان نمود زیرا براساس تئوری سنتتیک مولکولی زمانی که دمای سیستم افزایش می‌یابد حرکت مولکول‌ها بیشتر دچار تغییر شده و ارتعاشات مولکولی رخ می‌دهد (شکل ۲). در کل این ارتعاشات شامل کلیه مولکول‌ها شده و حتی بر پیوندها و اتصالات بین مولکول‌ها نیز اعمال می‌گردد. این امر منجر به کاهش گرانروی و همچنین کاهش نیروی چسبندگی آلاینده به ذرات خاک گردیده و منجر به افزایش کنده شدن آلاینده در مقابل نیروهای اعمال شده از طرف محیط شست‌وشو می‌گردد (Sherwood, 1972).

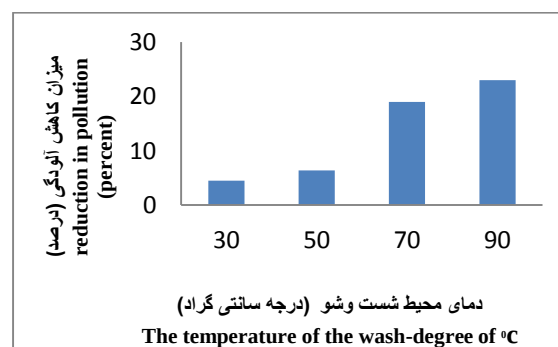
بررسی تاثیر غلظت سورفکتانت بر حذف آلودگی از خاک

در شست‌وشوی خاک آلوده مصنوعی با دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و زمان همزنی ۲۰ دقیقه به صورت ثابت و با متغیر افزایشی قرار دادن

میزان ماده شوینده همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد نتایج همواره مثبت حاصل نگردید. به طوری که با بالا بردن سطح ماده شوینده تا میزان ۴ گرم بر لیتر افزایش راندمان تا ۴۰ درصد حاصل شد و پس از افزایش میزان ماده شوینده به ۶ گرم بر لیتر کاهش راندمان تا میزان ۳۸ درصد ثبت گردید. البته افزایش ناگهانی راندمان حذف به میزان چهل درصد در غلظت ۴ گرم در لیتر ماده شوینده را می‌توان مستقیماً حاصل افزایش میزان سورفکتانت تا رسیدن به میزان بحرانی میسلی و در نتیجه افزایش تبدیل منومرها و تشکیل میسل‌ها دانست و کاهش جزئی راندمان در غلظت ۶ گرم بر لیتر محلول شوینده را می‌توان حاصل از برآیند عوامل قابل‌شهود چون کف کردن زیاد محیط و عدم جدا شدن کامل آب حاوی آلودگی از باقی مانده خاک شسته‌شده و ماندن قسمتی از آلاینده جدا شده در بافت خاک پس از خشک شدن کامل دانست. ولی موثرتر از موارد مذکور این است که افزایش میزان ماده شوینده به میزان بالاتر از حد بحرانی میسلی باعث گردیده که پس از جدا گشتن ماده آلاینده از خاک مجدداً در اثر افزایش آبگریزی، آلاینده مجدداً جذب خاک گردد (Chalkesh Amiri, 2008; Khosravi, Daveza et al., 2011; 2007).

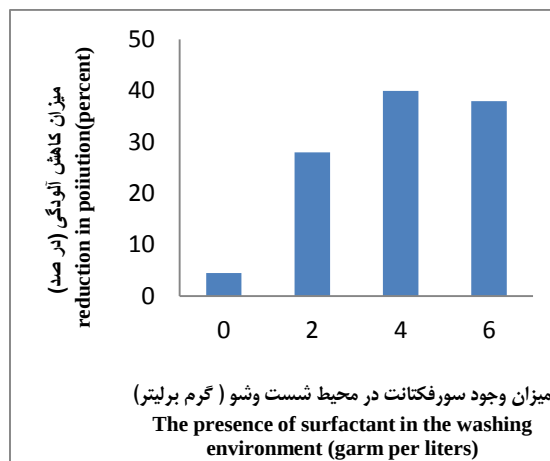
بررسی اثر توانان افزایش دمای محیط شست‌وشو با غلظت ۴ گرم بر لیتر شوینده بر حذف آلودگی از خاک

با افزایش دمای محیط شست‌وشو در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت، راندمان کاهش آلاینده در آزمون شست‌وشوی خاک افزایش یافت که این افزایش راندمان در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد به بهترین و بیشترین حالت خود رسید.



شکل ۲- تأثیر دما بر بازده شست‌وشوی خاک بدون حضور شست‌وشو دهنده

Figure 2- Effect of temperature on soil washing efficiency without the presence of detergent

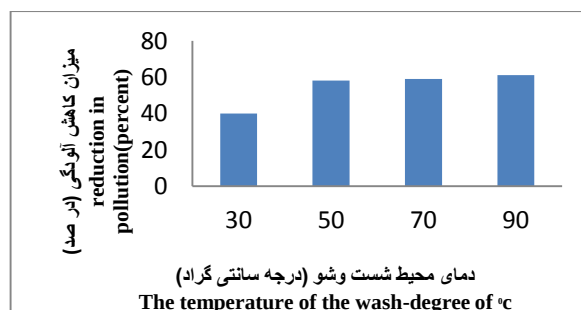


شکل ۳- اثر غلظت ماده شوینده بر راندمان شست و شو

Figure 3- Effect of the concentration of the detergent concentration on the efficiency

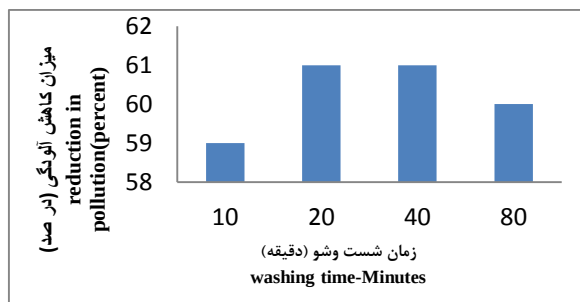
با توجه به این که نتایج افزایش راندمان ملموس تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و پس از آن به شکل جزئی افزایش را نشان داد علت این افزایش راندمان قابل توجه تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد را می توان افزایش جنیش مولکولی، کاهش چسبندگی آلاینده به خاک و تشکیل میسل ها در محیط شست و شو بیان کرد. لازم به ذکر است که افزایش دما در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت میزان کف ایجاد شده بر روی محیط را کاهش داد که این رویداد را می توان مزید بر علت در افزایش راندمان دانست و علت آن را نیز صرفاً می توان حاصل از افزایش غلظت بحرانی میسلی سورفکتانت دانست. با ادامه افزایش مجدد دما اگرچه راندمان افزایشی ادامه یافت ولی تغییرات چشمگیری مشاهده نگردید که دلیل آن را می توان این گونه بیان نمود که اگر چه افزایش دما از طرفی بر اساس رفتار پیش بینی شده، تاثیرات مثبت در امر تسهیل شست و شوی خاک آلوده را مانند تبخیر هیدرکربن های فرار و کاهش پیوستگی ملکول های ماده آلاینده با خاک را انجام داده است ولی از طرفی تاثیرات خاص خود در راستای کاهش راندمان را هم، مانند افزایش غلظت بحرانی میسلی، تبخیر محیط شست و شو را نیز اعمال نموده است. از این رو در برابند کلیه عوامل، افزایش دما باعث دسترسی به راندمان بالاتر نگردید (Daveza et al., 2011).

با توجه به این که نتایج افزایش راندمان ملموس تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد و پس از آن به شکل جزئی افزایش را نشان داد علت این افزایش راندمان قابل توجه تا دمای ۵۰ درجه سانتی گراد را می توان افزایش جنیش مولکولی، کاهش چسبندگی آلاینده به خاک و تشکیل میسل ها در محیط شست و شو بیان کرد. لازم به ذکر است که افزایش دما در غلظت ۴ گرم بر لیتر سورفکتانت میزان کف ایجاد شده بر روی محیط را کاهش داد که این رویداد را می توان مزید بر علت در افزایش راندمان دانست و علت آن را نیز صرفاً می توان حاصل از افزایش غلظت بحرانی میسلی سورفکتانت دانست. با ادامه افزایش مجدد دما اگرچه راندمان افزایشی ادامه یافت ولی تغییرات چشمگیری مشاهده نگردید که دلیل آن را می توان این گونه بیان نمود که اگر چه افزایش دما از طرفی بر اساس رفتار پیش بینی شده، تاثیرات مثبت در امر تسهیل شست و شوی خاک آلوده را مانند تبخیر هیدرکربن های فرار و کاهش پیوستگی ملکول های ماده آلاینده با خاک را انجام داده است ولی از طرفی تاثیرات خاص خود در راستای کاهش راندمان را هم، مانند افزایش غلظت بحرانی میسلی، تبخیر محیط شست و شو را نیز اعمال نموده است. از این رو در برابند کلیه عوامل، افزایش دما باعث دسترسی به راندمان بالاتر نگردید (Daveza et al., 2011).



شکل ۴- اثر دماهای مختلف در غلظت ۴ گرم بر لیتر ماده شوینده بر راندمان شست و شو

Figure 4- Effect of different temperatures at concentration of 4 g/l species of detergent on the efficiency



شکل ۵- اثر تغییر زمان بر راندمان شست‌وشوی خاک آلوده

Figure 5- Effect of changing time on washing efficiency of contaminated soil

شست و شو به صورت همواره و مستقیم باعث افزایش راندمان کاهش میزان آلودگی نگردید و تا نقطه بهینه خاصی این روند افزایشی سریع، حاکم بر راندمان می بود. در مورد فاکتور مدت زمان همزنی، صرفاً افزایش تا زمان خاص نشان دهنده افزایش راندمان موفقیت بود و پس از آن افزایش زمان باعث ایجاد روند معکوس در نتایج حاصله گردید. در کل راندمان کاهش آلودگی بدست آمده برای شست‌وشوی نمونه خاک آلوده مصنوعی با میزان آلودگی ۲۶۷۷۶ میلی گرم در کیلوگرم در نهایت و در شرایط بهینه، برابر با ۶۱ درصد ثبت گردید که مبین قدرت روش شست‌وشوی خاک با استفاده از همزن صنعتی و شوینده سدیم دودسیل سولفات جهت کاهش این نوع از آلودگی در خاک منطقه مورد نظر بود. پس بنابر اعداد حاصل شده از این پژوهش می‌توان روش خاک شویی با استفاده از شوینده سدیم دودسیل سولفات را به عنوان فرایند بهبود دهنده جهت کاهش آلودگی این نوع از آلاینده در این جنس و ترکیب از خاک معرفی نمود. ولی با توجه به باقی ماندن میزان ۳۹ درصد از ماده آلاینده در خاک آلوده پس از اعمال تیمار شست‌وشو با پارامترهای بهینه و عدم حذف کامل ماده آلاینده نمی‌توان روش را موفق در پاکسازی خاک آلوده دانست و تنها می‌توان بیان نمود که فرایند مذکور می‌تواند به عنوان روشی کارآمد جهت پیش تصفیه در فرایندهای تکمیلی مورد استفاده قرار گیرد.

به این ترتیب که افزایش جذب شوینده توسط خاک، تشدید خاصیت آبگریزی خاک را به همراه داشته و این امر باعث می‌گردد مواد آلاینده جدا شده مجدداً جذب خاک شود و به تبع آن، مواد فعال در دسترس محیط شست‌وشو نیز کاهش یافته و در کنده شدن هیدروکربن از بافت خاک و جداسازی آن نیز از خاک آلوده تأثیر منفی گذارد و در کل کاهش راندمان را سبب گردد (Urum et al., 2003; Hosnani et al., 2019). با توجه به نتایج زمان بهینه شست‌وشوی خاک آلوده برابر با ۲۰ دقیقه شناسایی گردید (شکل ۵).

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از شوینده و افزایش دما تأثیر بسزایی در موفقیت روش داشته است و فاکتور زمان شست‌وشو نیز در بازه آزمون شده بی‌تأثیر نبوده است ولی نکته قابل توجه و مشترک در کلیه مولفه‌های موثر این بود که افزایش میزان این پارامترها تا نقطه خاصی به صورت مستقیم و یکنواخت منجر به افزایش راندمان حذف آلاینده گردید و پس از آن حتی نتایج عکس نیز مشاهده گردید.

درخصوص مولفه میزان استفاده از ماده شوینده با افزایش میزان ماده شوینده پس از نقطه بهینه نتایج عکس (کاهش راندمان در حذف آلاینده) مشاهده گردید و درخصوص عامل موثر دوم یعنی دمای محیط شست‌وشو، نتایج حاکی از این بود که افزایش دمای محیط

منابع

- Andalib Moghadam H. 2008. Study of the efficiency of the thumb method soil washing to clean oil contaminated soil. Amir kabir rasbi university, Tehran. (In Persian with English abstract)
- Bhandari A., Novak J., and Dove D. 1999. effect of soil washing on petroleum hydrocarbons distribution on sand surfaces. Journal of Hazardous Substance Research 2: 1-7. <https://doi.org/10.4148/1090-7025.1017>.
- Catherine N., Mulligan C., and Eftekhari F. 2003. Remediation with surfactant foam of PCP- contaminated soil. Engineering Geology, 70:269-279. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00095-4).
- Chalkesh Amiri M. 2008. Surface active materials. Arkan danesh publications, Tehran. (In Persian)
- Deshpande S., Shiao B., Wade D., Sabatini D and Harwell J. 1999. Surfactant selection for enhancing ex situ soil washing. Water Reserch 33(2): 351-360. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00234-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00234-6).
- Daveza M., Fabari D., Prevot A.B., and Pramauro E. 2011. Removal of alkyphenols from polluted sites using and

- photocatalysis. *Environmental Science and Pollution Research* 8: 783-789. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0427-7>.
- 7- Hedayati M. 2010. Effectiveness of leaching method for cleaning soils contaminated with petroleum hydrocarbons with emphasis on BTEX compounds. environment university, Tehran. (In Persian with English abstract)
- 8- Hosnani M., Amani H., and Sarmasti M. 2019. Removal of crude oil from a contaminated soil using offsite SDS surfactant. *Journal of Environmental Science and Technology* 21(3): 37-46. (In Persian with English abstract) https://jest.srbiau.ac.ir/article_14541/10.22034/JEST.2019.14541.
- 9- Kile D.E., Chiou C.T. 1989. Water solubility enhancement of DDT and trichlorobenzene by some surfactants below and above the critical micelle concentration. *Environmental Science Technology* 23(7): 832-838. <https://doi.org/10.1021/es00065a012>.
- 10- Khosravi M. 2007. Petroleum chemistry. university of Tehran, Tehran. (In Persian)
- 11- Lau E., Gan S., Kiat H., and Poh P. 2014. Extraction agents for the removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from soil in soil washing technologies. *Environmental Pollution* 184: 640-649. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.09.010>.
- 12- Liu J. 2018. Soil remediation using soil washing followed by ozone oxidation. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 65: 31-34. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.05.001>.
- 13- Mulligan C., and Eftekhari F. 2003. Remediation with surfactant foam of PCP contaminated soil. *Engineering Geology* 70(3-4): 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(03\)00095-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(03)00095-4).
- 14- Mehrasbi M., Shareat M., Haghighi B., and Ranjbar D. 2006. Biological cleaning of soils contaminated with ethyl gasoline. telogen and naphthalene, *Scientific Journal of Zanjan University of Medical Sciences* 14(54): 17-23. (In Persian with English abstract). <https://ijhe.tums.ac.ir/article-1-5190-fa.html>.
- 15- Melali A., Abasi M., Afyoni M., and Khosh Gofar A. 2011. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon in isfahan refinery wastewater sludge. *Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources* 15(56): 155-167. (In Persian with English abstract). <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-1715-fa.html>.
- 16- Peng S., Wu W., and Chen J. 2011. Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness. *Chemosphere* 82(8): 1173-1177. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.11.076>.
- 17- Park B., and Son Y. 2017. Ultrasonic and mechanical soil washing processes for the removal of heavy metals from soils. *Ultrasonic Sonochemistry* 35: 640-625. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.02.002>.
- 18- Sherwood P.M.A. 1972. Vibrational spectroscopy of solids. university of Newcastle upon tyne, Newcastle.
- 19- Salehian A. 2008. Cleaning of diesel contaminated soils with the help of detergents. Tarbiat Modares University, Tehran. (In Persian with English abstract)
- 20- Shah S., Jamroz N., and Sharif Q. 2011. Micellization parameters and electrostatic interactions in micellar solution of sodium dodecyl sulfate at different temperatures. *Physicochemical and Engineering Aspects* 178: 199-206. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(00\)00697-X](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(00)00697-X).
- 21- Urum K., Pekdemir Y., and Copur M. 2003. Optimum conditions for washing of crude oil contaminated soil with biosurfactants solutions. *Process Safety and Environmental Protection* 81(3): 203-209. <https://doi.org/10.1205/095758203765639906>.
- 22- Urum K., Pekdemir T., and Copur M. 2004. Surfactants treatment of crude oil contaminated soils. *Journal of Colloid and Interface Science* 276: 456-464. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.03.057>.
- 23- Wang G., Zhang S., and Vigver M.G. 2018. Effect of soil washing with biodegradable chelators on the toxicity of residual metals and soil biological properties. *Science of the Total Environment* 625: 1021-1029. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.019>.
- 24- Yang K., and Zho L. 2006. Enhanced soil washing of phenanthrene by mixed solution of TX100 and SDBS. *Environmental Science Technology* 40(13): 4274-4280. <https://doi.org/10.1021/es060122c>.
- 25- Zhoe W., and Zhu B. 2008. Enhanced soil flushing of phenanthrene by anionic-nonionic mixed surfactants. *Water Research* 42(2): 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.7.021>.



Assessment of Triple Super Phosphate Fertilizer and Irrigation Salinity Effects on Soil Cadmium Mobility and Absorption

A. Moslehi^{1*}, M. Feizian²

Received: 16-08-2021
Revised: 29-08-2021
Accepted: 16-04-2022
Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Moslehi A., and Feizian M. 2022. Assessment of Triple Super Phosphate Fertilizer and Irrigation Salinity Effects on Soil Cadmium Mobility and Absorption. Journal of Water and Soil 36(2): 225-236. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.71557.1071](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.71557.1071)

Introduction

Cadmium (Cd) mobility in soil is affected by various factors and its absorption from soil by tobacco is higher than other crops. Application of phosphate fertilizers in agricultural lands is an essential step to increase the yield of tobacco plants. Since most phosphate fertilizers contain small amounts of Cd, the uptake of Cd by tobacco plant in its cultivated areas due to the application of triple superphosphate fertilizer (TSP) is not unexpected. In many tobacco growing areas, the water or soil used is between low and medium salinity in terms of salinity, which can also influence the solubility of cadmium and, consequently, its uptake by tobacco plant. Cadmium can be absorbed through food, drink and respiration. This metal not only is absorbed by the digestive organs, but also is absorbed by the respiratory organs through airborne particles and cigarette smoke. Tobacco is resistant to high concentrations of Cd in soil and can absorb it from Cd-contaminated soil. The aim of this study is to investigate the effect of P fertilizer and salinity on Cd mobility in soil and tobacco plant.

Materials and Methods

This experiment was conducted with the aim of investigating the interaction of three factors of irrigation salinity (0, 20 and 40 mM NaCl), triple super phosphate fertilizer (TSP) (0 and 1.5 g kg⁻¹ soil) and soil Cd contamination level (0 and 12 mg kg⁻¹ soil) in a completely randomized design with four replications on shoot Cd concentration, smoke Cd concentration, extraction percentage of DTPA, tobacco ash Cd concentration, Cd mobility factor and Cd fractions in soil. To homogenize the samples, they were thoroughly mixed together and the resulting composite samples were passed through a 2 mm sieve to incubate the samples and then implant. Cadmium contamination levels (0 and 12 mg kg⁻¹) were prepared from Cd(NO₃)₂.4H₂O source. Prior to planting, the relevant levels of contamination were added by spraying on the entire soil surface and mixed thoroughly. Soil samples were transferred to plastic storage containers and incubated for four months in a controlled greenhouse within a temperature range of 25-30 °C and 70% water holding capacity of the soil measured by the weighing method. Cultivation was carried out under controlled conditions in a greenhouse environment located in Bardaskan city. Two 60-day-old tobacco seedlings (*Nicotiana tabacum* L.) of Cocker 347 cultivar, which were previously seeded in non-contaminated cadmium soil and grown with non-saline water, were transferred to each pot and planted. The cultivar used in this experiment was a greenhouse tobacco cultivar used in the cigarette industry. Immediately after transferring the seedlings to pots, irrigation was performed with saline-free water (distilled water), salinity of 20 or 40 mM NaCl salt for 75 days according to the required treatment. Up to the fourth week, the amount of 400 ml per pot in each irrigation cycle, and after that until the end of the experiment, the amount of 800 ml per pot in each irrigation cycle was applied.

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

(* - Corresponding Author Email: moslehi2012@gmail.com)

Results and Discussion

The results showed that Cd mobility factor in Cd-contaminated soil increased on average by 25.6%, 32.4% and 36.2% compared to non-contaminated soil at 0, 20 and 40 mM salinity, respectively. Application of phosphate fertilizer significantly reduced the mobility factor of cadmium in non-cadmium-contaminated soils. In Cd-contaminated soil, the extraction percentage of DTPA increased 26.5% and 56.4% with increasing irrigation salinity levels from 0-20 and 0-40, respectively. In non-Cd contaminated soil, TSP application reduced extraction percentage of DTPA 20.2%, 28.4% and 24.6% in 0, 20 and 40 irrigation salinity levels, respectively in compared to non-TSP application. With increasing the levels of soil Cd contamination, the percentage Cd concentration in oxide fraction of soil decreased and the percentage of Cd concentration in carbonate, organic and residual fractions increased. Application of TSP increased the concentration of residual Cd fraction in the soil.

Conclusion

With increasing the level of Cd contamination in soil, the percentage of Cd in carbonate and organic fractions increased compared to non-Cd contaminated soil. The results showed that TSP application in Cd contaminated soil in salinity levels of 0, 20, and 40 mM increased Cd concentration of tobacco ash by 1.47%, 15.89% and 29.80% and increased Cd concentration of tobacco smoke by 23.20%, 23.30% and 18%, respectively. Salinity factor and phosphate fertilizer showed the reverse effect on soluble + exchangeable cadmium and DTPA available Cd in soil, so with increasing salinity, these concentrations increased and with increasing triple superphosphate fertilizer decreased.

Keywords: Cadmium mobility index, Cd concentration of tobacco cigarette smoke, Different cadmium fractions in soil, Extraction percentage of DTPA

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۲۵-۲۳۶

بررسی اثر کود سوپرفسفات تریپل و شوری آب آبیاری بر تحرک و جذب کادمیم خاک

امیر مصلحی^{۱*} - محمد فیضیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۷

چکیده

تحرک کادمیم در خاک تحت تاثیر عوامل مختلفی است و جذب آن توسط توتون بیشتر از سایر گیاهان زراعی است. این آزمایش با هدف بررسی برهمکنش سه عامل شوری آب آبیاری (صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی مولار NaCl)، کود سوپر فسفات تریپل (صفر و ۱/۵ گرم بر کیلوگرم خاک) و آلودگی کادمیم خاک (صفر و ۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم خاک) به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار بر غلظت کادمیم بخش هوایی، غلظت کادمیم دود توتون، درصد استخراج DTPA، غلظت کادمیم خاکستر توتون، فاکتور تحرک کادمیم و درصد توزیع شکل های شیمیایی کادمیم خاک، انجام شد. نتایج نشان داد که فاکتور تحرک کادمیم در خاک آلوده شده به کادمیم نسبت به خاک غیر آلوده در شوری صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی مولار به طور میانگین و به ترتیب ۲۵/۶، ۳۲/۴ و ۳۶/۲ درصد افزایش نشان داد. کاربرد کود فسفات، سبب کاهش معنی دار فاکتور تحرک کادمیم در خاک های غیر آلوده به کادمیم شد. در خاک های آلوده به کادمیم، درصد استخراج DTPA با افزایش سطوح شوری آب آبیاری از صفر به ۲۰ و ۴۰ میلی مولار به ترتیب به مقدار ۲۶/۵ و ۵۶/۴ درصد افزایش نشان داد. در خاک های غیر آلوده به کادمیم، کاربرد کود سوپر فسفات تریپل در شوری های صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی مولار آب آبیاری به ترتیب سبب کاهش درصد استخراج DTPA به میزان ۲۰/۲، ۲۸/۴ و ۲۴/۶ درصد نسبت به عدم کاربرد کود شد. با افزایش سطوح آلودگی کادمیم خاک، درصد غلظت کادمیم بخش های اکسیدی خاک کاهش و درصد غلظت کادمیم بخش کربناتی، آلی و باقی مانده افزایش نشان داد. کاربرد کود فسفات سبب افزایش غلظت کادمیم باقی مانده خاک شد. با افزایش سطوح آلودگی کادمیم خاک، درصد کادمیم بخش کربناتی و ماده آلی خاک نسبت به خاک غیر آلوده به کادمیم افزایش معنی داری نشان داد. نتایج هم چنین نشان داد که کاربرد کود سوپر فسفات تریپل در خاک آلوده به کادمیم و در شوری صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی مولار به ترتیب سبب افزایش غلظت کادمیم خاکستر توتون به مقدار ۱/۴۷، ۱۵/۸۹ و ۲۹/۸۰ درصد و غلظت کادمیم دود توتون به میزان ۲۳/۲، ۲۳/۳ و ۱۸ درصد گردید. عامل شوری و کود فسفات روند معکوسی بر کادمیم بخش محلول +تبادلی و کادمیم فراهم با DTPA خاک داشتند به طوری که با افزایش شوری، این غلظت ها افزایش و با افزایش کود سوپر فسفات تریپل، کاهش نشان داد.

واژه های کلیدی: درصد استخراج DTPA، شکل های مختلف کادمیم خاک، فاکتور تحرک کادمیم، کادمیم دود سیگار توتون

مقدمه

تنفس به طور متوسط ۱۰ برابر مقدار جذب کادمیم از طریق بلع غذا و آشامیدن آب آلوده بود (WHO, 2010؛ UNEP, 2010). کاربرد کودهای فسفات، سبب آلودگی زمین های کشاورزی به کادمیم شد (UNEP, 2010). کادمیم ممکن است جذب سطحی ذرات رس، مواد آلی و هیدروکسیدهای آهن و منگنز شده و یا به شکل کربنات کادمیم رسوب کند (UNEP, 2010). فرایندهای مختلفی در خاک رفتار کادمیم در فازهای جامد و محلول خاک و جذب آن توسط گیاه را تحت تاثیر قرار می دهد که از آن جمله می توان به جذب، واجذبی،

آلودگی خاک به کادمیم و ورود آن به بدن انسان، از طریق زنجیره غذایی و استعمال دخانیات سبب مشکلات بسیاری برای سلامتی انسان ها گردید. مقادیر بالای کادمیم در بدن انسان سبب بسیاری از بیماری ها از جمله فشار خون بالا، تغییر شکل استخوان ها و صدمه شدید به کلیه و ریه ها شد (Satarug et al., 2010)؛ (Thevenod and Lee, 2013). جذب کادمیم دود توتون از طریق

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

(Email: moslehi2012@gmail.com)

(*)- نویسنده مسئول

رسوب، حل شدن، تشکیل کمپلکس و پیوند با کادمیم در خاک اشاره نمود (Christensen and Haug, 1999). در بسیاری از خاک‌های کشاورزی کادمیم بیشتر در فاز جامد حضور دارد و فقط مقدار بسیار اندکی در فاز محلول خاک وجود دارد که به نظر می‌رسد همین مقدار اندک، قابل جذب برای گیاه باشد (Christensen and Haug, 1999). کادمیم موجود در محلول خاک به سرعت جذب گیاهان می‌شود و لذا افزایش غلظت کادمیم محلول خاک سبب افزایش جذب کادمیم توسط گیاهان و ورود این عنصر به زنجیره غذایی شده و می‌تواند خطرات جدی برای سلامتی انسان‌ها به وجود آورد (Wagner, 1993). شوری سبب تحرک بیشتر کادمیم در رسوبات رودخانه‌ای و خاک می‌شود (Acosta et al., 2011; Zhao et al., 2013). یون کلر ناشی از شوری سبب تشکیل پیوند پایدار با کادمیم شد و این ترکیب کلر با کادمیم توانست از سطوح ذرات خاک واجذب شده و تحرک کادمیم در خاک افزایش یافت (Norvell et al., 2000; Usman et al., 2005). اعمال کود فسفات سبب افزایش مقدار کادمیم کل و مقدار کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA نسبت به شاهد و تیمارهایی که مقدار کم کود فسفات دریاقت کرده بود، شد (Singh et al., 1988; Semu and Singh, 1996). کود دهی فسفات می‌تواند بر تحرک و مقدار جذب کادمیم توسط گیاه و هم چنین بر توزیع کادمیم در بخش‌های مختلف خاک و مقدار کادمیم خاک تاثیرگذار باشد و بسته به نوع خاک اثرات متفاوتی بر جذب یا واجذب کادمیم در خاک داشت (Wangstrand et al., 2007). بررسی تحرک کادمیم و توزیع شکل‌های مختلف کادمیم خاک، غلظت کادمیم دود توتون و درصد استخراج DTPA تحت تاثیر سه عامل کوددهی سوپرفسفات تریپل، آلودگی کادمیم خاک و تنش شوری آب آبیاری از اهداف این آزمایش بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری خاک به روش زیگزاگی از عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری از زمین کشاورزی آیش واقع در شهرستان بردسکن (خراسان رضوی) با اقلیم خشک و نیمه خشک و میانگین بارندگی ۱۵۰ میلی‌متر و طول جغرافیایی ۵۷/۸۱ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۴۱ درجه شمالی انجام شد. خاک نمونه‌برداری شده دارای بافت لوم شنی، غیر شور، pH برابر با ۷/۴، دارای رژیم رطوبتی اریدیک و رژیم حرارتی ترمیک بود. برای همگن نمودن نمونه‌ها، آنها را کامل با یکدیگر مخلوط و از نمونه مرکب حاصله، پس از عبور از الک دو میلی‌متری جهت خواباندن نمونه‌ها و سپس کاشت استفاده شد. از منبع $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ سطوح مربوط به آلودگی کادمیم (۰ و ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تهیه شد. قبل از کاشت از طریق مه‌پاشی بر تمام سطح خاک و زیر و رو کردن خاک، سطوح مربوطه آلودگی اضافه شد.

نمونه‌های خاک به ظروف نگهداری پلاستیکی منتقل و به مدت چهار ماه در فضای کنترل شده گلخانه در دما ۲۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد و ۷۰ درصد ظرفیت نگهداری آب در خاک با استفاده از روش توزین، خوابانیده شد. کشت تحت شرایط کنترل شده در محیط گلخانه واقع در شهرستان بردسکن انجام شد. بدین نحو که گلدان‌هایی با ارتفاع ۲۸ و اندازه دهانه ۶۵ × ۲۵ سانتی‌متر با نمونه‌های ۱۰ کیلوگرمی که قبلاً خوابانیده شده بودند، پر شد. قبل از کاشت، به منظور تامین عناصر نیتروژن مقدار ۲/۲۸ گرم کود سولفات آمونیوم $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ بر هر کیلوگرم خاک گلدان و برای تامین پتاسیم مقدار دو گرم بر هر کیلوگرم خاک گلدان از منبع نترات پتاسیم (KNO_3) که فاقد آلودگی عنصر کادمیم و فسفر بودند، بر اساس مقدار نیاز گیاه به عناصر ذکر شده به گلدان‌ها اعمال شد. کود سوپر فسفات تریپل قبل از کاشت، به مقدار ۱/۵ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک گلدان فقط به تیمارهای مورد نظر اعمال شد. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب کاملاً تصادفی با چهار تکرار انجام شد. فاکتورها شامل شوری آب آبیاری در سه سطح صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار NaCl، کود سوپر فسفات تریپل در دو سطح صفر و ۱/۵ گرم به ازای هر کیلوگرم خاک گلدان و کادمیم اضافه شده به خاک در دو سطح صفر و ۱۲ میلی‌گرم کادمیم بر کیلوگرم خاک بود. این آزمایش به صورت گلدانی و در محیط گلخانه به تعداد ۴۸ عدد گلدان (۳ سطح شوری 2×2 سطح آلودگی کادمیم 2×2 سطح کود سوپر فسفات تریپل 4×4 تکرار) انجام شد. تمامی مواد شیمیایی استفاده شده در این آزمایش از جمله نمک کلرید سدیم، کاملاً خالص و از شرکت مرک آلمان بود.

تعداد دو گیاهچه ۶۰ روزه توتون (*Nicotiana tabacum* L.) رقم کوکر ۳۴۷ که قبلاً در خزانه خاکی فاقد آلودگی کادمیم بذرپاشی شده و با آب غیر شور رشد کرده بودند، به هر گلدان منتقل و کشت انجام گرفت. رقم استفاده شده در این آزمایش، رقم توتون گرمخانه‌ای بود که رقم مورد استفاده در صنعت تولید سیگار می‌باشد. بلافاصله پس از انتقال گیاهچه‌ها به گلدان‌ها آبیاری با توجه به تیمار مد نظر، با آب فاقد شوری (آب مقطر)، شوری ۲۰ یا ۴۰ میلی‌مولار نمک کلرید سدیم به مدت ۷۵ روز انجام شد. تا هفته چهارم مقدار ۴۰۰ میلی‌لیتر به ازای هر گلدان در هر دور آبیاری، و پس از هفته چهارم تا پایان آزمایش مقدار ۸۰۰ میلی‌لیتر به ازای هر گلدان در هر دور آبیاری، آبیاری انجام گرفت (Janouskova et al., 2007). دور آبیاری چهار روز یکبار بود و در هر دور آبیاری، مقدار آب اضافه شده به هر گلدان در هر سطوح شوری یکسان بود. شوری مد نظر همان روز آبیاری از منبع نمک کلرید سدیم تهیه و سپس آبیاری به صورت دستی انجام شد. زیر گلدانی به منظور جمع‌آوری زه آب خروجی از گلدان‌ها و برگرداندن این زه آب‌ها به گلدان‌ها استفاده شد. پس از مدت مذکور گیاهان از محل طوقه قطع و ریشه‌ها با روش الک موئین در آب، از خاک خارج شدند.

محلول + تبدلی، کربناتی، اکسیدهای آهن بی شکل، اکسیدهای منگنز، باقی مانده، آلی) از معادله دو به دست آمد (Lei et al., 2008).

$$D(\%) = \frac{CF}{CS} \times 100 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در آن CF غلظت هر یک از شکل های فلز سنگین بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم و CS مجموع غلظت شکل های فلز سنگین در خاک بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم می باشد.

به منظور اندازه گیری فاکتور تحرک^۱ کادمیم در خاک از معادله ۳ استفاده شد که در این معادله، MF فاکتور تحرک و F1، F2، F3، F4، F5، F6 به ترتیب شکل های محلول + تبدلی، کربناتی، آلی، اکسیدهای منگنز، اکسیدهای آهن و باقی مانده در خاک می باشد (Salbu et al., 1998). فاکتور تحرک کادمیم در خاک فاکتوری جهت برآورد میزان تحرک کادمیم در خاک است و هر چه قدر این فاکتور بزرگتر باشد، نشان از تحرک و خطر بیشتر کادمیم در خاک برای محیط زیست و گیاهان دارد.

$$MF = \frac{F1+F2}{F1+F2+F3+F4+F5+F6} \times 100 \quad \text{معادله (۳)}$$

غلظت کادمیم در بخش های مختلف خاک به روش عصاره گیری دنباله ای انجام شد (Singh et al., 1988).

خاک مورد استفاده جهت آزمایش طبق جدول ۱ دارای بافت لوم شنی، با کربنات کلسیم معادل ۱۷/۵ درصد بود. کود سوپر فسفات تریپل مورد آزمایش با فرمول شیمیایی $Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ شامل ۴۴ درصد فسفات و کادمیم کل آن به روش هضم اسیدی ۰/۱۲ میلی گرم بر کیلوگرم بود (جدول ۲).

آنالیز آماری

داده های حاصل از آزمایش توسط نرم افزار SAS نسخه ۹/۴ آنالیز شد و نمودارها توسط برنامه Excel رسم شد. از آزمون توکی جهت مقایسه میانگین تیمارها در سطح پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر تیمارها بر غلظت کادمیم دود توتون

با افزایش شوری آب آبیاری از صفر به ۲۰ و ۴۰ میلی مولار، غلظت کادمیم دود توتون های رشد کرده در خاک آلوده به کادمیم، به طور میانگین و به ترتیب ۶۵ و ۸۳/۲ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد.

اندازه گیری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، گیاه و کود فسفاتی

برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نمونه مرکب خاک از جمله بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، واکنش خاک در گل اشباع به وسیله الکتروود شیشه ای (Thomas, 1996)، قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره گل اشباع خاک بوسیله دستگاه هدایت سنج الکتریکی (Rhoades, 1996)، ظرفیت تبادل کاتیونی (Sumner and Miller, 1996)، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Nelson, 1982)، فسفر قابل استفاده خاک به روش اولسن (Olsen et al., 1954)، کربن آلی به روش سوختن با دستگاه CHNS (Sato et al., 2014)، غلظت کادمیم قابل عصاره گیری با DTPA در پایان آزمایش به روش لیندسی (Lindsay and Norvell, 1987) و غلظت کادمیم در عصاره های به دست آمده توسط دستگاه جذب اتمی مدل Shimadzu AA-670 مجهز به کوره گرافیتی تعیین شد. جهت تعیین فسفات و کادمیم کل در کود سوپر فسفات تریپل پس از کوبیدن کود در هاون چینی، هضم اسیدی انجام و در عصاره به دست آمده کادمیم کل (Hu et al., 1998) و فسفات کل (Application Bulletin 314) اندازه گیری شد (جدول ۲).

پس از اتمام برداشت بخش هوایی و ریشه گیاهان، بخش های مربوطه با آب معمولی و سپس با آب مقطر شستشو داده شد. بخش های هوایی و ریشه به صورت جداگانه در آون با دمای ۶۵ درجه تا رسیدن به وزن ثابت، خشک گردید و جهت آماده سازی برای هضم اسیدی، نمونه ها آسیاب شد. به منظور تهیه عصاره برای اندازه گیری کادمیم در بخش های ریشه، بخش هوایی و خاکستر گیاه از روش هضم مخلوط نیتریک اسید و پرکلریک اسید به نسبت حجمی ۳ به ۱ استفاده شد (Liu et al., 2015). خاکستر توتون، از سوختن کامل بخش هوایی توتون در فضای باز (به منظور جلوگیری از بازجذب کادمیم دود توتون توسط خاکستر) تهیه شد. غلظت کادمیم دود توتون از تفاوت غلظت کادمیم خاکستر توتون از غلظت کادمیم بخش هوایی گیاه حاصل شد (Pinto et al., 2017).

درصد استخراج DTPA، از معادله یک به دست آمد. (Wong et al., 1998).

$$E(\%) = \frac{CD}{CT} \times 100 \quad \text{معادله (۱)}$$

که در آن CD غلظت کادمیم قابل عصاره گیری با DTPA و CT غلظت کادمیم کل می باشد.

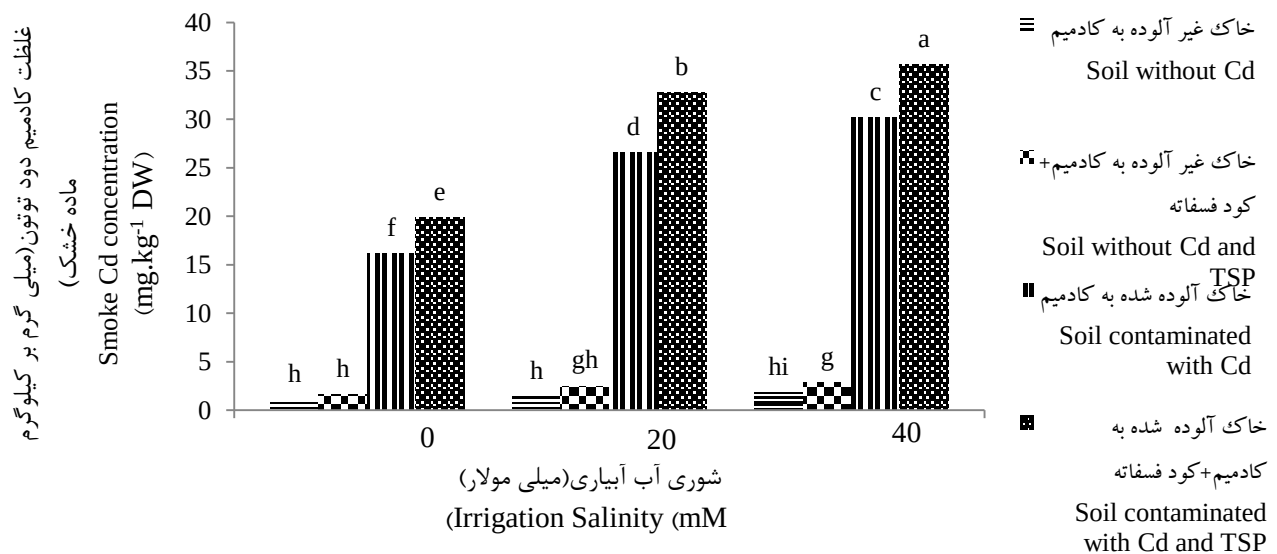
درصد توزیع کادمیم در بخش های مختلف خاک (کادمیم

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مورد مطالعه
Table 1- Some physical and chemical properties of studied soil

بافت خاک Soil texture	رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	pH	EC (dS.m ⁻¹)	فسفر قابل دسترس Available P (mg.kg ⁻¹)	کربن آلی Organic carbon (%)	کادمیم کل Total Cd (mg.kg ⁻¹)	ظرفیت تبادل کاتیونی CEC (cmol ⁺ .kg ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل Calcium carbonate equivalent (%)
لوم شنی Sandy loam	18	10	72	7.4	2.3	3.9	0.35	0.95	8.1	17.5

جدول ۲- ویژگی‌های کود سوپر فسفات تریپل مورد مطالعه
Table 2- Properties of studied Triple Super phosphate fertilizer

کادمیم کل (میلی گرم بر کیلوگرم) Total Cd (mg.kg ⁻¹)	اسیدیته pH	فسفات کل (درصد) Total phosphate (%)
0.12	2.3	44



گردید (شکل ۱). بیشترین غلظت کادمیم دود توتون در خاک‌های آلوده به کادمیم، در شوری ۴۰ میلی‌مولار آب آبیاری مشاهده گردید.

با افزایش کود سوپر فسفات تریپل در خاک‌های آلوده شده به کادمیم، غلظت کادمیم دود توتون در شاهد و دو سطح شوری ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار آب آبیاری، افزایش معنی‌داری نشان داد که بیشترین درصد افزایش در شوری ۲۰ میلی‌مولار با مقدار ۲۳/۳ درصد مشاهده

اثر ترکیبی^۱ دو عامل کود فسفاته و شوری بیشتر از اثر جداگانه هر کدام از عوامل بر غلظت کادمیم دود توتون بود.

پینتو و همکاران (Pinto et al., 2017) گزارش نمودند که در اثر سوختن توتون عناصر بسیاری از توتون به بخش گازی منتقل شد که بیشترین آنها تالیوم با درصد انتقال ۸۵-۹۲ و بعد از آن کادمیم با ۸۱-۹۰ درصد بود. افراد سیگاری به ازای هر یک نخ سیگار در معرض جذب ۱/۷ میکروگرم کادمیم قرار می‌گیرند. در افراد غیر سیگاری جذب کادمیم عمدتاً از طریق زنجیره غذایی و به طور میانگین در یک محیط غیر آلوده به کادمیم، مقدار ۱۰ تا ۲۵ میکروگرم بر هر روز می‌باشد (Roberts, 2014). کاربرد کود سوپرفسفات تریپل در خاک آلوده به کادمیم و در شوری صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار به ترتیب سبب افزایش غلظت کادمیم خاکستر توتون به مقدار ۱/۴۷، ۱۵/۸۹ و ۲۹/۸۰ درصد (جدول ۳) و غلظت کادمیم دود توتون به میزان ۲۳/۲، ۲۳/۳ و ۱۸ درصد (شکل ۱) گردید. بیشترین افزایش غلظت کادمیم خاکستر توتون در نتیجه اعمال کود، در شوری ۴۰ میلی‌مولار در خاک آلوده شده به کادمیم و با غلظت ۱۰/۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم مشاهده شد (جدول ۳). از دلایل آن را می‌توان به افزایش جذب کادمیم در نتیجه افزایش رشد گیاه در اثر کاربرد کود سوپرفسفات تریپل اشاره نمود.

اثر تیمارها بر درصد استخراج DTPA

درصد استخراج DTPA شاخصی مناسب جهت برآورد توانایی عصاره گیر DTPA برای استخراج کادمیم از خاک می‌باشد که بیانگر این است که از ۱۰۰ درصد غلظت کادمیم خاک، چند درصد توسط عصاره‌گیر DTPA از خاک استخراج می‌شود. با افزایش شوری، درصد استخراج کادمیم توسط DTPA در پایان آزمایش روند افزایشی و با کاربرد کود فسفاته در خاک، درصد استخراج روند کاهشی نشان داد. در خاک آلوده شده به کادمیم و حاوی کود فسفاته، با افزایش شوری از صفر به ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار درصد استخراج DTPA به ترتیب ۱۹/۱۷ و ۵۷/۷۰ درصد نسبت به شاهد افزایش نشان داد (جدول ۳). برهمکنش دو عامل شوری و سطوح آلودگی کادمیم بر درصد استخراج DTPA، یک اثر فزاینده بود به نحوی که بر همکنش آنها از اثر هر یک از عوامل به تنهایی بیشتر بود. با افزایش سطح آلودگی کادمیم در خاک حاوی کود فسفاته در شوری ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار، مقدار افزایش درصد استخراج DTPA نسبت به خاک غیر آلوده شده به کادمیم و حاوی کود فسفاته، به ترتیب ۳۷ و ۶۰/۱۷ درصد افزایش نشان داد. مقدار کاهش درصد استخراج DTPA در اثر اعمال کود فسفاته، در خاک‌های غیر آلوده شده به کادمیم بیشتر از خاک آلوده شده به کادمیم بود. با افزایش سطح آلودگی خاک، درصد استخراج کادمیم

توسط DTPA در هر دو خاک حاوی کود فسفاته و فاقد کود فسفاته افزایش نشان داد. بیشترین درصد استخراج DTPA در خاک آلوده شده به کادمیم و در شوری ۴۰ میلی‌مولار و در خاک فاقد کود فسفاته با مقدار ۹/۶۱ و کمترین مقدار درصد استخراج DTPA در شوری صفر میلی‌مولار و در خاک غیر آلوده شده به کادمیم و حاوی کود فسفاته با مقدار ۳/۹۸ مشاهده شد (جدول ۳). سشادری و همکاران (Seshadri et al., 2017) بیان داشتند که کودهای حاوی فسفر توانست کادمیم را به مقدار ۱۱/۵۶ تا ۷۶/۲ درصد غیر متحرک کند و غلظت کادمیم در زه آب خروجی از خاک به طور معنی‌داری کاهش پیدا کرد. آنها بیان داشتند که این کاهش کادمیم در بخش‌های ذکر شده، به علت افزایش تشکیل ترکیبات پایدارتر کادمیم در بخش‌های اکسیدهای آهن و منگنز بود. گیو و همکاران (Guo et al., 2017) نشان دادند که کاربرد کودهای فسفاته همراه با سایر کودها، سبب کاهش کادمیم قابل عصاره‌گیری با DTPA در خاک شد. شوری حاصل از NaCl از طریق تشکیل ترکیب‌های کادمیم-کلر و تبادل سدیم با کادمیم در مکان‌های جذب سطحی ذرات جامد خاک، حلالیت و قابلیت جذب کادمیم برای گیاه چغندر (*Beta vulgaris* Cicla) را افزایش داد (Bingham et al., 1984).

اثر تیمارها بر فاکتور تحرک کادمیم در خاک

فاکتور تحرک کادمیم در خاک آلوده شده به کادمیم نسبت به خاک غیر آلوده در شوری صفر، ۲۰ و ۴۰ میلی‌مولار به طور میانگین و به ترتیب ۲۵/۶، ۳۲/۴ و ۳۶/۲ درصد افزایش نشان داد که این افزایش در سطح ۵ درصد آماری آزمون توکی معنی‌دار بود. از دلایل اصلی این موضوع درصد توزیع بالای غلظت کادمیم در بخش محلول+تبادلی و کربناتی خاک آلوده به کادمیم نسبت به خاک غیر آلوده بود و با افزایش سطوح آلودگی کادمیم خاک، فاکتور تحرک افزایش معنی‌داری نشان داد.

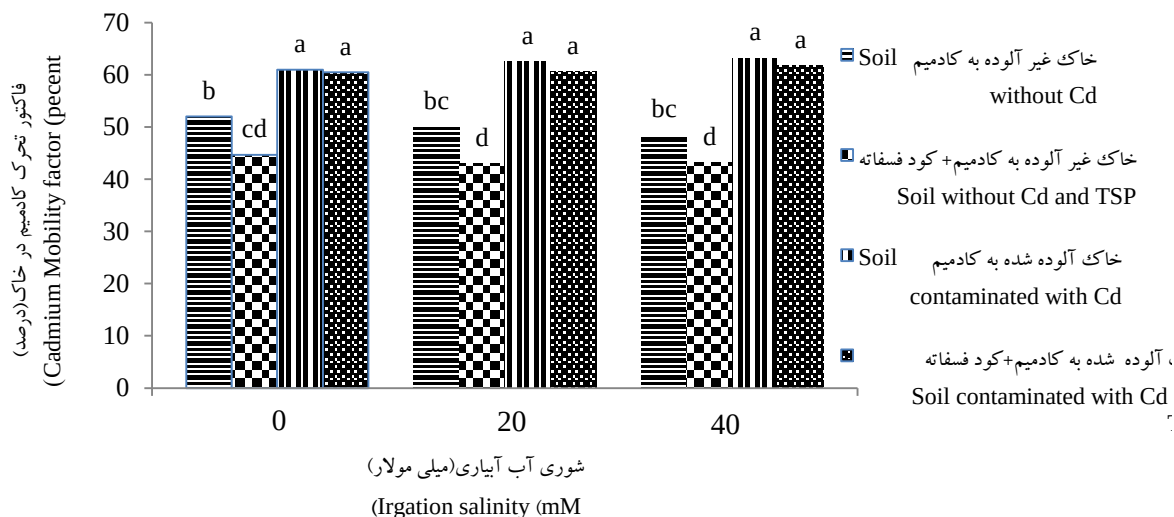
کاربرد کود فسفاته، سبب کاهش معنی‌دار فاکتور تحرک کادمیم در خاک‌های غیر آلوده به کادمیم شد. از دلایل احتمالی آن می‌توان به کاهش توزیع غلظت کادمیم در بخش‌های محلول+تبادلی و کربناتی در خاک غیر آلوده به کادمیم و افزایش غلظت کادمیم بخش باقی مانده خاک نام برد. سطوح شوری آب آبیاری اثر معنی‌داری بر کاهش فاکتور تحرک کادمیم نداشت و حال آنکه با افزایش شوری غلظت کادمیم محلول+تبادلی در خاک افزایش نشان داد. یکی از دلایل این موضوع این است که با افزایش شوری از کادمیم بخش کربناتی کاسته شده و به کادمیم بخش محلول+تبادلی اضافه شده است و مجموع این دو بخش در اثر اعمال شوری‌های مختلف آب آبیاری، یکسان بوده است و لذا با افزایش سطوح شوری، فاکتور تحرک کادمیم در خاک تفاوت معنی‌داری حاصل نکرد.

جدول ۳- اثر شورزی آب آبیاری، کود سوپر فسفات تربیل و آلودگی کادمیم خاک بر غلظت کادمیم بخش هوایی، غلظت کادمیم خاکستر توتون، غلظت کادمیم قابل جذب عصاره گیری شده با DTPA، درصد استخراج کادمیم توسط DTPA و درصد انتقال کادمیم

Table 3- Effect of irrigation water salinity, TSP and soil Cd contamination on shoot Cd concentration, Tobacco ash Cd concentration, DTPA available Cd in soil, DTPA extractable Cd and Cd transfer percentage

ویژگی های مورد اندازه گیری Measured criteria	شوری صفر میلی مولار Salinity 0 Mm			شوری ۲۰ میلی مولار Salinity 20 mM			شوری ۴۰ میلی مولار Salinity 40 mM		
	خاک بدون کادمیم Soil without Cd			خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd			خاک بدون کادمیم Soil without Cd		
	خاک بدون کادمیم Soil without Cd	خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd	خاک بدون کادمیم Soil without Cd	خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd	خاک بدون کادمیم Soil without Cd	خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd	خاک بدون کادمیم Soil without Cd	خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd	خاک آلوده به کادمیم Soil contaminated with Cd
غلظت کادمیم بخش هوایی Shoot Cd concentration (mg.kg ⁻¹)	1.30 h	1.92 gh	19.50 e	23.29 d	1.72 gh	2.98 fg	32.20 c	39.29 b	2.40 g
غلظت کادمیم قابل جذب خاک عصاره گیری شده با DTPA DTPA available Cd in soil (mg.kg ⁻¹)	0.04 g	0.04 g	0.80 d	0.76 d	0.06 g	0.05 g	1.07 b	0.91 c	0.07 g
غلظت کادمیم خاکستر توتون Tobacco ash Cd concentration (mg.kg ⁻¹)	0.19 f	0.31 f	3.38 e	3.43 e	0.26 f	0.45 f	5.60 d	6.49 c	0.59 f
درصد استخراج کادمیم توسط DTPA DTPA extractable Cd in soil (%)	4.99 fg	3.98 g	6.19ef	5.84ef	7.1c	5.08fg	8.26bc	6.96cde	7.63cd
درصد انتقال کادمیم Cd transfer percentage(%)	85.17 a	83.64 ab	82.61 ab	85.28 a	84.6 a	84.75 a	82.59 ab	83.48 ab	74.86 e
							81.46 bc	78.42 cd	76.8 de

حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی دار نیست. هر عدد میانگین ۴ تکرار می باشد. TSP= Triple Super Phosphate fertilizer
The same letters are not significantly different at P = 0.05 (n = 4) according to the Tukey test.



شکل ۲- اثر تیمارها بر فاکتور تحرک کادمیم در خاک

حروف مشترک در سطح ۵ درصد آزمون توکی معنی دار نیست.

Figure 2- Effect of treatments on Cd mobility factor

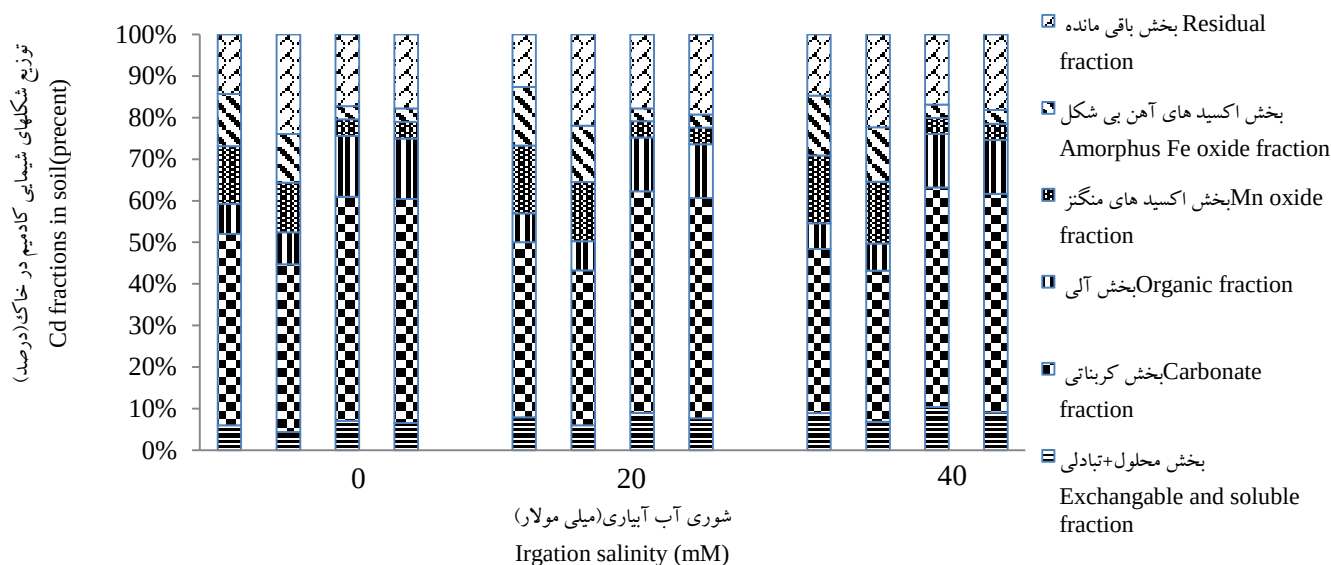
(The same letters are not significantly different at $P = 0.05$ ($n = 4$) according to the Tukey test)

محلول+تبادلی نسبت به شاهد صفر شوری افزایش نشان داد. در خاک آلوده شده به کادمیم مقدار بیشتری از کادمیم در نتیجه اعمال کود فسفات در بخش باقی مانده رسوب نموده است ولی درصد آن نسبت به کل کمتر از خاک غیر آلوده شده به کادمیم بود (شکل ۳). نتایج هم چنین نشان داد افزایش سطوح کادمیم خاک سبب افزایش درصد کادمیم بخش کربناتی خاک شد و این بدین مفهوم است که با افزایش غلظت کادمیم در خاک سهم بیشتری از درصد کل کادمیم خاک به بخش کربناتی منتقل شده است (شکل ۳). در هر دو خاک آلوده و غیر آلوده با افزایش کود سوپر فسفات تریپل به خاک، درصد غلظت کادمیم بخش محلول+تبادلی و کربناتی کاهش نشان داد و در عوض درصد کادمیم بخش باقی مانده افزایش نشان داد (شکل ۳). با افزایش آلودگی کادمیم در خاک، درصد بخش کربناتی و باقی مانده افزایش می یابد و این بیشتر به خاطر رسوب کادمیم در این بخش ها به شکل های غیر فعال در خاک می باشد. واترلوت و همکاران (Waterlot et al., 2017) بیان داشتند که با افزایش کود فسفات آمونیوم، غلظت کادمیم در بخش باقی مانده و کربناتی خاک افزایش یافت در حالی که غلظت کادمیم قابل تبادل و بخش محلول، کاهش یافت. با افزایش سطوح آلودگی کادمیم خاک، درصد کادمیم بخش کربناتی و ماده آلی خاک نسبت به خاک غیر آلوده به کادمیم افزایش معنی داری نشان داد (شکل ۳). از دلایل این موضوع می توان به افزایش رسوب کادمیم در بخش کربناتی و تثبیت کادمیم در سطوح فعال مواد آلی اشاره نمود.

میزان کاهش فاکتور تحرک کادمیم در خاک های غیر آلوده شده به کادمیم در اثر اعمال کود فسفات، به طور میانگین ۱۵/۳۸ درصد و در خاک های آلوده شده به کادمیم ۲/۷۶ درصد بود. تاثیر کود فسفات در غلظت های کم کادمیم خاک اثر بیشتری بر کاهش فاکتور تحرک کادمیم داشت چون همان غلظت اندک کادمیم محلول خاک در نتیجه اعمال کود فسفات کاهش یافت ولی در خاک آلوده به کادمیم غلظت کادمیم در بخش کربناتی بیشترین مقدار بود (شکل ۳) و با کاربرد کود فسفات، تاثیر چندانی بر فاکتور تحرک نداشت (شکل ۲).

درصد توزیع شکل های شیمیایی کادمیم خاک

با افزایش شوری و سطح آلودگی خاک، درصد توزیع شکل های شیمیایی کادمیم خاک در پایان آزمایش و تحت تاثیر تیمارهای مختلف تغییر نمود. در خاک های آلوده شده به کادمیم درصد توزیع کمتری از کادمیم در بخش های اکسید آهن بی شکل و منگنز نسبت به خاک غیر آلوده شده به کادمیم قرار داشت و بیشترین درصد توزیع کادمیم اضافه شده به خاک در بخش کربناتی بود (شکل ۳). رنلا و همکاران (Renella et al., 2004) بیان داشتند که علت اصلی عدم تحرک کادمیم در خاک های آهکی، کاهش تحرک کادمیم در بخش کربناتی خاک بود. هر دو عامل شوری و سطوح کادمیم سبب افزایش کادمیم محلول+تبادلی گردید (شکل ۳). با افزایش شوری آب آبیاری و افزایش سطوح آلودگی خاک، درصد غلظت کادمیم در بخش



شکل ۳- اثر تیمارها بر درصد توزیع شکل‌های مختلف کادمیم در خاک. در هر سطح شوری آب آبیاری به ترتیب از چپ به راست ستون‌ها عبارتند از خاک غیر آلوده به کادمیم، خاک غیر آلوده به کادمیم + کود فسفاته، خاک آلوده شده به کادمیم، و خاک آلوده شده به کادمیم + کود فسفاته

Figure 3- Effect of treatments on Cd fractions in soil. at each irrigation salinity level, from left to right columns are non Cd contaminated soil, non Cd contaminated soil + phosphate fertilizer, Cd contaminated soil and Cd contaminated soil+ phosphate fertilizer

نتیجه‌گیری

افزایش غلظت کادمیم باقی مانده خاک شد. عامل شوری و کود فسفاته روند معکوسی بر کادمیم بخش محلول+تبادلی و کادمیم فراهم با DTPA خاک داشتند به طوری که با افزایش شوری، این غلظت‌ها افزایش و با افزایش کود سوپر فسفات تریپل، کاهش نشان داد. با افزایش کود فسفاته به خاک، مقدار کاهش فاکتور تحرک کادمیم در خاک غیر آلوده به کادمیم بیشتر از خاک آلوده شده به کادمیم بود. برهمکنش دو عامل شوری و سطوح آلودگی کادمیم بر درصد استخراج DTPA، یک اثر فزاینده داشت به نحوی که بر همکنش آنها از اثر هر یک از عوامل به تنهایی بیشتر بود.

بر همکنش دو عامل کود فسفاته و سطوح آلودگی کادمیم خاک بر افزایش کادمیم دود توتون از اثر هر کدام از عوامل کود فسفاته و سطوح آلودگی کادمیم بیشتر بود و لذا کوددهی فسفاته در خاک های آلوده به سطوح بالای کادمیم بایستی انجام نگیرد یا به حداقل ممکن برسد. با افزایش سطوح آلودگی کادمیم خاک، درصد غلظت کادمیم بخش‌های اکسیدی خاک کاهش و درصد غلظت کادمیم بخش کربناتی، آلی و باقی مانده افزایش نشان داد. کاربرد کود فسفاته سبب

منابع

- Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., and Martínez-Martínez S. 2011. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. Chemosphere 85: 1318–1324. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.07.046>.
- Application Bulletin 314 e. Determination of total phosphate in phosphoric acid and phosphate fertilizers with 859 Titrotherm. Page1-4. Metrohem.
- Bingham F.T., Sposito G., and Strong J.E. 1984. The effect of chloride on the availability of cadmium. Journal Environment Qual. 13: 71-74. <https://doi.org/10.2134/jeq1984.00472425001300010013x>.
- Christensen T.H., and Haung P.M. 1999. Solid phase cadmium and the reactions of aqueous cadmium with soil surfaces. In "Cadmium in Soils and Plants" (M. J. McLaughlin and B. R. Singh, Eds.), pp. 65–96. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Gee G. W., and Bauder J. W. 1986. Particle size analysis, hydrometer method. P.404-408. In A. Klute et al.(eds) Methods of soil analysis, part1. 3rd Ed. Am. Soc. Agron. Madison. WI.
- Guo J., Leia M., Yanga J., Yanga J., Wana X., Chena T., Zhoua X., Gua S., and Guo G. 2017. Effect of fertilizers on the Cd uptake of two sedum species (*Sedum spectabile* Boreau and *Sedum aizoon* L.) as potential Cd accumulators. Ecological Engineering 106: 409–414. Analytica Chimica Acta <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.069>.

7. Hu Y., Vanhaecke F., Moens L., Dams R., del Castillo P., and Japenga J. 1998. Determination of the aqua regia soluble content of rare earth elements in fertilizer, animal fodder phosphate and manure samples using inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 373: 95-105. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00399-7](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00399-7).
8. Janouskova M., Vosatka M., Rossi L., and Lugon-Moulin N. 2007. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation on cadmium accumulation by different tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) types. *Applied Soil Ecology* 35: 502–510. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.10.002>.
9. Lei M., Liao B., Zeng Q., Qin P., and Khan S. 2008. Fraction distributions of lead, cadmium, copper and zinc in metal contaminated soil before and after extraction with disodium ethylenediaminetetraacetic acid. *Commun. Soil Science Plant Analytica* 39: 1963-1978. <https://doi.org/10.1080/00103620802134776>.
10. Lindsay W.L., and Norvell W.A. 1987. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society American Journal* 42: 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
11. Liu Z., Ge H., Li C., Zhao Z., Song F., and Hu S. 2015. Enhanced Phytoextraction of Heavy Metals from Contaminated Soil by Plant Co-Cropping Associated with PGPR. *Water Air and Soil Pollution* 226:29. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2304-y>.
12. Nelson R.E. 1982. Carbonate and gypsum. In: Page AL(ed) Method of soil analysis. Part2, 2nd ed. Agron Monogr.9. ASA and SSSA, Madison: 181-197.
13. Norvell W.A., Wu J., Hopkins D.G., and Welch R.M. 2000. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium. *Soil Science Society American Journal* 64: 2162–2168. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6462162x>.
14. Olsen S.R., Cole C.V., Watanabe F.S., and Dean L.A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. USDA. Circ.939. U.S. Gov. Print office, Washington D.C.
15. Pinto E., Cruz M., Ramos P., Santos A., and Almeida A. 2017. Metals transfer from tobacco to cigarette smoke: Evidences insmokers' lung tissue. *Journal of Hazardous Materials* 325: 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.069>.
16. Renella G., Adamo P., Bianco M.R., Landi L., Violante P., and Nannipieri P. 2004. Availability and speciation of cadmium added to a calcareous soil under various managements. *European Journal of Soil Science* 55: 123–133. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00586.x>.
17. Rhoades J. D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. P.417-436. in D. L. Sparks et al. (ed.) Method of soil analysis. PartIII. 3rd Ed. Am. Soc. Agron., Medison. WI.
18. Roberts T.L. 2014. Cadmium and Phosphorous Fertilizers: The Issues and the Science. *Procedia Engineering* 83: 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.012>.
19. Salbu B., Krekling T., and Oughton D.H. 1998. Characterization of radioactive particles in the environment. *Analytic* 123: 843-849.
20. Satarug S., Garrett S.H., Sens M.A., and Sens D.A. 2010. Cadmium, environmental exposure and health outcomes. *Environ. Health Perspect* 118: 182–190. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901234>.
21. Sato J.H., Célio de Figueiredo C., Marchão R.L., Madari B.E., Benedito L.E.C., Busato J.G., and Mendes de Souza D. 2014. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. *Science Agriculture* 71(4):302-308. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0306>.
22. Semu E., and Singh B.R. 1996. Accumulation of heavy metals in soils and plants after long-term use of fertilizers and fungicides in Tanzania. *Fertilizer Research* 44: 241–248.
23. Seshadri B., Bolan N.S., Choppala G., Kunhikrishnan A., Sanderson P., Wang H., Currie L.D., Tsang D. C.W., Ok Y.S., and Kim G. 2017. Potential value of phosphate compounds in enhancing immobilization and reducing bioavailability of mixed heavy metal contaminants in shooting range soil. *Chemosphere* 184:197-206. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.172>.
24. Singh J.P., Karwasra S.P.S., and Singh M. 1988. Distribution and forms of copper, iron, manganese and zinc in calcareous soils of India. *Soil Science* 146(5):359-366. <https://doi.org/10.1097/00010694-198811000-00008>.
25. Sumner M.E., and Miller W.P. 1996. Cation exchange capacity and exchangeable coefficients. P.1201-1229. In D. Ed. Am. Soc. Agronomy, Medison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c40>.
26. Suwa R., Nguyen N.T., Saneoka H., Moghaib R., and Fujita K. 2006. Effect of salinity stress on photosynthesis and vegetative sink in tobacco plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 52: 243–250. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2006.00024.x>.
27. Thévenod F., and Lee W.K. 2013. Toxicology of cadmium and its damage to mammalian organs. *Metabolism Ions Life Science* 11: 415–490. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5179-8_14.
28. Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil activity. P. 475-490. In D.L. Sparks et al. (ed.) Method of soil analysis. PartIII. 3rd Ed. Am. Soc. Agronomy Medison WI.
29. United Nations Environment Program(UNEP) Chemicals Branch, DTIE. 2010. Final review of scientific information on cadmium –Version of December 2010.
30. Usman A.R.A., Kuzyakov Y., and Stahr K. 2005. Effect of immobilizing substances and salinity on heavy metals

- availability to wheat grown on sewage sludge contaminated soil. *Soil Sediment Contam* 14: 329–344. <https://doi.org/10.1080/15320380590954051>.
31. Wagner G.J. 1993. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health. *Advance Agronomy* 51: 173–212. [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60593-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60593-3).
32. Wangstrand H., Erikson J., and Oborn I. 2007. Cadmium concentration in winter wheat as affected by nitrogen fertilization. *European Journal of Agronomy* 26: 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.09.010>.
33. Waterlot C., Pruvot C., Marot F., and Douay F. 2017. Impact of a Phosphate Amendment on the Environmental Availability and Phytoavailability of Cd and Pb in Moderately and Highly Carbonated Kitchen Garden Soils. *Pedosphere* 27(3): 588–605. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(17\)60354-0](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(17)60354-0).
34. Wong M.H., Wong J.W.C., and Baker A.J.M. 1998. *Remediation and Management of Degraded Lands*. CRC Press, Florida, USA. <https://doi.org/10.1201/9780203740897>.
35. World Health Organization (WHO). 2010. Exposure to Cadmium: A Major Public Health Concern. World Health Organization <http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>.
36. Zhao S., Feng C., Wang D., Liu Y., and Shen Z. 2013. Salinity increases the mobility of Cd, Cu, Mn, and Pb in the sediments of Yangtze Estuary: Relative role of sediments' properties and metal speciation. *Chemosphere* 91: 977–984. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.001>.



Evaluating TOPSIS Method in Prioritizing Lands for Saffron Cultivation

M. Eskandari^{1*}, A. Zeinadini², M.N. Navidi³, A. Salmanpour⁴

Received: 01-01-2022

Revised: 10-01-2022

Accepted: 17-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Eskandari M., Zeinadini A., Navidi, M.N., and Salmanpour A. 2022. Evaluating TOPSIS Method in Prioritizing Lands for Saffron Cultivation. Journal of Water and Soil 36(2): 237-249. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74195.1125](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74195.1125)

Introduction

Saffron, which its cultivation is compatible with the arid and semi-arid climate of Iran, is one of the most valuable agricultural products in the world. Therefore, the cultivation of this crop in different parts of the country has been enormously developed in recent years. More than 95% of the world production of this precious product is allocated to Iran, which is mainly located in the two provinces of Khorasan Razavi and Southern Khorasan. The objective of this study was to determine the priority of lands for saffron cultivation by using TOPSIS method. Furthermore, in this study, TOPSIS, which is the second most widely used approach among multi-criteria decision making methods, was compared with the conventional parametric one to assess the land suitability for saffron production.

Materials and Methods

To achieve the objective of this study, 135 saffron farms in Khorasan Razavi, Southern Khorasan, Fars, Markazi and Kerman provinces were selected. In each farm, one pedon was dug and studied in detail. Soil samples were collected from different horizons of the pedons and taken to the laboratory for the designated physicochemical analyses. The average quantity of saffron yield in the last three years was recorded for each study point. The selected areas did not have climatic restrictions for saffron cultivation. For this purpose, in addition to local experience, the climate suitability index was calculated using the saffron climatic requirement table by its phenological period in each region. The effective soil criteria conditioned on the saffron yield were obtained using statistical analyses. By constructing a decision matrix and normalizing it, weighting the criteria by ranking order method and constructing a weighted matrix, determining the positive and negative ideal and then calculating the relative proximity of each alternative to the positive ideal, the preference of each alternative by TOPSIS method for saffron cultivation was determined. Then, the prioritization of alternatives was compared with the actual yield of saffron. Soil suitability index was also calculated using the table of soil and landscape requirements for saffron, and then compared with actual yield. Finally, the two schemes were validated and compared with each other.

Results and Discussion

The climate suitability index for saffron cultivation in the five studied areas indicated that the climate conditions in all areas were relatively similar. Consequently, soil properties can be considered as the only factors affecting the priority of lands for saffron cultivation in the studied areas. The results further revealed that three variables of lime content, salinity and exchangeable sodium percentage of soils under saffron cultivation in the country were higher than the critical level for saffron production. Therefore, these three variables are considered as the most important soil properties affecting the saffron yield. The order of weights assigned to the variables included salinity, exchangeable sodium percentage, lime, gravel, gypsum, organic carbon and soil reaction.

1, 2 and 3- Assistant Professors, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: m.skandari@areeo.ac.ir)

4- Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Lorestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Khorram Abad, Iran

Comparison of the order of priority of 135 options by TOPSIS with the actual yield of saffron showed an acceptable accuracy ($R^2 = 0.92$) for this method. The soil index calculated by the parametric square root method for 135 soil profiles was also compared with the actual yield. The coefficient of determination obtained in this case was about 0.9, showing that TOPSIS was able to determine the suitability of lands for saffron cultivation better than the parametric method. Due to the ability of TOPSIS to evaluate a large number of evaluation criteria, this method is superior to the parametric method, which can consider a maximum of eight criteria in estimating the index.

Conclusion

The outcome of this study showed a high accuracy of TOPSIS method in determining land suitability for development of saffron cultivation. This method is well able to use a large number of criteria that have negative or positive effects on the priority of alternatives. Furthermore, depending on the conditions of the decision making problem, one of the methods of weighting the criteria can be employed and combined with the TOPSIS method. The high accuracy of this method can be attributed to the use of mathematical relationships and matrices, data standardization by Euclidean soft method, and the nature of comparing both distances from the positive and negative ideals.

Keywords: Crop development, Land suitability, Multi-criteria decision making, Yield

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۴۹-۲۳۷

بررسی کارایی روش TOPSIS در اولویت‌بندی اراضی برای کشت زعفران

مهناز اسکندری^{۱*} - علی زین الدینی میمند^۲ - میرناصر نویدی^۳ - آناهید سلمان‌پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

چکیده

کشت زعفران به دلیل ارزش اقتصادی و سازگاری آن با شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران، در سال‌های اخیر توسعه بسیاری داشته است. هدف از این پژوهش، بررسی کارایی روش تاپسیس در اولویت‌بندی اراضی برای اختصاص به کشت زعفران و مقایسه آن با روش پارامتریک ریشه دوم بود. بدین منظور، ۱۳۵ مزرعه زعفران در استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، فارس، مرکزی و کرمان، انتخاب و یک خاخرخ در هر مزرعه، حفیر، مطالعه و نمونه‌گیری شد. آزمایش‌های فیزیکوشیمیایی لازم روی نمونه‌ها انجام گردید. متوسط مقدار عملکرد زعفران در سه سال گذشته برای هر نقطه مطالعاتی نیز بدست آمد. به کمک تحلیل‌های آماری، معیارهای موثر خاکی بر عملکرد زعفران بدست آمد. ماتریس تصمیم نرمال‌شده وزن‌دار به روش رتبه‌بندی ساخته شد. با تعیین ایده‌آل‌های مثبت و منفی، اولویت گزینه‌ها به روش تاپسیس برای کشت زعفران تعیین شد و با عملکرد واقعی زعفران مقایسه گردید. نتایج نشان داد که مقدار سه متغیر کربنات کلسیم معادل (CCE)، شوری و سدیمی بودن خاک‌ها در اراضی تحت کشت زعفران در کشور، از آستانه مجاز برای کشت این گیاه بیشتر است. بنابراین سه متغیر ذکرشده از مهم‌ترین ویژگی‌های موثر خاک بر عملکرد زعفران هستند. ترتیب وزن‌های اختصاص‌یافته به متغیرها به ترتیب شامل شوری، درصد سدیم قابل‌تبادل، CCE، سنگریزه، گچ، کربن آلی و واکنش خاک بود. مقدار ضریب تبیین حاصل از مقایسه ترتیب اولویت‌های ۱۳۵ گزینه با عملکرد مشاهده شده زعفران به روش تاپسیس، ۰/۹۱ بدست آمد. این مقدار برای شاخص خاک با عملکرد به روش پارامتریک، ۰/۹۰ بود. بنابراین، روش تاپسیس ابزاری توانمند در تعیین اولویت گزینه‌ها بود و در تعیین تناسب اراضی برای توسعه کشت، قابل کاربرد است.

واژه‌های کلیدی: تصمیم‌گیری چند معیاره، تناسب اراضی، توسعه کشت، عملکرد

مقدمه

زعفران از جمله محصولات صادراتی کشاورزی ایران است که تولید آن در وضعیت اقتصادی و اجتماعی زعفران‌کاران که عمدتاً در مناطق خشک و کم باران زندگی می‌کنند، تأثیر شایانی دارد. این گیاه به‌عنوان سلطان ادویه جهان شناخته می‌شود و از گران‌بهارترین

محصولات کشاورزی است (Zeinadini et al., 2019). بیش از ۹۵٪ تولید جهانی این محصول گران‌بها به ایران اختصاص دارد که به طور عمده در دو استان خراسان رضوی و جنوبی واقع شده است (Zeinadini et al., 2022). به دلیل کشت گیاه زعفران در فصول سرد سال و در نتیجه نیاز کمتر آن به آبیاری، همچنین ایجاد اشتغال و ارزآوری، کشت این گیاه در سال‌های اخیر در بسیاری از مناطق کشور مورد توجه قرار گرفته است (Vafabakhsh, 2003). با این حال، توسعه کشت یک گیاه زمانی پایدار است که همراه با برنامه‌ریزی و شناخت پتانسیل اراضی برای تولید آن باشد. در این راستا می‌توان از ارزیابی تناسب اراضی که فرآیند تخمین پتانسیل اراضی برپایه ویژگی‌های آن است (Bagherzadeh and Gholizadeh, 2017) کمک گرفت.

روش‌های متعددی تاکنون برای ارزیابی تناسب اراضی و

۱، ۲ و ۳- استادیاران پژوهش، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: m.skandari@areeo.ac.ir)

۴- استادیار پژوهش، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.74195.1125

پرسشنامه از منابع آگاه و متخصص، جمع‌آوری شد. سپس برپایه کلاس‌های تناسب پیشنهادی فائو، طبقه‌بندی گردید. نقشه‌های موضوعی برخی متغیرهای محیطی مربوط به خاک، اقلیم و توپوگرافی در محیط GIS تهیه شد. معیارهای تناسب به روش AHP وزن‌دهی و به روش آنالیز همپوشانی با هم ترکیب شدند. برپایه نتایج بدست آمده در حدود ۵۶٪ اراضی استان قابلیت کشت دیم را داشتند. پیلهور و همکاران (Pilevar et al., 2020)، از ترکیب Fuzzy-AHP-GIS برای ارزیابی تناسب اراضی در کشت گندم و ذرت مناطق نیمه‌خشک (خاک‌های شور و آهکی شرق ایران) استفاده کردند. نخست داده‌های اقلیمی، خاک و توپوگرافی تبدیل به فرمت فازی شدند. سپس مدل ارزیابی دقیقی برای ارزیابی اراضی با ترکیب AHP و Fuzzy در محیط GIS توسعه دادند. بیشترین وزن به بافت خاک و کمترین وزن به ESP اختصاص یافت. نتایج نشان داد که در حدود ۷۸، ۱۵ و ۷ درصد از اراضی مورد مطالعه برای کشت ذرت به ترتیب دارای تناسب زیاد، متوسط و اندک است. همچنین ترکیب روش‌های به‌کار گرفته شده ابزاری قدرتمند برای مدیریت و برنامه‌ریزی استفاده از اراضی کشاورزی تشخیص داده شد.

روش تاپسیس (TOPSIS)^۳، دومین روش پرکاربرد و شناخته شده از روش‌های MCDM، پس از روش AHP است (Celikbilek and Tuysuz, 2020). دلیل کاربردی بودن آن را می‌توان سادگی استفاده از این روش برای حل چالش‌هایی دانست که با تعداد زیادی معیار و گزینه سروکار دارند (Celikbilek and Tuysuz, 2020؛ Wang et al., 2017). رویکرد تاپسیس، ابزار و اهرم مناسبی برای تعدیل و کنترل میزان موازنه و جبران‌پذیری بین معیارها (ویژگی‌های خاک و اراضی) است که باعث ارزیابی سریع و تفسیر مناسب نتایج و ارتباط بین معیارها می‌شود. از قابلیت‌های دیگر این روش می‌توان به توانایی آن در ترکیب داده‌های نامتجانس (معیارهای اثر مثبت مثل عمق مفید خاک و اثر منفی مانند درصد سدیم قابل تبادل) با استفاده از دانش خبره، انعطاف‌پذیری در انتخاب داده‌های مناسب برای مناطق و مسائل مختلف، ایفاء تصمیم‌گیری گروهی یا منفرد و استقلال در توسعه سناریوهای مختلف تصمیم‌گیری، اشاره کرد (Seyedmohammadi et al., 2017). وفائی‌نژاد (Vafaeinejad, 2016)، در پژوهش خود نشان داد که کاربرد روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS، می‌تواند در انتخاب محصولات بهینه برای طراحی و تهیه الگوی کشت یک منطقه بسیار کارآمد باشد. در این پژوهش، نخست اراضی برای بخش جلگه از توابع استان اصفهان برای کشت هشت محصول زراعی، به کمک معیارهای اقتصادی، نیاز آبی و دوره

صحت‌سنجی آن‌ها ارائه شده است (Seyedmohammadi et al., 2018). بیشتر این روش‌ها برپایه چارچوب ارزیابی اراضی است که در سال ۱۹۷۶ توسط FAO (FAO, 1976) ارائه شد. شناخته‌شده‌ترین روش در این زمینه که از گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفته و هنوز هم کاربرد آن مورد علاقه پژوهشگران است، روش سائیس و همکاران می‌باشد (Sys et al., 1991). به عنوان مثال زین‌الدینی و همکاران (Zeinadini et al., 2022)، پژوهشی را به منظور تهیه جدول نیازهای رویشی زعفران از نظر خاک و زمین‌نما، برای استفاده در مطالعات ارزیابی تناسب اراضی به روش سائیس و همکاران (Sys et al., 1991)، انجام دادند. در این پژوهش، نمونه‌های خاک از ۱۲۴ مزرعه زعفران در شش استان کشور، جمع‌آوری شد. سپس با برقراری روابط رگرسیون ساده بین ویژگی‌های خاک و عملکرد زعفران، درجه‌بندی خصوصیات خاک صورت گرفت و جدول نیاز رویشی برای زعفران، تهیه شد. در نهایت شاخص خاک برای ۲۱ مزرعه جدید به کمک جدول پیشنهادی محاسبه و با مقدار عملکرد واقعی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که در داده‌های صحت‌سنجی، ضریب تبیین میان عملکرد و شاخص خاک در حدود ۰/۹۲ می‌باشد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول جدول پیشنهاد شده است. پژوهش‌های مشابه دیگری نیز برای تهیه جدول نیازهای رویشی خاک و زمین‌نما برای محصولات متعدد مانند خرما (Zeinadini et al., 2020) پسته (Zeinadini et al., 2021)، انجیر (Seyedmohammadi et al., 2021)، نیشکر (Seyedmohammadi et al., 2020) و پنبه (Seyedmohammadi et al., 2021) انجام شده است.

هرچند که روش متداول ارائه شده برای ارزیابی تناسب اراضی توسط سائیس و همکاران (Sys et al., 1991)، نتایج مناسبی را تاکنون ارائه داده است، لیکن بحث نابرابری اهمیت معیارهای موثر در ارزیابی نیز مطرح است. یکسان نبودن اهمیت معیارهای دخیل در ارزیابی، باعث پیچیدگی بیشتر این مسأله می‌شود (Pilevar et al., 2020). بنابراین پژوهشگران متعددی در دهه‌های اخیر، روش‌های تحلیل تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM)^۱ و بویژه فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)^۲ را برای حل مسائل تعیین تناسب اراضی به کار گرفته‌اند. این روش‌ها، به حل مسائلی می‌پردازند که در آن‌ها باید گزینه‌های متعددی را برپایه معیارهای مختلف، مورد ارزیابی قرار داد. به عنوان مثال قابلیت تناسب اراضی کشاورزی استان گلستان برای کشت دیم، به کمک MCDM و GIS، توسط کاظمی و آکنیسی (Kazemi and Akinci, 2018). نیازهای محیطی کشت دیم در این پژوهش، به کمک بررسی منابع پیشین و تکمیل

تا تنها عوامل موثر بر مقدار تولید، ویژگی‌های خاک باشد. چراکه در این پژوهش، اولویت‌بندی اراضی برپایه شرایط حاکم بر خاک آن‌ها برای کشت زعفران، مد نظر بود. سپس در هر مزرعه یک بدون حفر، تشریح و طبقه‌بندی گردید (USDA, 2012) و از هر افق نمونه‌برداری خاک انجام شد. آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های خاک شامل pH گل اشباع، EC در عصاره گل اشباع، آهک به روش تیتراسیون برگشتی، کربن آلی به روش والکلی-بلاک اصلاح‌شده، فسفر قابل جذب به روش اولسن، سدیم قابل تبادل با روش استات آمونیوم یک نرمال در pH=7، پتاسیم قابل جذب به روش استات آمونیوم یک مولار با pH=7، ظرفیت تبادل کاتیونی با استفاده از استات سدیم، درصد گچ با روش استن صورت گرفت. جداسازی اجزای مختلف شن، سیلت و رس نیز به روش هیدرومتر انجام شد (USDA, 2014). در هر مزرعه نیز پرسش‌نامه کاربری اراضی برای سه سال از ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸، تکمیل گردید و مقدار متوسط عملکرد در این مدت برای هر نقطه مشاهداتی یادداشت شد. ویژگی‌های خاک تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متر با کاربرد ضرائب وزنی عمق، متوسط‌گیری شد. سپس یک بانک داده متشکل از خصوصیات خاک و عملکرد زعفران از نقاط مطالعاتی برای انجام تحلیل‌های آماری، تهیه شد.

پردازش آماری داده‌ها

پیش از انجام آنالیزهای آماری، میانگین وزنی برای خصوصیت خاک در هر خاکرخ با کاربرد ضرائب وزنی عمقی برپایه روش سائیس و همکاران محاسبه شد (Sys et al., 1991). سپس، آمار توصیفی برای داده‌های بدست آمده بررسی گردید. وضعیت پراکنش داده‌ها، گام اساسی در توصیف کمی و آماری آن‌ها می‌باشد (Ghiasvand, 2016). شاخص‌هایی مانند میانگین، کمینه و بیشینه، اطلاعاتی در رابطه با موقعیت قرارگرفتن توزیع داده‌ها یا نقطه ثقل توزیع را نشان می‌دهند. واریانس و انحراف معیار نیز چگونگی پراکندگی داده‌ها را بررسی می‌نمایند (Zeinadini et al., Mohammadi, 2006). وضعیت داده‌های پرت با استفاده از نمودار جعبه‌ای و نرمال بودن داده‌ها با استفاده از شاخص‌های کشیدگی و چولگی و آزمون کلموگوروف-اسمیرنوف بررسی شد. در مرحله بعد، اثر ویژگی‌های مختلف خاک بر عملکرد زعفران، با استفاده از تجزیه و تحلیل‌های آماری و ضریب همبستگی، بررسی گردید. بدین ترتیب بر پایه نتایج آماری، مهم‌ترین عوامل خاکی موثر بر مقدار عملکرد زعفران برای مدل‌سازی و اولویت‌بندی با تاپسیس، انتخاب شدند. تجزیه و تحلیل‌های آماری با استفاده نرم‌افزار SPSS نسخه ۲۴ انجام گردید.

روش شباهت به گزینه ایده‌آل

روش تاپسیس یا شباهت به گزینه ایده‌آل به عنوان یک روش

رشد محصول، اولویت‌بندی شد. سپس به کمک قابلیت‌های مکانی GIS و ترکیب آن با اطلاعات بهینه‌سازی شده، نقشه الگوی کشت مناسب منطقه تهیه گردید.

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که کاربرد روش‌های MCDM در تشخیص گسترش کاربری اراضی در آینده، در مقیاس‌های محلی اندک است. بیشتر پژوهش‌های انجام شده پیشین برای کاربرد MCDM در راستای رتبه‌بندی اولویت گزینه‌های مدیریتی از قبل تعریف شده یا سناریوهای برنامه‌ریزی شده بوده است، مانند: (Bagherzadeh and Bagherzadeh and Gholizadeh, 2017; Gholizadeh, 2016; Rooshanali, 2012; Fattahi et al., 2021). در حالیکه این روش‌ها قادرند نگرشی در راستای گسترش مکانی گزینه‌ها نیز ایجاد کنند (Seyedmohammadi et al., 2018). همچنین باوجود پژوهش‌های بسیاری که در دهه‌های اخیر به کمک بهره‌گرفتن از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در زمینه تعیین تناسب اراضی و اختصاص بهترین الگوی کشت به آن‌ها شده است، راستی‌آزمایی روش‌های کاربردی در مطالعات انتشار یافته در کشور، کمتر مورد بحث قرار گرفته است. هدف از انجام این پژوهش، بررسی کارایی روش تاپسیس در اولویت‌بندی اراضی برای توسعه کشت زعفران در ایران بود. همچنین نتایج این روش، با روش پارامتریک ریشه دوم که یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی تناسب اراضی در ایران است، مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

به منظور انجام این پژوهش، در فاصله سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸، ۱۳۵ مزرعه از مناطق زعفران‌کاری در استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، فارس، مرکزی و کرمان انتخاب شدند. رقم کشت شده در تمامی مناطق، رقم قائن بود. مناطق به گونه‌ای انتخاب شد که بر پایه تجربه سال‌های پیشین کشاورزان و کارشناسان خبره سازمان جهاد کشاورزی، عوامل اقلیمی باعث محدودیت در مقدار کمیّت زعفران نباشد. با این حال به دلیل اهمیت مسائل آب و هوایی و تاثیر آن‌ها در مقدار عملکرد محصولات، به کمک جدول نیازهای رویشی اقلیمی برای زعفران (Zeinadini et al., 2019)، شاخص اقلیم در مناطق مورد مطالعه محاسبه شد. این مناطق شامل شهر کرمان در استان کرمان، تربت حیدریه در خراسان رضوی، قائن در خراسان جنوبی، استهبان در فارس و خمین در استان مرکزی بود. برای این منظور از بانک داده موجود در نرم‌افزار ملی تناسب اراضی شامل آمار هواشناسی و دوره‌های فنولوژی برای گیاه زعفران در هر منطقه استفاده شد (Navidi, 2019). بجز اقلیم، مدیریت کشت نیز بر عملکرد موثر است. بنابراین تلاش شد که مزارع انتخابی از نظر مدیریت (استفاده از نهاده‌ها، کمیّت و کیفیت آب آبیاری) مشابه باشند

نظر، در تعیین ایده‌آل مثبت و منفی تاثیرگذار است. به عنوان مثال اگر معیاری مانند هدایت الکتریکی خاک برای هدفی مانند کشت گیاه، مد نظر باشد، ایده‌آل مثبت گزینه‌ای است که کمترین مقدار شوری را دارا باشد. در زمان تعیین ایده‌آل‌ها، باید به این مسأله در کاربرد روابط ۲ و ۳، توجه داشت چرا که گاهی به جای بیشینه، در نظر داشتن کمینه یک متغیر، ایده‌آل مثبت را نشان می‌دهد.

۵- گام بعدی محاسبه فاصله هر گزینه از ایده‌آل مثبت (D_k^*) و ایده‌آل منفی (D_k^-) است:

$$D_k^* = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{kj}(x) - v_j^+(x)]^2}, k = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$D_k^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [v_{kj}(x) - v_j^-(x)]^2}, k = 1, \dots, n \quad (5)$$

۶- محاسبه ضریب نزدیکی نسبی هر گزینه به ایده‌آل‌ها:

$$C_k^* = \frac{D_k^-}{(D_k^* + D_k^-)}, k = 1, \dots, n \quad (6)$$

که در رابطه ۶: $C_k^* \in [0,1]$ و $\forall k = 1, \dots, n$

۷- در نهایت رتبه‌بندی گزینه‌ها برپایه ترتیب نزولی براساس نزدیکی نسبی گزینه‌ها به ایده‌آل‌ها برای انتخاب بهترین گزینه انجام می‌شود.

پیاده‌سازی روش تاپسیس در نرم‌افزار Microsoft Excel 2016 انجام شد.

وزن‌دهی به معیارها

همانطور که در روش پیاده‌سازی تاپسیس شرح داده شد، وزن معیارهای ارزیابی باید تعیین شوند. هدف از وزن‌دهی به معیارها، تعیین اهمیت هر معیار نسبت به سایرین در راستای رسیدن به هدف پیش رو است. مرتب‌سازی معیارها در یک نظم ترتیبی، ساده‌ترین روش تعیین اهمیت آن‌هاست (Eskandari et al., 2013). در این روش، رتبه‌بندی معیارها می‌تواند توسط گروهی از تصمیم‌گیران انجام شود. بنابراین پس از مشخص شدن ویژگی‌های موثر خاک بر عملکرد زعفران، از یک گروه سه نفره متشکل از افراد متخصص در زمینه کشت زعفران خواسته شد تا معیارهای ارزیابی را براساس اهمیتشان مرتب سازند. سپس با کاربرد رابطه ۷، وزن استاندارد هر معیار مشخص شد (Eskandari et al., 2013):

$$W_k = \frac{n-k+1}{\sum_{i=1}^n (n-i+1)} \quad (7)$$

که در آن W_k معرف وزن استاندارد شده برای معیار k ام، n تعداد معیارهای مورد نظر و k بیانگر موقعیت رتبه‌ای هر معیار است.

تصمیم‌گیری چند معیاره، روشی ساده ولی کارآمد در اولویت‌بندی محسوب می‌شود. این روش را در سال ۱۹۹۲، چن و هوانگ با ارجاع به کتاب هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ مطرح کردند. مفهوم این مدل، انتخاب کوتاه‌ترین فاصله از راه حل ایده‌آل مثبت و دورترین فاصله از راه حل ایده‌آل منفی به منظور حل مسائلی است که با ضوابط تصمیم‌گیری متعدد، رو به رو هستند. از مهم‌ترین امتیازهای این روش، استفاده هم زمان از شاخص‌ها و معیارهای عینی و ذهنی است. همچنین، این روش به تکنیک وزن‌دهی حساسیت کمی دارد (Vafaeinejad, 2016). گام‌های محاسباتی در این روش به طور خلاصه شامل ساخت ماتریس تصمیم و نرمال‌سازی آن، وزن‌دهی به معیارها و ساخت ماتریس وزن‌دار، تعیین ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی، محاسبه فاصله هر گزینه از ایده‌آل‌ها، محاسبه نزدیکی نسبی هر گزینه به ایده‌آل مثبت با محاسبه شاخص رتبه‌بندی و در نهایت اولویت‌بندی یا ارجحیت گزینه‌ها است (Celikbilek and Tuysuz, 2020). این گام‌ها به شرح زیر اجرا می‌شوند (Tzeng and Huang, 1201):

۱- تشکیل ماتریس داده‌ها: نخست باید یک مجموعه از گزینه‌ها شامل $A = \{A_k | k=1, \dots, n\}$ و مجموعه‌ای از معیارها شامل $C = \{C_j | j=1, \dots, m\}$ را به شکل ماتریس داده‌ها با فرمت $X = \{X_{kj} | k=1, \dots, n; j=1, \dots, m\}$ تشکیل داد. سپس مجموعه وزن‌ها برای نشان دادن اهمیت هر معیار به شکل $W = \{W_j | j=1, \dots, m\}$ تهیه می‌شود. وزن‌دهی به معیارها می‌تواند با انواع روش‌های تعیین اهمیت و ارجحیت معیارها نسبت به یکدیگر انجام شود.

۲- نرمال‌سازی ماتریس داده‌ها: استانداردسازی برای بدون بعد کردن معیارها با استفاده از روش نرم اقلیدسی بر پایه رابطه ۱ انجام می‌شود:

$$r_{kj}(x) = \frac{x_{kj}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n x_{kj}^2}}, k = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (8)$$

۳- ایجاد ماتریس نرمال وزن‌دار با اعمال وزن‌های محاسبه شده در گام ۱ (W)

۴- محاسبه نقطه ایده‌آل مثبت (PIS) و نقطه ایده‌آل منفی (NIS) به کمک روابط ۲ و ۳:

$$PIS = A^+ = \{v_1^+(x), v_2^+(x), \dots, v_j^+(x), \dots, v_m^+(x)\} \\ = \{(max_k v_{kj}(x) | j \in J_1), (min_k v_{kj}(x) | j \in J_2) | k = 1, \dots, n\} \quad (9)$$

$$NIS = A^- = \{v_1^-(x), v_2^-(x), \dots, v_j^-(x), \dots, v_m^-(x)\} \\ = \{(min_k v_{kj}(x) | j \in J_1), (max_k v_{kj}(x) | j \in J_2) | k = 1, \dots, n\} \quad (10)$$

در این روابط، J_1 و J_2 هر یک به ترتیب ویژگی‌های سود و زیان هستند. لازم به ذکر است که ماهیت معیارها و تاثیر آن بر هدف مورد

روش پارامتریک ریشه دوم

این روش یکی از روش‌های متداول ارزیابی تناسب اراضی است که در کشور ایران بسیار به کار برده شده است. برای تعیین شاخص خاک در این روش، نخست باید درجات مربوط به خصوصیات مختلف خاک محاسبه گردد. برای این منظور از جدول نیازهای ریشی خاک و زمین‌نما برای زعفران استفاده شد (Zeinadini et al., 2019). حداکثر تعداد ویژگی‌های خاک مورد بررسی، هشت عدد می‌تواند باشد (Sys et al., 1991). شاخص خاک در هر نقطه مطالعاتی به کمک ویژگی‌های مورد نظر خاک با کاربرد رابطه ۸، بدست می‌آید:

$$SI = R_{min} \times \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100} \times \dots} \quad (8)$$

در این رابطه، SI نشان‌دهنده شاخص خاک، R_{min} نشان‌دهنده کمترین درجه اختصاص یافته به ویژگی‌های خاک A و B و ...، نشان‌دهنده درجات مرتبط با سایر ویژگی‌های خاک است (Sys et al., 1991).

اعتبارسنجی

به منظور راستی‌آزمایی اولویت‌بندی گزینه‌ها با روش تاپسیس و شاخص خاک در روش پارامتریک، نتایج بدست آمده در هر دو روش، با مقدار عملکرد واقعی زعفران در هر یک از مزارع (گزینه‌ها) مقایسه شد. ضریب تبیین بدست آمده در هر دو روش، به عنوان پارامتر تعیین دقت مدل‌ها به کار رفت.

نتایج و بحث

تناسب اقلیمی برای کشت زعفران در مناطق مورد مطالعه به کمک نرم‌افزار ملی تناسب اراضی محاسبه شد. مقدار شاخص اقلیم، درجه اقلیمی و عامل محدودکننده (در صورت وجود) و کلاس تناسب اقلیمی هر یک از مناطق مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که شرایط آب و هوایی برای کشت زعفران در تمامی مناطق نسبتاً مشابه و مهم‌تر اینکه بدون محدودیت بوده است. بنابراین عوامل خاکی می‌تواند با اطمینان خاطر برای

اولویت‌بندی اراضی برای کشت زعفران در نمونه‌های خاک جمع‌آوری شده، به کار برده شود.

خلاصه آمار توصیفی داده‌های بدست آمده از ویژگی‌های خاک ۱۳۵ مزرعه زعفران، در جدول ۲ نشان داده شده است. برپایه این جدول، مقدار واریانس برای CCE، پتاسیم قابل جذب، شن، رس و سنگریزه، زیاد بوده و نشان‌دهنده پراکندگی گسترده این داده‌ها است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که زعفران در ایران، در طیف وسیعی از خاک‌ها کشت می‌شود. همچنین دامنه تغییرات CCE بین ۱۳ تا ۶۴ درصد متغیر بود. وجود آهک در خاک به‌طور مستقیم و غیرمستقیم باعث کاهش قابلیت دسترسی بسیاری از عناصر مانند نیتروژن، فسفر، پتاسیم، منیزیم، آهن، منگنز، روی و مس می‌شود (Asadi Kangarshahi et al., 2015). بر اساس جدول نیازهای ریشی خاک و زمین‌نما برای زعفران (Zeinadini et al., 2019)، مقدار مناسب آهک در خاک برای کشت زعفران که باعث کاهش مقدار محصول نشود، تا ۱۵ درصد می‌باشد.

میانگین شوری خاک در مزارع مورد بررسی در حدود ۸/۷ دسی‌زیمنس بر متر بدست آمد و در مورد سدیم قابل تبادل نیز این مقدار در حدود ۱۷/۸ بود. بنابراین مقدار متوسط هر دو متغیر در خاک‌ها از مقدار مجاز برای کشت زعفران که برای شوری، ۴/۵ دسی‌زیمنس بر متر و برای ESP، ۱۵ پیشنهاد شده است (Zeinadini et al., 2022)، بیشتر می‌باشد. در مقابل، مقایسه مقدار متوسط گچ، فسفر و پتاسیم قابل جذب در خاک‌ها با حد بحرانی ارائه شده برای هر یک که باعث کاهش در مقدار عملکرد زعفران می‌شود و به ترتیب برابر است با ۵٪، ۱۸ و ۲۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (Zeinadini et al., 2022)، نشان داد که مقدار این متغیرها در نمونه خاک‌های اخذ شده، نسبتاً مناسب است. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که برای اخذ عملکرد مناسب، سه متغیر درصد آهک، شوری و سدیمی بودن خاک‌ها در زعفران‌کاری‌های کشور، باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱- شاخص و کلاس تناسب اقلیمی برای کشت زعفران در مناطق مورد مطالعه

Table 1- Climate suitability index and class for saffron cultivation in the studied areas

عامل محدودکننده اقلیمی Climatic limiting factor	کلاس تناسب اقلیمی Climatic suitability class	درجه اقلیم Climatic rate	شاخص اقلیم Climate index	ایستگاه هواشناسی Meteorological station
-	S1	88.10	79.36	قائن Qaen
-	S1	86.94	78.01	استهبان Estahban
-	S1	86.04	77.08	تربت حیدریه Torbat Heydariyeh
-	S1	84.68	75.57	کرمان Kerman
-	S1	84.42	75.27	خمین Khomein

جدول ۲- آماره‌های توصیفی داده‌های خصوصیات خاک و عملکرد زعفران

Table 2- Descriptive statistics of soil properties and saffron yield

	دامنه Range	کمینه Minimum	بیشینه Maximum	میانگین Mean	انحراف معیار Std. Deviation	واریانس Variance	چولگی Skewness	کشدگی Kurtosis
آهک CaCO ₃ (%)	51.0	13.0	64.0	37.03	12.78	163.28	0.25	-0.90
گچ Gypsum (%)	20.00	0.00	20.00	5.85	3.98	15.81	1.08	1.32
کربن آلی OC (%)	2.18	0.02	2.20	0.56	0.42	0.18	1.23	1.91
واکنش خاک pH	1.45	7.40	8.85	8.06	0.32	0.10	0.369	-0.01
هدایت الکتریکی EC (dS/m)	24.65	0.35	25.00	8.73	5.36	28.70	0.592	-0.01
درصد سدیم تبادل ESP	43.6	2.4	46.0	17.84	9.90	98.05	0.59	-0.19
پتاسیم در دسترس K _{ava} (mg/kg)	235	115	350	222.81	54.63	2985.03	-0.14	-0.87
فسفر P (mg/kg)	37.5	8.5	46.0	21.88	8.54	73.09	0.53	-0.35
شن Sand (%)	72	25	97	66.76	15.42	237.99	-0.29	0.31
رس Clay (%)	60	2	62	23.68	13.48	181.92	0.50	0.08
سیلت Silt (%)	17	0	17	9.57	3.83	14.67	-0.75	-0.15
سنگریزه Gravel (%)	64	0	64	36.62	15.66	245.30	-0.61	-0.03
عملکرد Yield (g/ha)	12850	800	13650	5686.09	3447.28	11883752.10	0.52	-0.74

هر دو مدل مشابه باشند.

پس از مشخص شدن هفت ویژگی خاک موثر بر عملکرد زعفران، ترتیب نهایی متغیرها توسط تیم تصمیم‌گیرنده به این شکل تعیین شد: هدایت الکتریکی، درصد سدیم قابل تبادل، CCE، درصد سنگریزه، درصد گچ، درصد کربن آلی و در نهایت واکنش خاک. مقدار وزن اختصاص داده شده به هر یک از متغیرها، در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که این جدول نشان می‌دهد، مقدار وزن‌ها برپایه ترتیب اولویت‌بندی معیارهای ارزیابی مشخص شده‌اند. بنابراین مقدار شوری و واکنش خاک به ترتیب بیشترین و کمترین وزن را به خود اختصاص داده است. همانطور که گفته شد با توجه به معیارها و اثر مثبت یا منفی آن‌ها بر گزینه دلخواه، ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی در روش تاپسیس تعیین می‌شوند. به طور مثال در اینجا، همه معیارها بجز واکنش خاک و کربن آلی در حالتی ایده‌آل مثبت هستند که کمترین مقدار را داشته باشند. در مورد کربن آلی کاملاً برعکس است و با بیشتر شدن مقدار آن، شرایط خاک بهتر خواهد بود. برای در نظر داشتن ایده‌آل مثبت در مورد واکنش خاک، مقدار بهینه آن با توجه به

جدول ۳، ضریب همبستگی پیرسون میان ویژگی‌های خاک در

مناطق مورد مطالعه را با عملکرد زعفران نمایش می‌دهد. برپایه این جدول، بیشترین همبستگی میان متغیرها با عملکرد به ترتیب مربوط به درصد سنگریزه، مقدار پتاسیم قابل جذب، سدیمی و شور بودن خاک‌ها، مقدار گچ و CCE، فسفر قابل جذب و مقدار واکنش و کربن آلی خاک است. در تمامی موارد، رابطه قوی و معنی‌دار در سطح یک درصد اطمینان میان عملکرد و متغیرها برقرار بود. رابطه عملکرد زعفران با مقدار کربن آلی خاک، فسفر و پتاسیم قابل جذب، مثبت و با سایر متغیرها، رابطه‌ای منفی داشت. از میان متغیرها، فسفر و پتاسیم که مرتبط با حاصلخیزی است و کمبود آن با کاربرد کودهای مختلف قابل تامین است، کنار گذاشته شد و سایرین برای مدلسازی با تاپسیس و تعیین اولویت گزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت. البته دلیل مهم‌تری نیز برای در نظر نگرفتن فسفر و پتاسیم قابل جذب در مدلسازی با تاپسیس وجود داشت. چراکه این دو متغیر در روش تعیین تناسب اراضی به روش پارامتریک ریشه دوم، مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. لذا به منظور فراهم آوردن شرایط مقایسه، باید ورودی‌های

پژوهش‌های زین‌الدینی و همکاران در نظر گرفته شد (Zeinadini et al., 2022).

در شکل ۱، ترتیب اولویت‌های ۱۳۵ گزینه به روش تاپسیس و مقدار عملکرد واقعی زعفران در هر یک، نشان داده شده است. از این نتایج استنباط می‌شود که روش تاپسیس توانسته با دقتی قابل‌ملاحظه ($R^2=0.91$) هر یک از گزینه‌ها را برپایه مقدار عملکرد مورد انتظار، مرتب سازد. پیش از این نیز دقت روش تاپسیس در مطالعات ارزیابی تناسب اراضی توسط پژوهشگران مختلف نشان داده شده بود (Tale Jenekanlou et al., Seyedmohammadi et al., 2017; 2015). دقت بالای این روش را می‌توان به دلیل استفاده از روابط و ماتریس‌های ریاضی، استانداردسازی داده‌ها به روش نرم اقلیدسی و

ماهیت مقایسه توأم فاصله از ایده‌آل مثبت و منفی دانست (Seyedmohammadi et al., 2017). همچنین این نتایج نشان می‌دهد که روش وزن‌دهی رتبه‌بندی، به خوبی با روش تاپسیس هماهنگ شده است. بنابراین لازم نیست که برای وزن‌دهی به معیارها در روش تاپسیس، منحصراً از دو روش AHP و یا آنترپی‌شانون استفاده نمود (Sarmadian and Ghavami, 2020). پر واضح است که سایر روش‌های وزن‌دهی نیز قابلیت همراهی با روش تاپسیس را دارند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش تاپسیس قادر است به خوبی از تعداد گزینه‌های بسیار زیاد و معیارهای مختلف که اثر منفی یا مثبت روی اولویت گزینه‌ها دارند، استفاده کند.

جدول ۳- نتایج همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل و عملکرد زعفران
Table 3- Pearson correlation results between independent variables and saffron yield

	عملکرد	آهک	گچ	کربن آلی	واکنش	هدایت	سدیم	پتاسیم	فسفر	شن	رس	سیلت	سنگریزه
	Yield(g/ha)	CaCO ₃ (%)	Gypsum(%)	OC(%)	pH	EC(dS/m)	قابل تبادل	K.ava(mg/kg)	P(mg/kg)	Sand(%)	Clay(%)	Silt(%)	Gravel(%)
عملکرد	1												
آهک	-0.874**	1											
گچ	-0.887**	0.897**	1										
کربن آلی	0.687**	-0.644**	-0.620**	1									
واکنش خاکی	-0.732**	0.829**	0.817**	0.550**	1								
هدایت الکتریکی	-0.913**	0.929**	0.965**	0.641**	0.822**	1							
سدیم قابل تبادل	-0.919**	0.941**	0.967**	0.661**	0.821**	0.987**	1						
پتاسیم در دسترس	0.929**	-0.916**	-0.898**	0.642**	0.760**	-0.909**	0.924**	1					
فسفر	0.774**	-0.920**	-0.758**	0.563**	0.754**	-0.804**	0.828**	0.831**	1				
شن	-0.076	0.156	0.136	-0.224*	0.090	0.129	0.148	-0.106	-0.142	1			
رس	0.053	-0.136	-0.076	0.205*	-0.054	-0.072	-0.095	0.089	0.158	-0.974**	1		
سیلت	0.119	-0.151	-0.280**	0.180	-0.172	-0.265**	0.260**	0.115	0.016	-0.599**	0.401**	1	
سنگریزه	-0.969**	0.910**	0.893**	0.720**	0.784**	0.928**	0.933**	-0.898**	-0.809**	0.113	-0.079	-0.178	1

*Correlation is significant at the 0.05 level.

**Correlation is significant at the 0.01 level.

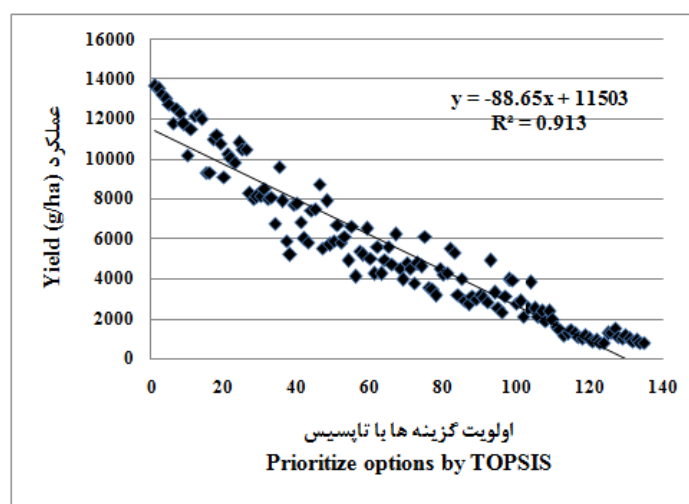
*همبستگی در سطح ۵ درصد معنی‌دار است.

**همبستگی در سطح یک درصد معنی‌دار است.

جدول ۴- مقدار وزن اختصاص داده شده به هر یک از ویژگی‌های خاک موثر در عملکرد زعفران

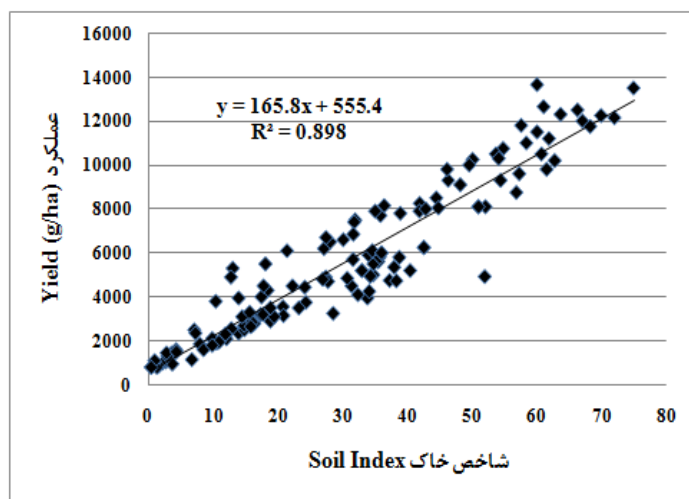
Table 4- The quantity of weights assigned to each of the soil properties affecting saffron yield

	آهک	گچ	کربن آلی	واکنش خاک	هدایت الکتریکی	سدیم قابل تبادل	سنگریزه
	CaCO ₃ (%)	Gypsum(%)	OC(%)	pH	EC(dS/m)	ESP	Gravel(%)
وزن معیارها Weights	0.19	0.1	0.04	0.01	0.28	0.24	0.14



شکل ۱- رابطه عملکرد زعفران با رتبه‌بندی گزینه‌ها (مزارع) به روش تاپسیس

Figure 1- Relationship between saffron yield and ranking alternatives (farms) by TOPSIS method



شکل ۲- رابطه شاخص خاک به روش پارامتریک ریشه دوم و عملکرد زعفران

Figure 2- Relationship between soil index by square root parametric method and saffron yield

قادر است حداکثر هشت معیار را در نظر گیرد، برتری دارد. نتایج حاصل از محاسبه شاخص خاک در ۱۳۵ نقطه مطالعاتی به روش پارامتریک ریشه دوم در مقابل عملکرد واقعی زعفران، در شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش پارامتریک نیز

هرچند که در این پژوهش تنها از هفت معیار برای اولویت‌بندی گزینه‌ها استفاده شد، لیکن این روش به خوبی قادر است تعداد بالای معیارهای ارزیابی را نیز مدیریت نماید (Tzeng and Huang, 2011). بنابراین از این نظر نیز نسبت به روش پارامتریک که تنها

مدّ نظر قرار گیرد. برپایه تحلیل‌های آماری، ویژگی‌های درصد سنگریزه، مقدار پتاسیم قابل جذب، سدیمی و شور بودن خاک‌ها، مقدار گچ و آهن، فسفر قابل جذب، واکنش و کربن آلی خاک، بیشترین اثر را بر مقدار عملکرد زعفران داشت. وزن‌دهی به معیارها به روش رتبه‌بندی توانست به خوبی در کنار روش تاپسیس به کار گرفته شود. اولویت‌بندی ۱۳۵ گزینه برای کشت زعفران نیز نشان داد که روش تاپسیس قادر است به خوبی ارجحیت گزینه‌ها را نسبت به یکدیگر مشخص نماید. دقت بالای این روش ناشی از روابط منطقی و مقایسه گزینه‌ها از هر دو ایده‌آل مثبت و منفی است. همچنین این روش می‌تواند برخلاف برخی دیگر از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به خوبی تعداد بالای گزینه‌ها را مدیریت کرده و آن‌ها را اولویت‌بندی نماید. روش تاپسیس در مقایسه با روش متداول ارزیابی تناسب اراضی موسوم به مدل پارامتریک ریشه دوم، به دلیل سادگی کاربرد و وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی، توانمندی بیشتری در اولویت‌بندی گزینه‌ها از خود نشان داد. همچنین به دلیل توانایی در نظر داشتن تعداد بیشتر معیارهای ارزیابی نسبت به روش پارامتریک، در مسائل با معیارهای زیاد (مسائلی درگیر با معیارهای مختلف آب و هوایی، مدیریتی، کمیت و کیفیت آب در دسترس و خصوصیات خاک و اراضی)، استفاده از این روش پیشنهاد می‌شود. از آنجا که روش تاپسیس قادر است به خوبی اراضی در نظر گرفته شده برای توسعه کشت محصولات کشاورزی را اولویت‌بندی نماید، استفاده از این روش در مطالعات آتی انتخاب اراضی مناسب، قابل توصیه است.

سپاسگزاری

بخشی از داده‌های این مقاله از پروژه تحقیقاتی با عنوان "تعیین نیازهای رویشی برای زعفران در استان‌های فارس، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و مرکزی" موسسه تحقیقات خاک و آب با شماره مصوب ۰۹۶۵۰۳-۹۶۵۲-۰۹۴۵۲-۰۵۹-۱۰-۰۱، برداشت شده است. نویسندگان این مقاله بدین وسیله از حمایت‌های موسسه تحقیقات خاک و آب، صمیمانه تشکر می‌نمایند.

به خوبی و با دقت قابل قبول ($R^2=0.90$) توانسته است شاخص خاک را در اراضی مورد مطالعه، تعیین نماید. این نکته حائز اهمیت است که در روش پارامتریک، از جدول نیازهای رویشی زعفران استفاده شد که بومی کشور ایران است. این جدول، برپایه مطالعات و پژوهش‌های پیشین که در کشور ایران انجام شده، تهیه شده است (Zeinadini et al., 2019). بنابراین انتظار می‌رود که برای شرایط حاکم بر خاک‌های کشور و نوع غالب رقم مورد کشت بتواند نتایج مناسبی را ارائه دهد. با این حال، وزن‌دهی به معیارها در روش پارامتریک مدّ نظر قرار نمی‌گیرد و تمامی معیارها یکسان فرض می‌شوند. همچنین برای کاربرد این روش باید بر اصول اولیه و چگونگی تعیین درجه متناسب با هر یک از خصوصیات خاک، اشراف داشت. با در نظر داشتن این موارد، می‌توان چنین نتیجه گرفت که اگر هدف، تعیین اولویت گزینه‌ها برای اختصاص به کاربری مشخصی باشد، روش تاپسیس از توانمندی بیشتری برخوردار است. چراکه کاربرد این روش، بسیار ساده بوده و به کمک یک نرم‌افزار صفحه گسترده مانند اکسل، بدون نیاز به تخصص ویژه مانند آشنایی با زبان‌های برنامه‌نویسی، قابل کاربرد است. تنها نکته‌ای که باید مدّ نظر پژوهش‌گران قرار گیرد، استفاده از دانش و تجربه افراد خبره در وزن‌دهی به معیارهای ارزیابی است. در شرایط تصمیم‌گیری برای تعیین اولویت گزینه‌ها با تعداد زیاد و با در دست داشتن معیارهای مختلف ناهم‌هنگ، استفاده از روش تاپسیس پیشنهاد می‌شود. از سویی دیگر، در مسائلی که نیاز به ارزیابی‌های کمی و تخمین مقدار عملکرد محصول را دارند، روش پارامتریک قابل توصیه است.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که با در نظر داشتن حدّ آستانه کاهش عملکرد در زعفران، سه ویژگی خاک شامل شوری، سدیمی و آهنی بودن، از اهمیتی ویژه برخوردارند. لذا برای اخذ عملکرد بیشتر در اراضی تحت کشت زعفران در کشور، برای اینگونه خاک‌ها باید مدیریتی مناسب به کار برده شود. به عنوان مثال، مدیریت تغذیه گیاهی و حاصلخیزی خاک برای خاک‌های آهنی در این اراضی باید

منابع

- Asadi Kangarshahi A., AkhlaghiAmiri N., and Samar M. 2015. Possibility of Using Chlorosis Degree and Active Iron (Fe^{2+}) to Assess the Tolerance of Some Citrus Rootstocks to Calcareous Soils. Iranian Journal of Soil Research 29(3): 296-284. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22092/ijsr.2015.103433>.
- Bagherzadeh A., and Gholizadeh A. 2016. Modeling land suitability evaluation for wheat production by parametric and TOPSIS approaches using GIS, northeast of Iran. Modeling Earth Systems and Environment. 2(126). <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0177-8>.
- Bagherzadeh A., and Gholizadeh A. 2017. Parametric-based neural networks and TOPSIS modeling in land suitability evaluation for alfalfa production using GIS. Modeling Earth Systems and Environment 3(2): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0263-y>.
- Celikbilek Y., and Tuysuz F. 2020. An in-depth review of theory of the TOPSIS method: An experimental

- analysis. *Journal of Management Analytics* 7(2): 281-300. <https://doi.org/10.1080/23270012.2020.1748528>.
5. Eskandari M., Homaei M., Mahmodi S., and Pazira E. 2013. A New Landfill Siting Method Based on Land Classification Maps and GIS. *Environmental Sciences* 11(2): 121-132. (In Persian with English abstract). https://envs.sbu.ac.ir/article_95068.html.
6. Eskandari M., Homaei M., and Mahmoodi S. 2013. Optimized Approach for MSW Landfill Siting Using MCDA and GIS. *Environmental Sciences* 11(3): 41-54. (In Persian with English abstract). https://envs.sbu.ac.ir/article_97284.html.
7. FAO. 1976. A Framework for Land Evaluation. FAO Soils Bulletin No. 32. Rome.
8. Fattahi M., Mahdavi R., Rezaei M., and Esmailpour Y. 2021. Determination of optimal cultivation pattern of medicinal plants using AHP-TOPSIS hybrid model (Case study: Qom province). *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research* 36(6): 885-897. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.342346.2749>.
9. Ghiasvand A. 2016. Application of statistics and SPSS software in data analysis. 4th Ed. Motefakkeran Publications. (In Persian)
10. Kazemi H., and Akinci H. 2018. A land use suitability model for rainfed farming by Multi-criteria Decision-making Analysis (MCDA) and Geographic Information System (GIS). *Ecological Engineering* 116: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.02.021>.
11. Mohammadi J. 2006. *Pedometry: Classical Statistics*. Volume One, Pelk Publications, Tehran. (In Persian)
12. Navidi M.N. 2019. Design and preparation of land suitability evaluation software for field and orchard crops of the country. Soil and Water Research Institute. (In Persian with English abstract). <https://nlss.ir/Home/AboutUs>.
13. Pilevar A.R., Matinfar H.R., Sohrabi A., and Sarmadian F. 2020. Integrated fuzzy, AHP and GIS techniques for land suitability assessment in semi-arid regions for wheat and maize farming, *Ecological Indicators* (110): 105887. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105887>.
14. Rooshanali M. 2012. Land suitability evaluation model based on the elements of the climate for the cultivation of rapeseed TOPSIS: A Case Study of Mazandaran province. *Journal of Urban Ecology Researches* 3(6): 67-80. (In Persian with English abstract). https://grup.journals.pnu.ac.ir/article_1119.html?lang=en.
15. Sarmadian F., and Ghavami M. 2020. Land Suitability Evaluation Using TOPSIS Method and Its Comparison with Parametric Methods for Maize Production in Part of Qazvin. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(9): 2275-2287. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.273788.668095>.
16. SeyedJalali S.A., Dehghan R., Azadi A., Zaeinaldini Mimand A., Navidi M.N., and Mohammad Esmaeil Z. 2020. Investigation of the effect of soil factors on sugarcane growth in sugarcane cultivated lands in khuzestan and mazandaran provinces. *Soil Research* 34(3): 343-357. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22092/ijsr.2020.343172.532>.
17. Seyedjalali S.A., Eskandari M., Roshani G., Navidi M., Zareian G., Zeinadini Meymand A., and Ghasemzadeh Ganjehie M. 2021. Determining Soil and Landscape Requirements of cotton for Using in Land Suitability Evaluation. *Iranian Journal of Cotton Researches* 9(1): 69-88. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/ijcr.2021.352985.1162>.
18. Seyedmohammadi J., Jafarzadeh A.A., Sarmadian F., Shahbazi F., and Ghorbani M.A. 2017. Comparing the Efficiency of TOPSIS, AHP and Square Root Methods in Cultivation Priority Determination for Wheat, Barley and Maize under Sprinkler Irrigation in Dasht-e-Moghan. *Water and Soil Science* 27(2): 45-59. (In Persian with English abstract)
19. Seyedmohammadi J., Sarmadian F., Jafarzadeh A.A., Ghorbani M.A., and Shahbazi F. 2018. Application of SAW, TOPSIS and fuzzy TOPSIS models in cultivation priority planning for maize, rapeseed and soybean crops. *Geoderma* 310: 178-190. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.012>.
20. Sys C., Van Ranst E., and Debaveye I.J. 1991. Land evaluation. Part I: principles in land evaluation and crop production calculations. General Administration for Development Cooperation, Agricultural Publication-No. 7, Brussels, Belgium, p 274.
21. Tale Jenekanlou A., Karimi M., and Taleai M. 2015. Residential Land Suitability Assessment Using Fuzzy Group TOPSIS-OWA. *Journal of Geomatics Science And Technology* 4(4) :29-46. <http://jgst.issge.ir/article-1-82-fa.html>.
22. Tzeng G., and Huang J. 2011. *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. CRC Press, Taylor and Francis Group, A Chapman and Hall Book, Boca Raton.
23. USDA. 2012. Field Book for Describing and Sampling Soils. Version 3, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
24. USDA. 2014. Kellogg Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 42, Version 5. R. Burt and Soil Survey Staff (ed.). United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
25. Vafabakhsh J. 2003. Finding the potential of saffron cultivation areas in Iran. Mashhad, Publications of Scientific and Industrial Research Organization of Khorasan Center. Pages 99-108. (In Persian)

26. Vafaeinejad A. 2016. Cropping Pattern Optimization by Using of TOPSIS and Genetic Algorithm Based on the Capabilities of GIS. *Iranian Journal of Ecohydrology* 3(1): 69-82. (In Persian with English abstract). <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2016.59191>.
27. Wang P., Zhu Z., and Huang S. 2017. The use of improved TOPSIS method based on experimental design and Chebyshev regression in solving MCDM problems, *Journal of Intelligent Manufacturing* 28(1): 229-243. <https://doi.org/10.1007/s10845-014-0973-9>.
28. Zeinadini A., Navidi M., Asadi Kangarshahi A., Eskandari M., Seyedjalali S., Salmanpour A., Seyedmohammadi J., Ghasemi M., Ghaffarinejad S., and Zareian G. 2021. Effect of Soil Characteristics on Yield and Preparing the Crop Requirements Table of Oranges in Selected Areas of Iran. *Water and Soil*, 35(3): 395-407. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2021.68421.1017>.
29. Zeinadini A., Navidi M., Eskandari M., Seyedmohammadi J., Toomanian N., Hosseinifard S., Farajnia A., and GhasemzadehGanjehie M. 2020. Determination of Soil and Landscape Requirements of Pistachio for Use in Land Suitability Evaluation. *Journal of Pistachio Science and Technology* 5(9): 70-88. (In Persian with English abstract). http://pistachio.vru.ac.ir/article_119177.html?lang=en.
30. Zeinadini A., Navidi M.N., Seyedmohammadi J., Jafari M., Salmanpour A., Eskandari M., Moghimi A., and Fatehi Sh. 2021. Investigating the effect of land characteristics on yield and rating of fig vegetative requirements in important cultivated areas. *Iranian Journal of Horticultural Science and Technology* (Accepted). (In Persian with English abstract). <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807154.1400.22.2.8.1>.
31. Zeinadini A., Navidi M.N., Eskandari M., Seyedjalali S., Seyed Mohammadi J., Moghimi A., Gasemzade Ganjehie M., Moghri A., and Pahlavanrad M. 2022. Investigation of land characteristics and preparation of soil requirements table for saffron. *Saffron Agronomy and Technology* 9(4): 395-408. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22048/jsat.2021.286314.1426>.
32. Zeinadini A., Seyedjalali S., Navidi M., Eskandari M., Seyedmohammadi J., Dialami H., Moghimi A., and Pozeshshirazi M. 2020. Preparation of soil and landscape requirements table for Date palm to use in land suitability evaluation. *Journal of Water and Soil Conservation* 27(5): 89-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.17510.3297>.
33. Zeinadini A., Toomanian N., Navidi M.N., Farajnia A., and SeyedJalali A.R. 2019. horticultural crops requierments. *Soil and Water Research Institute. Karaj*. 310p. (In Persian)



Kinetics and Thermodynamics of Phosphorus Adsorption onto a Clay Soil Influenced by Various Environmental Parameters

B. Kamali¹, A. Sotoodehnia^{2*}, A. Mahdavi Mazdeh³

Received: 01-01-2022

Revised: 19-01-2022

Accepted: 18-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Kamali B., Sotoodehnia A., and Mahdavi Mazdeh A. 2022. Kinetics and Thermodynamics of Phosphorus Adsorption onto a Clay Soil Influenced by Various Environmental Parameters. Journal of Water and Soil 36(2): 251-266. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74179.1124](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74179.1124)

Introduction

Phosphorus is an essential soil nutrient that plays key roles in plant growth and development. Limited availability of P is the main constraint for crop production in many soils. Long-term phosphate fertilizers application in agricultural areas to increase the physiological efficiency of crops can lead to a significant P accumulation. The process of P fixation or sorption includes precipitation and adsorption onto mineral and organic surfaces. Various factors such as clay content, organic matter, exchangeable Al, Fe, Ca content and pH soil affect P sorption capacity. In order to achieve the proper management of P fertilization, it is necessary to understand the mechanism of the sorption process and the contributing factors, as well as how to influence these factors. Qazvin plain is one of the most important agricultural plains in Iran, playing a pivotal role in maintaining national food security. Cultivating crops such as wheat, barley, alfalfa and corn in different areas of this plain is widespread. Therefore, high amounts of phosphate fertilizers are applied in this plain every year. In this study, the kinetic and equilibrium adsorption of P in a heavy textured agricultural soil sample in Qazvin plain were investigated under the influence of some different environmental parameters.

Materials and Method

In order to conduct the kinetic adsorption experiment, one gram soil samples were placed in the shaker in contact with 25 ml of 0.01 M CaCl₂ solution containing 20 mg P l⁻¹. Time intervals were 0.17, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 24, 48 and 72 hours. The effects of temperature (12, 25, 38 °C), salinity (0, 8.96, 17.02, 32.09, 46.25 dS m⁻¹), pH (2.5, 3.5, 5.36, 7.5, 9.5, 11.5) and the type of background solution (distilled water and 0.01 M CaCl₂ solution) were also investigated on P equilibrium adsorption. In the equilibrium batch experiments, the soil samples were placed in contact with the background solutions containing 0, 15, 20, 30, 50, 80 and 100 mg P l⁻¹ (ratio 1:25) for 24 hours. The concentration of P in the samples was determined by a spectrophotometer after passing through the filter. The amount of P adsorption to each soil sample was then calculated based on the concentrations. The experiments were carried out in the factorial and completely randomized designs with three replications for each treatment. Using CurveExpert 1.4 software, the Langmuir and Freundlich isotherms, as well as the pseudo-first-order, pseudo-second-order, the Elovich and Intra-particle diffusion models were fitted to the obtained laboratory data. Statistical analysis of experimental data was done based on the Tukey test at 5% level using Minitab software. The thermodynamics of P adsorption was also determined by examining parameters of the Gibbs free energy, enthalpy and entropy changes.

Results and Discussion

According to the results, the highest amount of adsorption occurred in the first 8 hours of soil contact with P solution, and approximate time of achieving the equilibrium conditions was 24 to 48 hours. The process of P adsorption onto soil particles consisted of two fast and slow stages until the equilibrium was reached. The kinetic

1, 2 and 3- Ph.D. Graduate and Associate Professors of Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: a.sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir)

adsorption properties of the studied soil was best described by the Elovich equation ($r^2=0.964$). The Freundlich model showed better fit than the Langmuir equation to the equilibrium data. The effects of all four parameters of temperature, salinity, pH and background electrolyte solution on the P equilibrium adsorption were significant. By changing the temperature from 25 to 38 °C, q_m (Langmuir coefficient) was 2.1 times. It was also 7.5 times under the conditions of using CaCl_2 solution instead of distilled water. Increasing pH caused an increase in adsorption rate and the highest amount of adsorption changes occurred in the pH varying between 5.36 and 7.5. However, the highest and lowest P adsorption percentage with the values of 45 and 37% were related to zero and 46.25 dS m^{-1} salinity, respectively. The results also indicated that the sorption process was endothermic and spontaneous.

Conclusion

Adjusting and controlling the studied parameters in the soil during the application of phosphate fertilizers can optimize P use efficiency and increase crop yield in the studied area. Based on the results of the present study, it is recommended to add sulfur, ammonium sulfate, ammonium nitrate fertilizers and organic compounds to the studied calcareous soil with high pH and low salinity. Application of this method can reduce soil pH, which leads to a decreased P sorption onto the soil particles and an enhanced P availability for plants. Adjusting the P fertilization time with the crop growth and uptake is also recommended due to the high adsorption of P onto the soil particles in a short period of time.

Keywords: Adsorption kinetics, Electrolyte solution, Phosphorus, Salinity, Thermodynamics

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۶۶-۲۵۱

سینتیک و ترمودینامیک جذب فسفر در یک خاک رسی تحت تأثیر پارامترهای محیطی مختلف

بهروش کمالی^۱ - عباس ستوده نیا^{۲*} - علی مهدوی مزده^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۹

چکیده

بررسی و پیش‌بینی فرآیند جذب فسفر در خاک نقش بسزایی در ارائه راهکارهای کاربردی برای کاهش تجمع فسفر مصرفی و افزایش قابلیت دسترسی آن برای محصولات کشت شده دارد. در این مطالعه، سینتیک جذب و همپتور اثرات دما در سه سطح (۱۲، ۲۵ و ۳۸ درجه سانتی‌گراد)، شوری در پنج سطح (۰، ۸/۹۶، ۱۷/۰۲، ۳۲/۰۹ و ۴۶/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر)، pH در شش سطح (۲/۵، ۳/۵، ۴/۵، ۵/۵، ۷/۵، ۹/۵ و ۱۱/۵) و نوع محلول زمینه حاوی فسفر (آب مقطر و محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار) بر روی جذب تعادلی فسفر در یک خاک کشاورزی منطقه مهدی آباد دشت قزوین با استفاده از آزمایش رآکتوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که معادله الیوویج بالاترین همبستگی ($r^2=0.964$) را با داده‌های آزمایشگاهی سینتیک جذب داشت و بیش‌ترین میزان جذب در ۸ ساعت اول تماس خاک با محلول فسفر اتفاق افتاد. با تغییر دما از ۲۵ به ۳۸ درجه سانتی‌گراد حداکثر ظرفیت جذب ۲/۱ برابر و در شرایط استفاده از محلول الکترولیت کلسیم کلرید به جای آب مقطر حداکثر ظرفیت جذب ۷/۵ برابر بود. این عوامل از طریق تأثیرگذاری بر روی قدرت تبادل یونی منجر به تغییر مقدار جذب فسفر بر روی سطوح جاذب شده‌اند. کاهش شوری و افزایش pH نیز از طریق ایجاد تغییر در تعداد آنیون‌های موجود در محلول و نوسان در بار سطوح جاذب، افزایش معنی‌دار در مقدار جذب را موجب گردیده و بیشترین مقدار تغییرات در جذب، بین pH ۵/۳۶ تا ۷/۵ اتفاق افتاد. نتایج بررسی ترمودینامیک جذب نیز بیانگر گرماگیر و خود به خودی بودن فرآیند جذب بود.

واژه‌های کلیدی: ترمودینامیک، سینتیک جذب، شوری، فسفر و محلول الکترولیت

مقدمه

فسفر در مقایسه با دیگر عناصر غذایی پرمصرف، دارای حداقل تحرک و قابلیت دسترسی برای گیاهان در اکثر خاک‌ها است؛ از این رو غالباً عامل اصلی و اولیه محدود کننده رشد گیاه به حساب می‌آید. به منظور افزایش عملکرد فیزیولوژیکی گیاه در مناطق کشاورزی هر ساله مقادیر بالایی از کودهای فسفاتی مصرف می‌شود که بیش‌تر فسفر اضافه شده به دلیل فرآیندهای جذب و تثبیت مورد استفاده گیاه قرار نمی‌گیرد (Sedri, 2011). همچنین، تلفات فسفر تجمع یافته در پروفیل خاک از طریق رواناب، آبشویی یا فرسایش خاک می‌تواند منجر به فرآیند بهرپوری^۴ و کاهش کیفیت آب‌های سطحی گردد (Ngatia et al., 2014; Safari Sinegani and Hamdi et al., 2014).

(Tirado and Allsopp, 2012; 2019). برای درک دینامیک فسفر

خاک و چگونگی چرخه آن در سیستم‌های زراعی؛ آشنایی با فرآیند جذب، مکانیسم‌های مربوط به آن و مدل‌های توصیف کننده این فرآیند (ایزوترم‌های جذب) ضروری به نظر می‌رسد (Hamdi et al., 2014; Maguire et al., 2001).

ولدی و هایلی (Wolde and Haile, 2015) در مطالعه‌ای حداکثر ظرفیت جذب را برای چند نمونه‌ی خاک جنوب اتیوپی با بافت‌های لومی، لوم رسی و لوم سیلتی در محدوده‌ی ۵۶۰ تا ۸۳۳ میلی گرم فسفر در کیلوگرم خاک گزارش کردند و آلومینوم قابل تبادل و آهن قابل استخراج را دو عامل اصلی مسبب ظرفیت جذب بالا در این خاک‌ها برشمردند. فینک و همکاران (Fink et al., 2016) و ظفر و همکاران (Zafar et al., 2016) در مطالعاتی جداگانه بر روی

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته دکتری و دانشیاران گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
(*) نویسنده مسئول: Email: a.sotoodehnia@eng.ikiu.ac.ir

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور انجام مطالعات جذب فسفر، یک نمونه خاک رسی از یک منطقه کشاورزی با طول و عرض جغرافیایی $36^{\circ} 52' 36''$ و $49^{\circ} 11' 09''$ در روستای مهدی‌آباد واقع در شمال دشت قزوین برداشت شد. مطابق با آمار اداره تحقیقات هواشناسی استان قزوین در سال ۱۳۹۵، اقلیم منطقه مورد مطالعه از نوع نیمه خشک سرد و متوسط دما و میانگین بارش سالانه به ترتیب ۱۴-۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۳۳۰-۲۷۰ میلی‌متر می‌باشد. در اواخر بهار سال ۱۳۹۷، نمونه‌های خاک از سه نقطه مجزا در محدوده مورد نظر و از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری برداشت شد و پس از مخلوط شدن با هم و خشک شدن در معرض هوا، آزمایش‌های مربوط به خاک و جذب فسفر روی آن صورت گرفت. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ی خاک مورد مطالعه در **جدول ۱** آورده شده است. تعیین بافت خاک با استفاده از آزمایش دانه‌بندی و هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986) و اندازه‌گیری pH در گل اشباع و EC در عصاره گل اشباع خاک مربوطه با استفاده از pH متر و EC متر صورت گرفت (Rhoades, 1996; Thomas, 1996). آهن قابل دسترس توسط محلول DTPA استخراج شده و اندازه‌گیری غلظت آن به وسیله دستگاه جذب اتمی صورت گرفت (Lindsay and Norrvell, 1978). غلظت کلسیم قابل تبادل در خاک براساس درصد کربنات کلسیم خاک و به روش تیتراسیون (Loeppert and Suarez, 1996) و درصد ماده آلی خاک (کربن آلی) به روش اکسیداسیون تر والکی بلک تعیین شدند (Walkley and Black, 1934). اندازه‌گیری فسفر کل نیز براساس روش هضم با اسید نیتریک و اسید پرکلریک و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر صورت گرفت (Murphy and Riley, 1962; Sparks, 1996).

آزمایش سینتیک جذب فسفر

به منظور بررسی سینتیک جذب، مقدار فسفر جذب شده پس از ۱۷/۰، ۵/۰، ۱، ۲، ۴، ۸، ۱۶، ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت تماس فسفر محلول با نمونه خاک اندازه‌گیری شد. در این راستا، یک گرم خاک خشک و عبور داده شده از الک ۲ میلی‌متر از نمونه مورد نظر وزن شد و به ظرف ۶۰ میلی‌لیتری منتقل شد. محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلرید (CaCl_2) حاوی غلظت فسفر ۲۰ میلی گرم در لیتر از منبع منو فسفات پتاسیم (KH_2PO_4) پایه تهیه شده و مقدار ۲۵ میلی‌لیتر از آن به منظور ایجاد نسبت ۱:۲۵ خاک به محلول به هریک از نمونه‌های خاک اضافه گردید.

خاک‌های نیمه‌گرمسیری جنوب برزیل به نقش عملیات کشاورزی و روش مدیریت خاک بر جذب فسفر به دنبال تأثیر پذیری خصوصیات فیزیکی خاک از این عوامل اشاره نمودند. ژانگ و هوانگ (Zhang and Huang, 2011) در مطالعه‌ای اعلام کردند که با افزایش دما و کاهش شوری، مقدار جذب فسفر در رسوبات شبه جزیره فلوریدا افزایش یافته و تأثیر این عوامل به مقدار فسفر قابل تبادل در رسوب وابسته بود. بای و همکاران (Bai et al., 2017) گزارش نمودند که در سه نوع خاک باتلاقی چین، افزایش pH و دما در محدوده‌های پایین (pH کمتر از ۵/۵، ۶/۲، ۵/۲ و دمای کمتر از ۳۶/۸، ۱۹/۴ و ۵۸/۶ درجه سانتی‌گراد)، افزایش در مقدار جذب فسفر را به دنبال دارند؛ در حالیکه مقادیر بیش از حدود آستانه ذکر شده در بالا در این پارامترها منجر به کاهش جذب در خاک‌های مورد بررسی می‌گردد. رگان و اندرسون (Regan and Andersen, 2013) به منظور بررسی سینتیک جذب در خاک‌های لومی، لوم سیلتی و رس سیلتی برداشت شده از مناطقی در ایالت آیووا آمریکا، اثر بازه‌های زمانی یک تا ۲۸ روز تماس خاک با محلول فسفر بر جذب را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه‌ی آن‌ها نشان داد که زمان تماس نسبتاً کوتاهی (۱، ۵ و ۱۰ روز) برای جذب فسفر به وسیله خاک نیاز است. سانتوس و همکاران (Santos et al., 2011)، حمدی و همکاران (Hamdi et al., 2014)، ماگویر و همکاران (Maguire et al., 2001) و چونگ و ونکی‌تاچالام (Cheung and Venkitachalam, 2006) نیز بر بیشتر بودن سرعت جذب فسفر در مرحله اول تماس با خاک و ادامه‌دار بودن این فرآیند در مدت زمان نسبتاً طولانی اشاره داشتند. صفری سینجانی و صدری (Safari Sinangani and Sedri, 2011) در مطالعه‌ای اثرات دما و فعالیت میکروبی را بر سینتیک جذب و قابلیت دسترسی فسفر در دو نوع نمونه خاک سطحی از استان‌های گیلان (pH بین ۵/۹ تا ۶/۸) و همدان (pH بین ۷/۸ تا ۸) مورد ارزیابی قرار داده و جذب بیش‌تر فسفر توسط خاک‌های منطقه معتدل در مقایسه با خاک‌های منطقه نیمه خشک را گزارش نمودند. معاضد و همکاران (Moazed et al., 2010) در آزمایشی که طی دو فصل زراعی و به منظور ارزیابی خصوصیات مرتبط با جذب فسفر در چندین نمونه خاک اسیدی واقع در شهر امیدیه صورت گرفت، کربن آلی، pH خاک و مقادیر کلسیم و آلومینیوم قابل تبادل را عوامل مؤثر بر تفاوت مقادیر فسفر جذب شده در خاک‌های مختلف اعلام نمودند.

دشت قزوین از مهم‌ترین دشت‌های کشاورزی ایران به شمار می‌رود و کشت انواع محصولات زراعی از قبیل گندم، جو، یونجه و ذرت و به تبع آن مصرف کودهای فسفر در این دشت به طور گسترده صورت می‌گیرد. هدف از این مطالعه، ارزیابی سینتیک جذب و همین‌طور اثر پارامترهای محیطی مختلف بر جذب تعادلی فسفر در یک نمونه خاک کشاورزی منطقه مهدی‌آباد واقع در دشت قزوین بود.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد مطالعه

Table 1- Physicochemical characteristics of the studied soil sample

رس Clay (%)	سیلت Silt (%)	شن Sand (%)	آهن فراهم Fe (mg kg ⁻¹)	کلسیم تبادل Ca (mg kg ⁻¹)	فسفر کل P (mg kg ⁻¹)	ماده آلی Organic matter (%)	کربنات کلسیم CaCO ₃ (%)	pH	EC (dS m ⁻¹)
41	27	32	8	36.7	871	0.83	12.56	8.22	0.66

اثر دما (۱۲، ۲۵ و ۳۸ درجه سانتی‌گراد)، شوری (۰، ۸/۹۶، ۱۷/۰۲، ۳۲/۰۹ و ۴۶/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر)، pH (۲/۵، ۳/۵، ۵/۳۶، ۷/۵ و ۹/۵) و نوع محلول الکترولیت زمینه حاوی فسفر (آب مقطر و محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار) بر جذب تعادلی فسفر بررسی شد. در آزمایش بررسی اثر دما، محلول ۰/۰۱ مولار کلسیم کلرید حاوی غلظت‌های ۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر فسفر و در آزمایش‌های مربوط به شوری و pH، محلول حاوی غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر فسفر با نسبت ۱:۲۵ (نسبت خاک به محلول) به نمونه‌های خاک اضافه شدند. شوری‌های مختلف با اضافه کردن مقادیر متفاوتی از NaCl و pH های مورد نظر نیز با افزودن مقادیر لازم از HCl و NaOH به محلول زمینه ایجاد شدند (در نمونه محلول با pH برابر ۵/۳۶ هیچ گونه اسید یا باز به محلول اولیه اضافه نشد). در آزمایش بررسی اثر نوع محلول الکترولیت نیز نمونه‌های خاک در تماس با دو نوع محلول زمینه حاوی غلظت‌های فسفر مشابه با آزمایش دما قرار گرفتند. با توجه به نتایج آزمایش سینتیک در بخش قبلی در رابطه با زمان حدودی دستیابی به تعادل، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دستگاه شیکر با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه قرار گرفته و غلظت نمونه‌های عبوری از فیلتر صافی در دستگاه اسپکتروفتومتر قرائت شدند. آزمایش‌های جذب مرتبط با بررسی اثر شوری و pH در قالب طرح کاملاً تصادفی صورت گرفت. این در حالی است که در آزمایش‌های جذب مربوط به اثر دما و نوع محلول زمینه از طرح فاکتوریل (دو عاملی) استفاده شد تا اثر عامل غلظت فسفر نیز بر روی مقادیر جذب در نظر گرفته شود. در تمامی آزمایش‌های جذب برای هر تیمار سه تکرار در نظر گرفته شد.

با استفاده از نرم‌افزار CurveExpert ۱/۴ دو ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ بر داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده انطباق داده شد و ضرایب جذب در این معادلات و اثر دما و نوع محلول الکترولیت بر روی این ضرایب مطالعه گردید. ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ به ترتیب در معادلات ۵ و ۶ نمایش داده شده‌اند.

$$q_e = \frac{q_m k_l c_e}{1 + k_l c_e} \quad (5)$$

$$q_e = k_f c_e^n \quad (6)$$

در این معادلات، q_e مقدار فسفر جذب شده در واحد وزن خاک (mg g⁻¹)، c_e غلظت فسفر در محلول تعادلی (mg l⁻¹)، q_m ظرفیت

سه قطره کلروفورم نیز برای جلوگیری از فعالیت میکروبی به هریک از ظرف‌های حاوی نمونه خاک و محلول افزوده شد. نمونه‌های سوسپانسیون خاک در بازه‌های زمانی اشاره شده در دستگاه شیکر با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده و پس از خارج سازی از دستگاه شیکر به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ دور در دقیقه قرار گرفتند و سپس از فیلتر ۰/۴۵ میکرون عبور داده شدند. اندازه‌گیری غلظت فسفر در این محلول‌های شفاف به روش وانادو مولیبدات و با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر در طول موج ۴۷۰ نانومتر صورت گرفت. از تفاضل مقادیر اولیه غلظت و غلظت ثانویه پس از مدت زمان مشخص (mg l⁻¹)، مقادیر فسفر جذب شده به نمونه خاک (mg g⁻¹) در هریک از نمونه‌های مورد مطالعه تعیین گردید (Pierzynski, 2000).

معادلات شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، الوویچ و نفوذ درون ذره‌ای که از متداول‌ترین مدل‌های توصیف کننده سینتیک جذب فسفر در خاک هستند، با استفاده از نرم‌افزار CurveExpert ۱/۴ بر داده‌های آزمایشگاهی جذب منطبق شدند. ضرایب جذب (پارامترهای ثابت) و دقت این معادلات در برآورد سینتیک جذب فسفر در خاک مورد نظر ارزیابی و مقایسه شدند. این معادلات به ترتیب در روابط ۱، ۲، ۳ و ۴ نمایش داده شده‌اند.

$$q_t = q_e [1 - \exp(-k_1 t)] \quad (1)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (2)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(1 + \alpha \beta t) \quad (3)$$

$$q_t = k_p t^{1/2} + c \quad (4)$$

در این معادلات، q_t مقدار فسفر جذب شده در زمان t (mg g⁻¹)، q_e مقدار فسفر جذب شده در حالت تعادل (mg g⁻¹)، k_1 ثابت سینتیک مرتبه اول (min⁻¹)، k_2 ثابت سینتیک مرتبه دوم (g mg⁻¹ min⁻¹)، α ثابت سرعت جذب اولیه الوویچ (mg g⁻¹ min⁻¹)، β ثابت جذب (g mg⁻¹)، k_p ثابت سرعت نفوذ درون ذره‌ای (mg g⁻¹ min^{-1/2}) و c ثابت نفوذ درون ذره‌ای (mg g⁻¹) است (Lopez-Luna et al., 2019; Zhang et al., 2015).

بررسی اثر دما، شوری، pH و نوع محلول زمینه حاوی فسفر بر جذب تعادلی فسفر در خاک

$$s = \sqrt{\frac{\sum(y-x)^2}{n-2}} \quad (11)$$

در اینجا، n تعداد مشاهدات و x و y مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده می‌باشند (Mirzaghaderi et al., 2010).

نتایج و بحث

سینتیک جذب فسفر

نتایج مربوط به ضرایب جذب، ضرایب تعیین و خطای معیار برآورد حاصل از انطباق مدل‌های سینتیک شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم، نفوذ درون ذره‌ای و الویج بر داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، معادلات الویج ($r^2=0.964$) و نفوذ درون ذره‌ای ($r^2=0.884$) به ترتیب بالاترین همبستگی را با داده‌های سینتیک جذب داشتند و ضرایب تعیین در این معادلات در سطح ۱ درصد معنی دار بودند. این در حالی است که مدل سینتیک شبه مرتبه اول و پس از آن مدل شبه مرتبه دوم کمترین دقت را در پیش‌بینی سینتیک جذب فسفر در خاک مورد مطالعه داشتند. در مطالعه‌ای بر روی سینتیک جذب فسفر در چند نمونه خاک قلیایی با بافت رسی و لوم شنی، مقادیر ضرایب تعیین برای معادلات شبه مرتبه اول، شبه مرتبه دوم و الویج به ترتیب $0.96/0.68$ ، $0.99/0.91$ و $0.94/0.84$ گزارش شدند (Hamdi et al., 2014). در تحقیقی دیگر، مدل سینتیک شبه مرتبه دوم در توصیف جذب فسفر در خاک‌هایی با درصد‌های مختلف عناصر آهن، آلومینیوم و کلسیم مناسب تشخیص داده شد (Zhang et al., 2015). همچنین، نتایج آزمایشی در این زمینه حاکی از همبستگی بالای معادله کو و لوتس با خصوصیات مرتبط با سینتیک جذب فسفر در چندین نمونه خاک با خصوصیات متفاوت فیزیکی و شیمیایی بود (Santos et al., 2011). مقایسه نتایج به دست آمده از تحقیقات مختلف نشان می‌دهد که مناسب‌ترین و دقیق‌ترین مدل در توصیف سینتیک جذب فسفر در هر مطالعه براساس ترکیبی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیرگذار بر فرآیند جذب از جمله pH، EC، درصد کلسیم، آهن، آلومینیوم و بافت خاک تعیین می‌گردد.

جدول ۲- پارامترهای ثابت معادلات سینتیک جذب فسفر در خاک مورد مطالعه

Table 2- Constant parameters of adsorption kinetic equations of P in studied soil

شبه مرتبه اول (Pseudo-first-order)				شبه مرتبه دوم (Pseudo-second-order)			
q_e	k_1	r^2	s	q_e	k_2	r^2	s
0.216	0.144	0.236NS	0.028	0.225	0.854	0.539*	0.022
نفوذ درون ذره‌ای (Intra-particle diffusion)				الویج (Elovich)			
c	k_p	r^2	s	β	α	r^2	s
0.177	0.001	0.884**	0.011	67.830	80.398	0.964**	0.006

NS، *، **: به ترتیب نشان‌دهنده عدم معنی‌داری و معنی‌داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد
NS، *، **: indicate non-significant, significant at 5% and 1% probability levels, respectively

جذب ماکزیمم (mg g^{-1})، k_1 و k_f ثابت جذب لانگمویر و فروندلیچ ($l \text{ g}^{-1}$) و n ضریب وابسته به انرژی جذب فسفر (توان فروندلیچ) است (Moazed et al., 2010).

بررسی ترمودینامیک جذب فسفر

در این بخش از مطالعه، پارامترهای ترمودینامیکی شامل تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG°)، آنتالپی (ΔH°) و آنتروپی (ΔS°) با استفاده از روابط ۷، ۸ و ۹ محاسبه شدند. K_d ثابت تعادل جذب بر حسب میلی لیتر بر گرم است که از معادله ۷ بدست می‌آید. با رسم نمودار $\ln K_d$ در برابر $1/T$ مقادیر شیب و عرض از مبدأ معادله خط مربوطه استخراج شده و مطابق با معادله ۸، تغییرات آنتالپی و آنتروپی تعیین می‌گردد. در این معادله R ثابت جهانی گازها با مقدار 8.314 ژول بر مول بر درجه کلوین است. تغییرات انرژی آزاد گیبس نیز با استفاده از معادله ۹ برای دماهای مختلف محاسبه می‌گردد (Sarathi Guru and Dash, 2012).

$$K_d = \frac{q_e}{C_e} \quad (7)$$

$$\ln(K_d) = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (8)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (9)$$

تحلیل آماری

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های بدست آمده از آزمایش‌های جذب شامل تجزیه واریانس و مقایسه میانگین مقادیر جذب فسفر تحت تأثیر سطوح مختلف شوری، pH، دما و محلول زمینه با استفاده از نرم‌افزار آماری Minitab و بر اساس آزمون توکی در سطح احتمال ۵ درصد انجام شد. برای تعیین بهترین معادلات منطبق بر جذب تعادلی و سینتیک از ضریب تعیین (r^2) و خطای معیار برآورد (s) استفاده گردید که به ترتیب در معادلات ۱۰ و ۱۱ نمایش داده شده‌اند.

$$r^2 = \left(\frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right)^2 \quad (10)$$

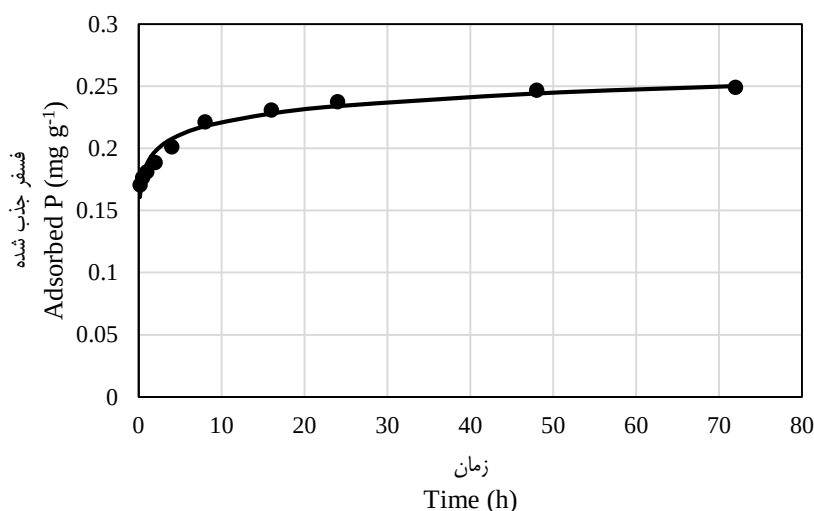
تماس با محلول فسفر، جذب حدود ۷۵ درصدی از فسفر محلول با گذشت ۴۵ دقیقه رخ داد؛ در حالیکه در تعدادی دیگر از نمونه ها این زمان تا ۱۰۲۰ دقیقه نیز به طول انجامید (Santos *et al.*, 2011). در برخی از مطالعاتی دیگر نیز مدت زمان لازم برای دستیابی به تعادل در مقدار جذب فسفر در خاک‌هایی با بافت‌های مختلف از جمله رسی، رس سیلتی و لوم سیلتی، ۲۴ تا ۴۸ ساعت گزارش شده است (Hamdi *et al.*, 2014; Regan and Andersen, 2013).

اثر شوری بر جذب فسفر

نتایج تجزیه واریانس داده‌های جذب بیانگر معنی دار بودن اثر شوری در سطح ۵ درصد بر مقدار جذب فسفر در خاک بود. تغییرات درصد جذب فسفر در برابر شوری‌های مورد مطالعه و نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها در شکل ۲ آورده شده است. در شوری صفر، بالاترین درصد جذب فسفر با مقدار ۴۵ درصد مشاهده شد و پایین‌ترین درصد جذب نیز مربوط به شوری ۴۶/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر با مقدار ۳۷ درصد بود. همچنین، نتایج مربوط به مقایسه میانگین نشان داد که بیش‌ترین تغییرات کاهشی فسفر جذب شده تا شوری ۱۷/۰۲ دسی‌زیمنس بر متر اتفاق افتاد و پس از آن تغییر معنی‌داری در مقدار جذب فسفر با افزایش شوری رخ نداد. رقابت یون‌های کلرید (Cl^{-1}) در محلول حاوی نمک با یون‌های فسفات بر سر مکان‌های جاذب روی ذرات خاک می‌تواند دلیل اصلی کاهش مقدار جذب فسفر به دنبال افزایش شوری باشد.

معادله الوویچ با بالاترین ضریب تعیین در این مطالعه، در توصیف فرآیندهای جذب شیمیایی و در سیستم‌هایی با سطوح جاذب ناهمگن مناسب تشخیص داده شده است. پارامتر α ثابت مربوط به سرعت جذب اولیه و بیانگر نرخ جذب شیمیایی است. در حالیکه پارامتر β به وسعت پوشش سطحی و انرژی فعال‌سازی جذب شیمیایی وابسته است و در جاذب‌هایی با توزیع ناهمگن مکان‌های جذب، انرژی فعال‌سازی در سطح جاذب متفاوت است (Lopez-Luna *et al.*, 2019).

برآزش مدل سینتیک الوویچ بر داده‌های آزمایشگاهی سینتیک جذب در شکل ۱ نمایش داده شده است. مطابق با نتایج این مطالعه، حدود ۶۸ درصد از کل مقدار جذب فسفر مربوط به ۱۰ دقیقه اول تماس فسفر با خاک بود. همچنین، بیش‌ترین تغییرات در مقدار فسفر جذب شده در ۸ ساعت اول تماس خاک با فسفر محلول اتفاق افتاد (حدود ۸۸ درصد کل مقدار جذب فسفر)، پس از آن سرعت جذب فسفر کاهش یافت و در مدت زمان تقریبی ۲۴ تا ۴۸ ساعت به تعادل رسید. بنابراین در این شکل، دو مرحله‌ای بودن سینتیک جذب فسفر (سریع و کند) تا زمان دستیابی به تعادل قابل مشاهده است. بر همین اساس، زمان تماس خاک با محلول حاوی فسفر در آزمایشات تعادلی بررسی اثر پارامترهای مختلف بر جذب فسفر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد. به طور کلی، نفوذ فسفر به منافذ خاک و اشباع شدن سطوح جاذب با فسفر به عنوان عوامل مؤثر در کاهش مقدار جذب فسفر با گذر زمان گزارش شده‌اند (Cheung and Venkitachalam, 2006). طی مطالعه‌ای نشان داده شد که در برخی از نمونه‌های خاک در



شکل ۱- برآزش معادله الوویچ بر داده‌های آزمایشگاهی سینتیک جذب (محلول زمینه: کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛ غلظت فسفر: ۲۰ میلی گرم در لیتر؛ pH: ۵/۳۶؛ دما: ۲۵ درجه سانتی‌گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

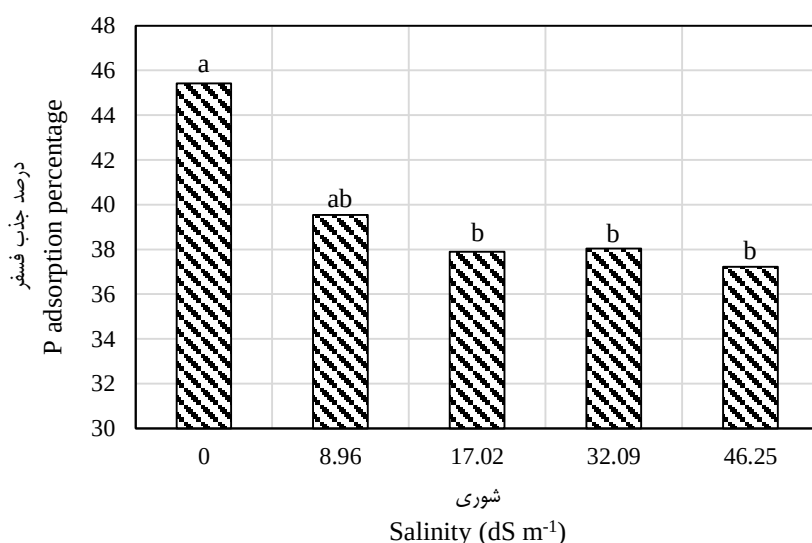
Figure 1- Fitting the Elovich equation to experimental data of adsorption kinetics (background solution: 0.01 M CaCl_2 ; P concentration: 20 mg l^{-1} ; pH: 5.36; temperature: 25°C; soil/solution ratio: 1/25)

داده شده است. با توجه به شکل، کمترین مقدار جذب فسفر با متوسط ۴۵ درصد مربوط به pH ۲/۵ تا ۵/۳۶ بود و با افزایش pH جذب فسفر در نمونه‌ی خاک افزایش یافت؛ به طوریکه بیشترین مقدار جذب مربوط به pH ۷/۵ تا ۱۱/۵ با متوسط ۸۴ درصد بود. همچنین، بیشترین مقدار تغییرات در جذب (افزایش ۸۲ درصدی) بین pH ۵/۳۶ و ۷/۵ اتفاق افتاد و در pH کمتر از ۵/۳۶ و بیش از ۷/۵ تغییرات در مقدار جذب فسفر نسبتاً پایین بود. نتایج مطالعه‌ای نشان داد که افزایش pH (مقادیر بالاتر از ۶) کاهش ثابت تعادلی جذب و ظرفیت جذب فسفر را به دنبال داشته است (Huang et al., 2016). در آزمایشی دیگر، حداقل جذب فسفر در رسوبات مورد مطالعه مربوط به pH بین ۷ و ۸ بود و با افزایش اسیدیته ($pH < 7$) و قلیائیت ($pH > 8$) جذب فسفر به تدریج افزایش یافت (Hou et al., 2003). به طور کلی، نوسان در pH از طریق ایجاد تغییر در خصوصیات مرتبط با بار سطوح، منجر به تغییر در رسوب و جذب ذرات می‌گردد (Illés and Tombácz, 2006). مطابق با نتایج مطالعات، در مقادیر پایین pH، پروتونه شدن گروههای هیدروکسیل بر روی ذرات جاذب به دلیل حضور یون هیدروژن (H^+) در محلول رخ می‌دهد.

همچنین، در برخی مطالعات گزارش شده است که افزایش شوری منجر به کاهش بار مثبت هیدروکسیدهای فلزی شده و از این طریق مانع جذب می‌گردد (Bruland and DeMent, 2009). در مطالعه‌ای گزارش شد که با نصف شدن مقدار شوری، مقدار فسفات جذب شده تقریباً ۱/۵ برابر شده است (Zhang and Huang, 2011). در آزمایشی دیگر مشاهده شد که جذب فسفر بر رسوبات در مقادیر پایین شوری افزایش یافت؛ در حالیکه با افزایش شوری (مقادیر بالای ۵ گرم در لیتر) جذب فسفر کاهش پیدا کرد (Liu et al., 2002). در مطالعه‌ای بر روی دو نمونه خاک، به دنبال افزایش شوری کاهش تدریجی در جذب فسفر مشاهده گردید؛ در حالی که در نمونه‌ای دیگر بیشترین مقدار جذب فسفر در شوری ۳۰ گرم در لیتر و در شوری‌های کمتر و بیش‌تر جذب کمتری گزارش شد (Bai et al., 2017).

اثر pH بر جذب فسفر

تجزیه واریانس داده‌های مربوط به جذب فسفر در pH های مختلف بیانگر اثر معنی دار pH در سطح ۱ درصد بر مقدار جذب فسفر در نمونه‌ی خاک بود. درصد جذب فسفر در pH های مختلف مورد مطالعه و همینطور نتایج مربوط به مقایسه میانگین‌ها در شکل ۳ نشان



شکل ۲- اثر سطوح مختلف شوری بر درصد جذب فسفر در نمونه خاک مورد مطالعه (محلول زمینه: کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛ غلظت فسفر: ۲۰ میلی گرم در لیتر؛ pH: ۵/۳۶؛ EC: ۰، ۸/۹۶، ۱۷/۰۲، ۳۲/۰۹، ۴۶/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر؛ دما: ۲۵ درجه سانتی‌گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

Figure 2- Effect of different levels of salinity on P adsorption percentage in the studied soil sample (background solution: 0.01 M CaCl₂; P concentration: 20 mg l⁻¹; pH: 5.36; ECs: 0, 8.96, 17.02, 32.09, 46.25 dS m⁻¹; temperature: 25°C; soil/solution ratio: 1/25)

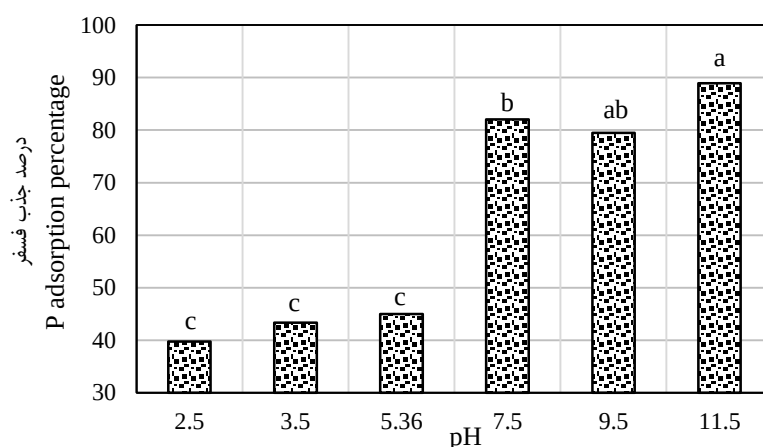
حروف متفاوت معنی‌داری و حروف مشابه عدم معنی‌داری در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهند
Different letters and similar letters indicate significant and non-significant at 5% level

تحت تأثیر دو نوع محلول زمینه برای هریک از غلظت‌های مورد مطالعه، اثر نوع محلول زمینه بر جذب فسفر برای غلظت‌های اولیه ۱۵، ۲۰ و ۱۰۰ میلی گرم در لیتر در سطح ۱ درصد و در سایر غلظت‌های اولیه مورد بررسی در سطح ۵ درصد معنی دار شد. نتایج مربوط به مقایسه میانگین مقادیر جذب فسفر برای دو نوع محلول زمینه و در غلظت‌های اولیه مختلف در شکل ۴ آورده شده است. مقادیر فسفر جذب شده در غلظت‌های اولیه مختلف نشان می‌دهد که مقدار جذب در محلول زمینه کلسیم کلرید حاوی فسفر، حدود ۳ تا ۶ برابر مقدار جذب در آب مقطر حاوی فسفر بوده است. همینطور اینگونه به نظر می‌رسد که با افزایش غلظت اولیه فسفر در محلول زمینه، اختلاف بین مقادیر فسفر جذب شده در دو حالت مورد آزمایش بیش‌تر بوده است. اثر متقابل معنی دار بین نوع محلول زمینه و غلظت اولیه بر روی جذب فسفر توسط ذرات خاک نیز حاکی از تشدید اثر حضور کلسیم کلرید در محلول زمینه بر مقدار افزایش جذب فسفر به دنبال افزایش غلظت اولیه فسفر بود. همچنین، افزایش در مقادیر فسفر جذب شده به دنبال افزایش غلظت اولیه فسفر در آزمایش هر دو نوع محلول زمینه خصوصاً در محلول حاوی کلسیم کلرید در شکل ۴ قابل مشاهده است.

از این رو، واکنش تبادل یونی و جذب الکتروستاتیک بین گروه هیدروکسیل سطحی با بار مثبت و آنیون فسفات در محدوده پایین pH صورت می‌گیرد. این در حالی است که در pH قلیایی که واکنش‌های تبادل یونی غیر فعال هستند، تعامل اسید-پایه لوئیس و واکنش‌های گیرنده و پذیرنده الکترون بین اکسیدهای فلزی بر روی سطوح جاذب و آنیون‌های فسفات، نقش اصلی را در فرآیند جذب بازی می‌کنند (Li et al., 2015). به علاوه، در محلول‌های قلیایی با مقادیر بالای pH، کلسیم به عنوان کاتیون غالب با فسفات واکنش داده و ترکیبات نامحلول فسفات کلسیم را تشکیل می‌دهد. همین امر می‌تواند موجب افزایش رسوب و جذب سطحی فسفات بر روی ذرات خاک در pH های بالا گردد (Cerozi and Fitzsimmons, 2016).

اثر نوع محلول الکترولیت زمینه بر جذب فسفر

تجزیه واریانس داده‌های جذب فسفر تحت تأثیر تیمارهای نوع محلول زمینه حاوی فسفر و غلظت اولیه به طور همزمان صورت گرفت و نتایج نشان داد که اثر هریک از دو عامل بر روی مقدار فسفر جذب شده در سطح ۱ درصد و اثر متقابل آن‌ها در سطح ۵ درصد معنی دار بود. همچنین، مطابق با نتایج تجزیه واریانس داده‌های جذب



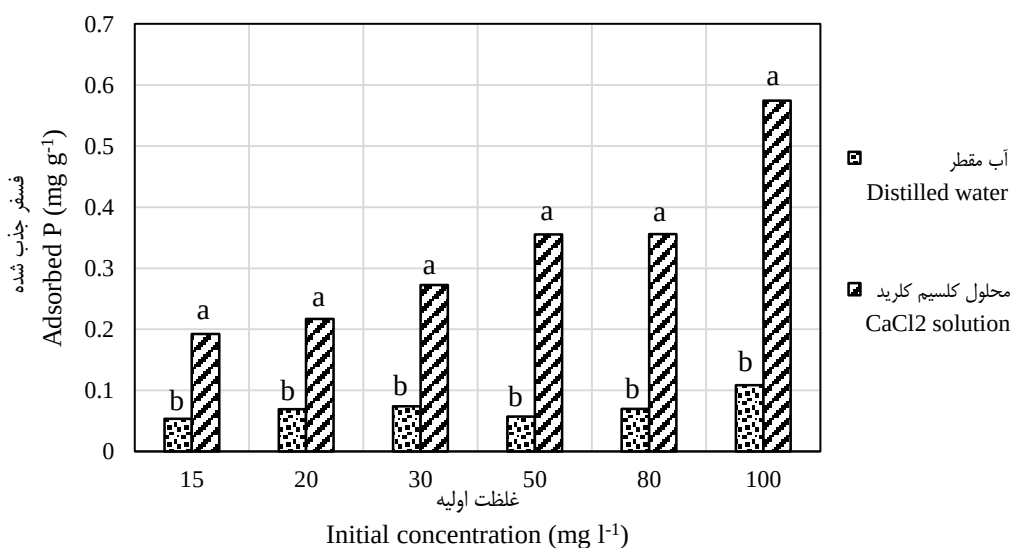
شکل ۳- اثر سطوح مختلف pH بر درصد جذب فسفر در نمونه‌ی خاک مورد مطالعه (محلول زمینه: کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛ غلظت فسفر: ۲۰

میلی گرم در لیتر؛ pH ها: ۲/۵، ۳/۵، ۵/۳۶، ۷/۵، ۹/۵، ۱۱/۵؛ دما: ۲۵ درجه سانتی گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

Figure 3- Effect of different levels of pH on P adsorption percentage in the studied soil sample (background solution: 0.01 M CaCl₂; P concentration: 20 mg l⁻¹; pHs: 2.5, 3.5, 5.36, 7.5, 9.5, 11.5; temperature: 25°C; soil/solution ratio: 1/25)

حروف متفاوت معنی‌داری و حروف مشابه عدم معنی‌داری در سطح ۱ درصد را نشان می‌دهند

Different letters and similar letters indicate significant and non- significant at 1% level



شکل ۴- مقایسه‌ی میانگین مقادیر فسفر جذب شده در دو نوع محلول زمینه و غلظت‌های اولیه‌ی مختلف (محلول‌های زمینه: آب مقطر و کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛ غلظت‌های فسفر: ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر؛ pH: ۵/۳۶؛ دما: ۲۵ درجه سانتی‌گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

Figure 4- Comparison of the average values of P adsorbed in two types of background solution and different initial concentrations (background solutions: distilled water and 0.01 M CaCl₂; P concentrations: 15, 20, 30, 50, 80, 100 mg l⁻¹; pH: 5.36; temperature: 25°C; soil/solution ratio: 1/25)

حروف متفاوت معنی‌داری در سطح ۱ و ۵ درصد را نشان می‌دهند

Different letters indicate significant at 1 and 5% levels

جاذب با فسفر اشباع نشده و افزایش محسوسی در مقدار جذب فسفر حتی در غلظت‌های بالای فسفر اولیه قابل ملاحظه است. این در حالی است که به نظر می‌رسد در آزمایشی که با آب مقطر صورت گرفته، تعداد مکان‌های جذب در سطح ذرات خاک کمتر ولی تمایل به جذب فسفر بیش‌تر بوده است. به این صورت که در غلظت‌های پایین‌تر فسفر اولیه، مکان‌های جذب با فسفر اشباع شده و پس از آن به دنبال افزایش غلظت فسفر، روند افزایشی در جذب مشاهده نشده است. ضرایب k_f و n در معادله فروندلیچ نیز که به ترتیب نشان دهنده جذب سطحی (ظرفیت جذب) و انرژی جذب فسفات هستند، در محلول زمینه کلسیم کلرید با مقادیر بالاتری مشاهده شده‌اند. به طور کلی، نتایج مطالعات نشان داده است که Ca^{2+} اثر دفع الکتروستاتیک بین فسفات و سطح خاک را کاهش داده و پیوندهای کاتیونی ایجاد شده به وسیله کلسیم بین آنیون‌های فسفات و مکان‌های جذب با بار منفی بر روی سطوح خاک عامل افزایش جذب فسفر در شرایط استفاده از محلول CaCl_2 می‌باشد (Bala et al., 2000; Barrow et al., 1980; Muwamba et al., 2019). در پژوهشی دیگر نیز افزایش جذب از طریق تشکیل پیوند کلسیم بین گروه فسفر در گلیفوسات ($\text{C}_3\text{H}_8\text{NO}_5\text{P}$) و سطح خاک با بار منفی گزارش شده است (Ololade et al., 2019). روند مشابهی در رابطه با k^+ برای جذب فسفر در برخی دیگر از مطالعات جذب مشاهده شده و افزایش جذب

نتایج مربوط به ضرایب جذب و برآورد دقت معادلات حاصل از انطباق دو ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ بر داده‌های جذب فسفر در جدول ۳ ارائه شده و چگونگی همبستگی داده‌های آزمایشگاهی با معادلات مورد بررسی در شکل ۵ آورده شده است. بر اساس نتایج، همبستگی نسبتاً بالایی بین معادلات مورد بررسی و داده‌های آزمایشگاهی جذب خصوصاً در شرایط استفاده از محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار به عنوان محلول الکترولیت زمینه وجود داشت. همچنین، در هر دو نوع محلول زمینه مورد بررسی، ضرایب تعیین بالاتر مربوط به معادله فروندلیچ بودند. استفاده از محلول کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار به عنوان محلول زمینه منجر به افزایش چشمگیری در مقدار جذب فسفر به خاک شد و مقدار q_m در این شرایط حدود ۷/۵ برابر مقدار آن در شرایط استفاده از آب مقطر تخمین زده شد. ضریب k_f که ثابت مرتبط با انرژی پیوند بوده و تمایل خاک به جذب فسفر را نشان می‌دهد، در شرایط استفاده از محلول زمینه کلسیم کلرید مقدار کمتری را به خود اختصاص داده است. مقایسه دو ضریب معادله لانگمویر در شرایط انجام آزمایش با دو نوع محلول زمینه مختلف نشان می‌دهد که تعداد مکان‌های جذب فسفر در حضور کلسیم کلرید در محلول زمینه بیش‌تر و تمایل به جذب فسفر کمتر بوده است. از این رو، همانطور که شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب در این شرایط در مقایسه با شرایط عدم حضور کلسیم کلرید بیش‌تر بوده؛ ولی سطوح

و فروندلیچ و ضرایب تعیین (r^2) و خطای معیار برآورد (s) برای سه دمای مورد بررسی در جدول ۴ آورده شده است. ضرایب تعیین برای هر سه دمای مورد بررسی در هر دو معادله دارای مقادیر بالایی بود و همگی در سطح ۱ درصد معنی دار بودند. با این حال به نظر می رسد که معادله فروندلیچ با ضرایب تعیین بالای ۰/۹ در توصیف جذب تعادلی فسفر در دماهای مختلف موفق تر عمل کرده است. بررسی و مقایسه مقادیر مربوط به q_m در دماهای مختلف نشان داد که با افزایش دما از ۱۲ به ۲۵ درجه سانتی گراد و از ۲۵ به ۳۸ درجه سانتی گراد، حداکثر ظرفیت جذب فسفر به ترتیب به ۱/۳ و ۲/۱ برابر شد. مطابقت ایزوترم های لانگمویر و فروندلیچ با داده های آزمایشگاهی جذب در دماهای مورد مطالعه در شکل ۶ نشان داده شده است.

فسفر به دنبال افزایش غلظت محلول الکترولیت زمینه گزارش شده است (Gimsing and Borggaard, 2001; Pardo et al., 1992). به نظر می رسد که پایین بودن مقدار جذب فسفر در آب مقطر به این دلیل است که غلظت کاتیون ها و قدرت یونی در این شرایط در مقایسه با محلول الکترولیت به مقدار قابل توجهی کمتر است (Muwamba et al., 2019). در مطالعات دیگر نیز بر تأثیر قوی محلول زمینه الکترولیت KCl و $CaCl_2$ بر جذب فسفات تأکید شده است (Beji et al., 2017; Biswas et al., 1999).

اثر دما بر جذب فسفر و پارامترهای ترمودینامیک جذب
نتایج مربوط به مقادیر پارامترهای جذب در ایزوترم های لانگمویر

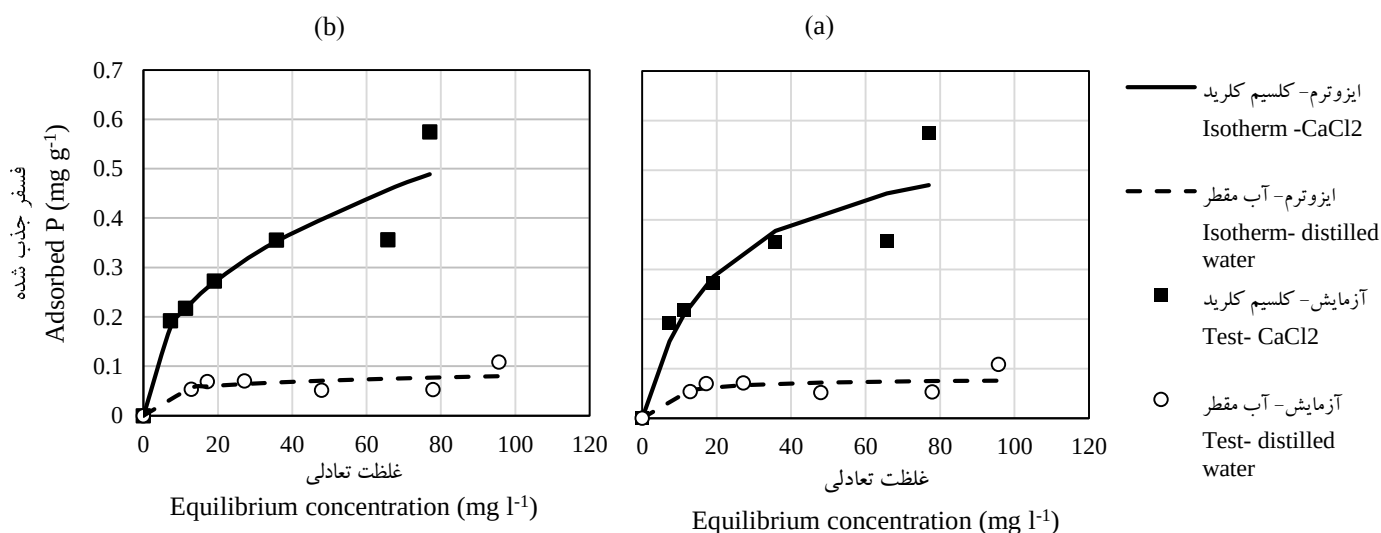
جدول ۳- ضرایب ثابت معادلات جذب لانگمویر و فروندلیچ در دو نوع محلول زمینه

Table 3- Constant coefficients of Langmuir and Freundlich isotherms in two types of background solution

محلول زمینه Background solution	لانگمویر (Langmuir)				فروندلیچ (Freundlich)			
	q_m	k_l	r^2	s	k_f	n	r^2	s
آب مقطر Distilled water	0.080	0.184	0.672*	0.020	0.036	0.176	0.694*	0.020
کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار 0.01M $CaCl_2$	0.597	0.048	0.881**	0.067	0.077	0.425	0.906**	0.060

*, **: به ترتیب نشان دهنده ی معنی داری در سطح احتمال ۵ درصد و ۱ درصد

*, **: indicate significant at 5% and 1% probability levels, respectively



شکل ۵- برازش معادلات لانگمویر (a) و فروندلیچ (b) بر داده های آزمایشگاهی در شرایط کاربرد دو نوع محلول زمینه (محلول های زمینه: آب مقطر و کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛ غلظت های فسفر: ۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر؛ pH: ۵/۳۶؛ دما: ۲۵ درجه سانتی گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

Figure 5- Fitting the Langmuir (a) and Freundlich (b) isotherms to experimental data in terms of application of two types of background solution (background solutions: distilled water and 0.01 M $CaCl_2$; P concentrations: 0, 15, 20, 30, 50, 80, 100 mg l^{-1} ; pH: 5.36; temperature: 25°C; soil/solution ratio: 1/25)

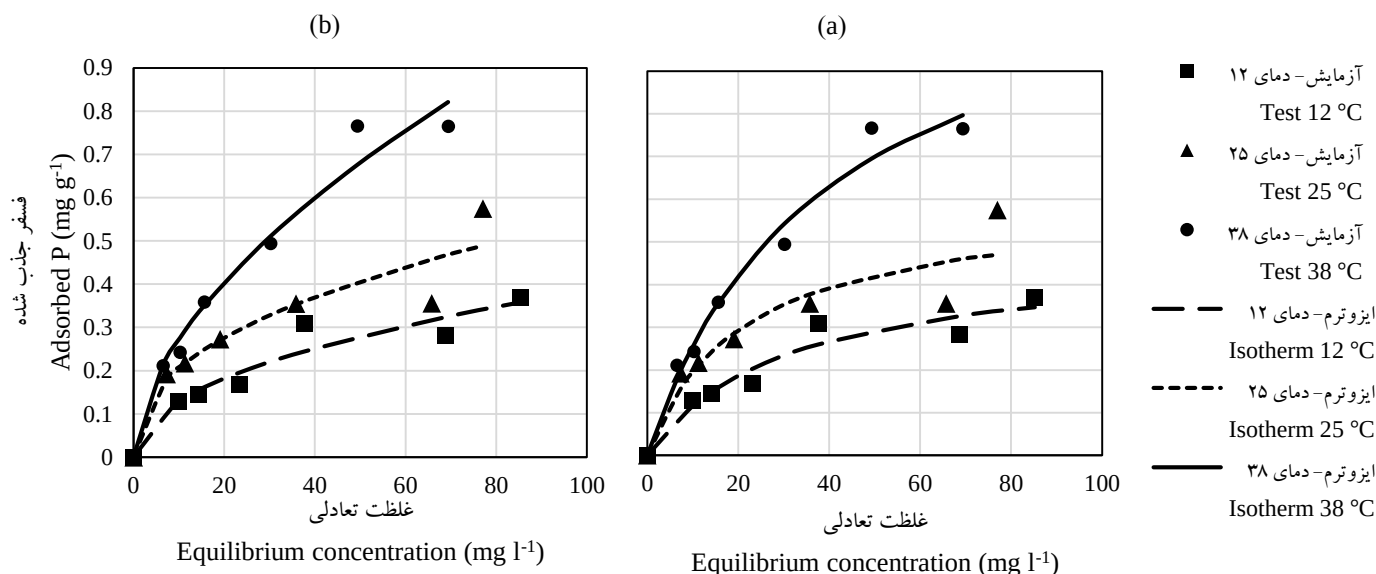
جدول ۴- پارامترهای ایزوترم‌های لانگمویر و فروندلیچ برای جذب فسفر در سه دمای مورد مطالعه

Table 4- The parameters of Freundlich and Langmuir isotherms for adsorption of P in three studied temperatures

دما Temperature (°C)	لانگمویر (Langmuir)				فروندلیچ (Freundlich)			
	q_m	k_l	r^2	s	k_f	n	r^2	s
12	0.472	0.033	0.935**	0.035	0.045	0.468	0.930**	0.037
25	0.597	0.048	0.881**	0.067	0.077	0.425	0.906**	0.060
38	1.245	0.026	0.980**	0.044	0.073	0.571	0.974**	0.051

**: نشان‌دهنده‌ی معنی‌داری در سطح احتمال ۱ درصد

**: indicates significant at 1% probability level



شکل ۶- برازش معادلات لانگمویر (a) و فروندلیچ (b) بر داده‌های آزمایشگاهی در دماهای مختلف (محلول زمینه: کلسیم کلرید ۰/۰۱ مولار؛

غلظت‌های فسفر: ۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰، ۸۰، ۱۰۰ میلی گرم در لیتر؛ pH: ۵/۳۶؛ دماها: ۱۲، ۲۵، ۳۸ درجه سانتی گراد؛ نسبت خاک به محلول: ۱ به ۲۵)

Figure 6- Fitting the Langmuir (a) and Freundlich (b) isotherms to experimental data in different temperatures (background solution: 0.01 M CaCl₂; P concentrations: 0, 15, 20, 30, 50, 80, 100 mg l⁻¹; pH: 5.36; temperatures: 12, 25, 38°C; soil/solution ratio: 1/25)

غلظت‌های مورد مطالعه، بیانگر متفاوت بودن اثر دما بر مقدار جذب فسفر در غلظت‌های مختلف بود. مطابق با این نتایج، در غلظت‌های اولیه ۵۰ و ۸۰ میلی گرم در لیتر فسفر محلول، اثر دما بر جذب فسفر در خاک بی معنی و در سایر غلظت‌های اولیه مورد بررسی در سطح ۵ درصد معنی دار بود. همچنین بر اساس شکل ۶، در تمامی غلظت‌های مورد مطالعه، افزایش دما منجر به افزایش در مقدار جذب گردید. این در حالی است که درصد افزایش در مقدار جذب فسفر به ازای یک افزایش دمای مشخص برای غلظت‌های اولیه مختلف یکسان نبوده است. به عنوان نمونه در دو غلظت اولیه پایین‌تر (۱۵ و ۲۰ میلی گرم در لیتر) افزایش دما از ۲۵ به ۳۸ درجه سانتی گراد به ترتیب افزایش حدود ۱۰ و ۱۲ درصدی را موجب گردید؛ در حالیکه در غلظت اولیه ۸۰ میلی گرم در لیتر به ازای همین تغییرات دما، جذب فسفر حدوداً دو برابر (افزایش ۱۱۵ درصدی) شد. بنابراین، با توجه به معنی دار بودن

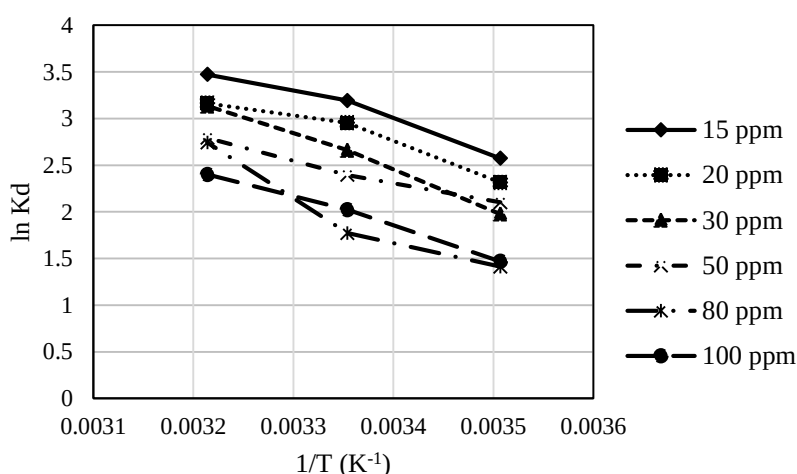
نتایج تجزیه واریانس مقادیر جذب فسفر تحت تأثیر تیمارهای دما و غلظت اولیه بیانگر معنی‌دار بودن اثر دما، غلظت اولیه و همینطور اثر متقابل دو عامل بر مقدار جذب فسفر در سطح ۱ درصد بود. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، افزایش در غلظت اولیه فسفر محلول، افزایش در مقدار جذب فسفر را در هریک از دماهای مورد مطالعه به دنبال داشت. این در حالی است که شیب تغییرات صورت گرفته در مقدار جذب فسفر برای غلظت‌های پایین‌تر فسفر محلول در مقایسه با غلظت‌های بالاتر بیش‌تر بود. در خاک‌هایی با این شکل منحنی جذب، در غلظت پایین فسفر تعادلی پیوستگی قوی بین فسفر و سطوح ذرات خاک ایجاد می‌شود؛ ولی با افزایش غلظت فسفر محلول و به دنبال کاهش سطوح جاذب، جذب فسفر کاهش یافته و در نهایت تثبیت می‌شود (Sparks, 2003). همچنین، تجزیه واریانس و مقایسه میانگین مقادیر فسفر جذب شده در سه دمای مختلف برای هریک از

جدول ۵ آورده شده است.

مقادیر منفی ΔG° در دماها و غلظت‌های مختلف نشان‌دهنده ماهیت خود به خودی جذب فسفر به وسیله خاک مورد مطالعه است. همانطور که در جدول بالا مشاهده می‌شود، با افزایش دما مقادیر مربوط به تغییرات انرژی آزاد گیبس منفی‌تر می‌شود که به معنی تمایل بیش‌تر خاک به جذب فسفات است. به همین ترتیب مقایسه مقادیر این پارامتر در غلظت‌های مختلف فسفر محلول بیانگر کاهش تمایل جذب فسفات به وسیله ذرات خاک در غلظت‌های بالاتر فسفر است. همچنین، مثبت بودن مقادیر مربوط به تغییرات آنتالپی واکنش نشان‌دهنده گرماگیر بودن فرآیند جذب و مقادیر مثبت تغییرات آنتروپی نشان‌دهنده افزایش بی‌نظمی سیستم در حد فاصل ماده جاذب و محلول در طی فرآیند جذب است. نتایج برخی مطالعات دیگر نیز در این زمینه حاکی از گرماگیر و خود به خودی بودن فرآیند جذب فسفر به سطوح جاذب بوده است (Karunanithi et al., 2017; Liu and Hu, 2019).

اثر متقابل دما و غلظت اولیه، اینگونه به نظر می‌رسد که با افزایش غلظت اولیه فسفر اثر دما نیز بر روی مقدار جذب فسفر تشدید شده است. تغییر در درجه حرارت از طریق تأثیر بر قدرت تبادل یونی در محل تماس محلول و ذرات جاذب بر جذب و واجذب فسفر تأثیر می‌گذارد (Liu et al., 2002). افزایش دما انرژی پیوند مورد نیاز برای جذب فسفر در خاک و همینطور تشکیل رسوب را افزایش می‌دهد. دمای بالا همچنین زمان لازم برای تشکیل ترکیبات کریستالی را کاهش می‌دهد (Reddy and DeLaune, 2008). نتایج مطالعه‌ای در این زمینه نشان داد که هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد افزایش در دما به طور تقریبی ۱/۳ برابر افزایش در جذب فسفات را به دنبال داشته است (Zhang and Huang, 2011). در آزمایشی دیگر که روی جذب فسفر در رسوبات دریاچه‌های مختلف صورت گرفت، افزایش جذب فسفات به دنبال افزایش دما از ۱۰ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد گزارش گردید (Jin et al., 2005).

نمودار وانت هوف ($\ln K_d$ در برابر $1/T$) برای غلظت‌های مختلف فسفر محلول در سه دمای مورد مطالعه در شکل ۷ نمایش داده شده است. نتایج مربوط به متغیرهای ترمودینامیکی جذب فسفر نیز در



شکل ۷- نمودار وانت هوف برای جذب فسفر به خاک مورد مطالعه

Figure 7- Van't Hoff plot for P adsorption onto studied soil

جدول ۵- پارامترهای ترمودینامیکی جذب فسفر در خاک مورد بررسی

Table 5- Thermodynamic parameters of P adsorption in studied soil

غلظت فسفر P concentration (mg l ⁻¹)	انرژی آزاد گیجیس ΔG° (kJ mol ⁻¹)			آنتالپی ΔH° (kJ mol ⁻¹)	آنتروپی ΔS° (J mol ⁻¹ k ⁻¹)
	285 K	298 K	311 K		
15	-6.196	-7.646	-9.096	25.588	111.524
20	-5.618	-6.980	-8.343	24.252	104.806
30	-4.728	-6.444	-8.160	32.895	132.010
50	-4.916	-6.034	-7.152	19.589	85.983
80	-3.073	-4.922	-6.771	37.464	142.236
100	-3.517	-4.886	-6.254	26.483	105.264

محلول حاوی فسفر اتفاق افتاد. همچنین، افزایش معنی دار در جذب فسفات به ذرات خاک به دنبال افزایش pH و دما، کاهش شوری و همینطور حضور کلسیم کلرید در محلول زمینه حاوی فسفر مشاهده شد. با توجه به اینکه درصد بالایی از فسفر اضافه شده به خاک در مدت زمان نسبتاً کوتاهی جذب ذرات خاک می‌شود؛ لازم است هرگونه عملیات در راستای کاهش جذب فسفر و افزایش قابلیت دسترسی آن برای گیاه مانند افزودن گوگرد، سولفات آلومینیوم، کودهای نیترات آمونیوم و ترکیبات آلی، پیش از اضافه شدن کودهای فسفر صورت گیرد. همچنین، توصیه می‌شود که زمان مصرف کودهای فسفر تا حد امکان به بازه زمانی نیاز گیاه به فسفر و جذب آن توسط ریشه (مراحل اولیه رشد گیاه) نزدیک باشد؛ تا از این طریق بازدهی مصرف کود افزایش یافته و میزان هدر رفت و تثبیت آن در پروفیل خاک کاهش یابد.

علیرغم گرماگیر بودن واکنش جذب فسفات بر روی بیش تر جاذب‌ها از جمله اکسیدهای آهن و آلومینیوم، در پژوهشی گرمازا بودن واکنش جذب فسفات بر روی کانی دولومیت گزارش شد (Yuan et al., 2015).

نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده از ارزیابی فرآیند جذب و چگونگی تأثیر پذیری جذب از پارامترهای محیطی مختلف می‌تواند در مدیریت بهینه کوددهی فسفر در خاک منطقه مورد مطالعه نقش بسزایی داشته باشد. در این پژوهش، معادله الویچ بیش ترین مطابقت را با داده‌های سینتیک جذب فسفر در نمونه خاک مورد نظر داشت. فرآیند گرماگیر جذب تا زمان رسیدن به تعادل شامل دو مرحله سریع و کند بود و بیش ترین سرعت فرآیند جذب در ۸ ساعت ابتدای تماس خاک با

منابع

- Bai J., Ye X., Jia J., Zhang G., Zhao Q., Cui B., and Liu X. 2017. Phosphorous sorption- desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorous sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions. *Chemosphere* 188: 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.117>.
- Bala P., Bhardwaj S.S. and Sidhij P.S. 2000. Effect of electrolyte pH on phosphate adsorption by soils. *Asian Journal of Chemistry* 12(2): 394-398.
- Barrow N.J., Bowden J.W., Posner A.M. and Quirk J.P. 1980. Describing the effects of electrolyte on adsorption of phosphate by a variable charge surface. *Australian Journal of Soil Research* 18(4): 395-404. <https://doi.org/10.1071/sr9800395>.
- Beji R., Hamdi W., Kesraoui A., and Seffen M. 2017. Effects of salts on phosphorus adsorption in alkalize Tunisian soil. *Euro-Mediterr J Environ Integr* 2(1): 1-9. <https://doi.org/10.1007/s41207-016-0012-7>.
- Biswas A.K., Tomar K.P., and Barman K.K. 1999. Effect of pH and electrolyte on phosphate adsorption by some vertisols. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 47(1): 40-45.
- Bruland G.L., and DeMent G. 2009. Phosphorus sorption dynamics of Hawaii's coastal wetlands. *Estuaries Coasts* 32(5): 844-854. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9201-9>.
- Cerozi B.S., and Fitzsimmos K.M. 2016. The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology* 219: 778-781. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079>.
- Cheung K.C., and Venkitachalam T.H. 2006. Kinetic studies on phosphorus sorption by selected soil amendments for septic tank effluent renovation. *Environmental Geochemistry and Health* 28(1-2): 121-131. <https://doi.org/10.1007/s10653-005-9021-1>.
- Fink J.R., Inda A.V., Bavaresco J., Barron V., Torrent J., and Bayer C. 2016. Adsorption and desorption phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. *Soil and Tillage Research* 155: 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.017>.
- Gee G.W., and Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis. p. 383-411. In *methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Soil Science Society of America Journal. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c15>.
- Gimsing A.L., and Borggaard O.K. 2001. Effect of KCl and CaCl₂ as background electrolytes on the competitive adsorption of glyphosate and phosphate on goethite. *Clays and Clay Minerals* 49(3): 270-275. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2001.0490310>.
- Hamdi W., Pelster D., and Seffen M. 2014. Phosphorus sorption kinetics in different types of alkaline soils. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60(4): 577-586. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.830287>.
- Hou L.J., Liu M., Jiang H.Y., Xu S.Y., Ou D.N., Liu Q.M., and Zhang B.L. 2003. Ammonium adsorption by tidal flat surface sediments from the Yangtze estuary. *Environmental Geology* 45: 72-78. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0858-2>.
- Huang S., Huang H., and Zhu H. 2016. Effects of the addition of iron and aluminum salt on phosphorus adsorption

- in wetland sediment. *Environmental Science and Pollution Research* 23(10): 10022-10027. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6188-1>.
15. Illés E., and Tombácz E. 2006. The effect of humic acid adsorption on pH-dependent surface charging and aggregation of magnetite nanoparticles. *Journal of Colloid and Interface Science* 295(1): 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.08.003>.
16. Jin X., Wang S., Pan Y., Zhao H., and Zhou X. 2005. The adsorption of phosphate on different trophic lake sediments. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 254: 241-248. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2004.11.016>.
17. Karunanithi R., Ok. Y.S., Dharmarajan R., Ahmad M., Seshadri B., Bolan N., and Naidu R. 2017. Sorption, kinetics and thermodynamics of phosphate sorption onto soybean stover derived biochar. *Environmental Technology and Innovation* 8: 113-125. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.06.002>.
18. Li M., Liu J., Xu Y., and Qian G. 2015. Phosphate adsorption on metal oxides and metal hydroxides: a comparative review. *Environment Review* 24: 319-332. <https://doi.org/10.1139/er-2015-0080>.
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(3): 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
20. Liu Y., and Hu. X. 2019. Kinetics and thermodynamics of efficient phosphorus removal by a composite fiber. *Applied Sciences* 9(11). <https://doi.org/10.3390/app9112220>.
21. Liu M., Hou L., Xu S., Ou D., Yang Y., Zhang B., and Liu Q. 2002. Adsorption of phosphate on tidal flat surface sediments from the Yangtze Estuary. *Environmental Geology* 42(6): 657-665. <https://doi.org/10.1007/s00254-002-0574-3>.
22. Loeppert R.H., and Suarez D.L. 1996. Carbonate and Gypsum. Chapter 15. U.S. Department of Agricultural Research Service, Lincoln, Nebraska. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c15>.
23. Lopez-Luna J., Ramirez-Montes L.E., Martinez-Vargas S., Martinez A.I., Mijangos-Recardez O.F., Gonzalez-Chavez M.A., Carrillo-Gonzalez R., Solis-Dominguez F.A., Cuevas-Diaz M.C., and Vazquez-Hipolito V. 2019. Linear and nonlinear kinetic and isotherm adsorption for arsenic removal by manganese ferrite nanoparticles. *SN Applied Sciences* 1: 950. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0977-3>.
24. Maguire R.O., Sims J.T., and Foy R.H. 2001. Long- term kinetics for phosphorus sorption- desorption by high phosphorus soils from Ireland and the Delmarva Peninsula, USA. *Soil Science* 166(8): 557-565. <https://doi.org/10.1097/00010694-200108000-00007>.
25. Mirzaghaderi G., Moradi M., and Fallah F. 2010. An introduction to statistics and probability. Publications of Kurdistan University, Iran. (In Persian)
26. Moazed H., Hoseini Y., Naseri A.A., and Abbasi F. 2010. Determining phosphorus adsorption isotherm in soil and its relation to soil characteristics. *International Journal of Soil Science* 5(3): 131-139. <https://doi.org/10.3923/ijss.2010.131.139>.
27. Murphy J., and Riley J.P.A. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27: 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5).
28. Muwamba A., Morgan K.T., and Nkedi-Kizza P. 2019. Sorption of Phosphorus from fertilizer mixture. IntechOpen. University of Florida, Gainesville, Florida, USA. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80420>.
29. Ngatia L.W., Grace III J.M., Moriasi D., Bolques A., Osei G.K., and Taylor R.W. 2019. Biochar Phosphorous sorption- desorption: potential phosphorous eutrophication mitigation. An Imperative Amendment for Soil and the Environment. College of agriculture and food science. Florida University, USA. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82092>.
30. Ololade O.O., Aiyesanmi A.F., Okoronkwo A.E., Ololade I.A., and Adanigbo P. 2019. Influence of electrolyte composition and pH on glyphosate sorption by cow-dung amended soil. *Journal of Environmental Science and Health* 54(9): 758-769. <https://doi.org/10.1080/03601234.2019.1631100>.
31. Pardo M.T., Guadalix M.E., and Garcia-Gonzalez M.T. 1992. Effect of pH and background electrolyte on P sorption by variable charge soils. *Geoderma* 54(1-4): 275-284. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(92\)90109-K](https://doi.org/10.1016/0016-7061(92)90109-K).
32. Pierzynski G.M. 2000. Methods of phosphorus analysis for soils, sediments, residuals and waters. A publication of SERA-IEG 17. Kansas State University, Manhattan.
33. Reddy K.R., and DeLaune R.D. 2008. Biogeochemistry of wetlands: science and applications. CRC Press LLC. Boca ration, Florida. <https://doi.org/10.1201/9780203491454>.
34. Regan K.B., and Andersen D.S. 2013. Kinetics of phosphorus sorption in vegetative treatment area soils. Agricultural and biosystems engineering. Conference proceedings and presentations, 21-24 Jul. 2013. Kansas City, Missouri. <https://doi.org/10.13031/aim.20131608507>.
35. Rhoades J.D. 1996. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. Chapter 14. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California. **Error! Hyperlink reference not valid.**
36. Safari Sinangani A.A., and Sedri S. 2011. Effects of sterilization and temperature on the decrease kinetic of phosphorus bioavailability in two different soil types. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 11(2): 110-123. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162011000200010>.

37. Santos H., Oliveira F., Salcedo I., Souza A., and Silva V. 2011. Kinetics of phosphorus sorption in soils in the state of Paraiba. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 35(4): 1301-1310. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000400024>.
38. Sarathi Guru P., and Dash S. 2012. Eggshell particles (ESP) as potential adsorbent for styryl pyridinium dyes- A kinetic and thermodynamic study. *Journal of Dispersion Science and Technology* 33: 1012-1020. <https://doi.org/10.1080/01932691.2011.590750>.
39. Sparks D.L. 2003. *Environmental soil chemistry*. Academic press, Amsterdam, The Netherland.
40. Sparks D.L. 1996. *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*, Madison, Wis., Soil Science Society of America: American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3>.
41. Thomas G.W. 1996. Soil pH and soil acidity. Chapter 16. University of Kentuchy, Lexington. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.
42. Tirado R., and Allsopp M. 2012. Phosphorus in agriculture- problems and solutions. Technical Report (review). Greenpeace research laboratories. Amsterdam, the Netherlands.
43. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>.
44. Wolde Z., and Haile W. 2015. Phosphorus sorption isotherms and external phosphorus requirements of some soils of southern Ethiopia. *African Crop Science Journal* 23(2): 89-99. <https://doi.org/10.4314/ACSJ.V23I2>.
45. Yuan X., Xia W., An J., Yin J., Zhu X., and Yang W. 2015. Kinetic and thermodynamic studies on the phosphate adsorption removal by dolomite mineral. *Journal of Chemistry* 1-8. <https://doi.org/10.1155/2015/853105>.
46. Zafar M., Tiecher T., Castro Lima J., Schaefer G.L., Santanna M.A., and Santos D.R. 2016. Phosphorus seasonal sorption- desorption kinetics in suspended sediment in response to land use and management in the Guapore catchment, southern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(643). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5650-3>.
47. Zhang L., Loaiciga H.A., Xu M., Du C., and Du Y. 2015. Kinetics and mechanisms of phosphorus adsorption in soils from diverse ecological zones in the source area of a drinking-water reservoir. *International Journal Environment Research* 12: 14312-14326. <https://doi.org/10.3390/ijerph121114312>.
48. Zhang J.Z., and Huang X.L. 2011. Effect of temperature and salinity on phosphate sorption on marine sediments. *Environmental Science and Technology* 45(16): 6831-6837. <https://doi.org/10.1021/es200867p>.



Changes in Soil Magnetic Properties and Iron Oxides Following Land Use Change (Case Study: Mokhtar Plain, Kohgiluyeh Province)

H.R. Owliaie^{1*}, E. Adhami², M. Najafi Ghiri³

Received: 14-02-2022

Revised: 28-02-2022

Accepted: 03-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Owliaie H.R., Adhami E., and Najafi Ghiri M. 2022. Changes in Soil Magnetic Properties and Iron Oxides Following Land Use Change (Case Study: Mokhtar Plain, Kohgiluyeh Province). Journal of Water and Soil 36(2): 267-282. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.75178.1140](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.75178.1140)

Introduction

Global observations have confirmed that in recent decades, forests have been converted into agricultural land at a swift pace; this is a major global concern. Forests around the world have also experienced severe disturbances due to other anthropogenic activities. The conversion of forests to cropland often results in soil degradation. Slope gradient and land use change are known to influence soil quality; therefore, the assessment of soil quality is important in determining sustainable land-use and soil-management practices. Magnetic susceptibility (χ_{if}) measurements are widely used to study soil-forming processes. Many efforts have been made to correlate soil magnetic susceptibility with different soil properties, such as topography, parent material, Fe oxide forms, etc. The Yasouj area of Kohgiluyeh Province is one of the most densely forested areas in Zagros mountainous region. Parts of the area have been cultivated to feed the growing population, which has led to forest degradation. The objectives of this study were to assess some soil properties focusing on soil χ_{if} and Fe-oxides forms in different land uses and slope positions.

Materials and Methods

Forty soil samples were taken from dense forest, sparse forest, eroded lands and dryland farming from different slopes (0-15 and 15-30 percent) in Mokhtar Plain, west of Yasouj city. Soil samples were taken from the depth of 0–15 cm in a completely randomized design with five replications. Soil moisture and temperature regimes in the study area are xeric and thermic, respectively. Particle size distribution was determined by the hydrometer method and soil organic matter, CaCO_3 equivalent and bulk density were determined using standard procedures. Fe (Feo) were extracted by acid ammonium oxalate, using a single 4-h extraction at pH 3 in the dark. Total free iron (Fed) was extracted with the CBD method. The total Fe contents (Fet) in the soil samples were determined after extraction with 5 mol L⁻¹ HNO₃. Magnetic susceptibility of the soils was measured at low (0.46 kHz; χ_{lf}) and high (4.6 kHz; χ_{hf}) frequencies, respectively; using a Bartington MS2 dual-frequency sensor, with approximately 10 g of air-dry soil in polyethylene vials. The percentage of frequency-dependent magnetic susceptibility ($\chi_{fd}\%$) was calculated to study the size of magnetic crystals in soils and the abundance of pedogenic ferrimagnetic in SP-SSD (~0.03 μm) boundary.

Results and Discussion

The results of this study showed that the land use and slope positions were among the important factors affecting the change of soil properties in this area. Land use change along with the reduction of organic matter reduced the stability of aggregates and increased land erosion. This process caused the loss of clay particles and magnetic minerals and affected many soil properties. Organic matter as an important indicator of soil quality, showed a decrease of about 3 times as a result of land use change from dense forest to eroded lands following by

1 and 2- Associate Professors, Department of Soil Science, Yasouj University, Yasouj, Iran

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

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

an increase in bulk density and a decrease in soil permeability and other soil quality indicators. Long-term afforestation and agricultural activities on sloping lands changed the soil texture from a class of silty loam in the forest to a lighter class of silty loam in agricultural use. Soil magnetic susceptibility, which is a function of soil magnetic particles was greatly affected by land use change and to a lesser extent by slope position. Due to the fact that magnetic susceptibility is influenced by factors such as soil texture, drainage class, erosion conditions, magnetic mineral contents, soil evolution conditions, land use changes from forest to other uses had significant effects (about 2 times) on χ_{lf} . Significant decrease in the amount of calcium carbonate in low slope positions was another reason for the increase in magnetic susceptibility in these positions. According to the measured values of χ_{fd} (ranged from 1.9 to 7.2%), the magnetic particles of the soils had low to moderate amounts of superparamagnetic (SP) particles, which indicates the combined effect of pedogenic superparamagnetic ultrafine particles and lithogenic (inherited) magnetic particles in χ_{lf} of the soils. The effect of slope on Fe forms (Fe_o , Fe_d and Fe_t) has been significant ($p < 0.01$) in almost all land uses. Due to the relatively high correlation of χ_{lf} with some soil properties such as Fe forms, soil clay, the amount of diamagnetic compounds including calcium carbonate in the studied soils, it is possible to estimate the value of these soil properties using χ_{lf} , which is a quick and cost-effective approach. Overall, it seems that magnetic susceptibility could be applied successfully to estimate some soil properties in hilly regions of Zagros Mountains of southwestern Iran, especially for monitoring the consequences of land use changes. It should also be noted that any change in the use of the area should be defined in accordance with the potential of the land in the long term to prevent a reduction in soil quality.

Keywords: Fe-oxides, Magnetic susceptibility, Land use change, Soil quality, Slope position

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۶۷-۲۸۲

تغییر شاخص‌های مغناطیسی و اکسیدهای آهن خاک در پی تغییر کاربری (مطالعه موردی: دشت مختار استان کهگیلویه و بویراحمد)

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

چکیده

پژوهش حاضر به منظور بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی و شیب بر برخی ویژگی‌های خاک با تمرکز بر شاخص‌های مغناطیسی و اکسیدهای آهن خاک در منطقه مختار یاسوج انجام گرفت. در این منطقه از چهار کاربری جنگل متراکم، جنگل تنگ، اراضی فرسوده و کشت دیم و در هر کاربری از دو کلاس شیب ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ درصد و در هر کاربری از ۱۰ نقطه سطحی (عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متر) به صورت تصادفی (مجموعاً ۴۰ نمونه) نمونه برداری انجام گرفت. میانگین ماده آلی در کاربری جنگل متراکم (۵/۲۴٪) به طور معنی‌داری بیشتر از سایر کاربری‌ها بوده است. جنگل‌تراشی و عملیات زراعی بر روی اراضی شیب‌دار، موجب سبک‌تر شدن بافت خاک و کاهش معنی‌دار مقدار رس در کاربری زراعی شده است. همچنین چگالی ظاهری و کرنات کلسیم معادل با تغییر کاربری از جنگل متراکم به کاربری زراعی افزایش یافته‌اند. پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{if}) خاک به میزان زیادی تحت تأثیر تغییر کاربری و به میزان کمتر تحت تأثیر موقعیت شیب بوده است. تغییرات کاربری از جنگل متراکم به سایر کاربری‌ها کاهش معنی‌داری (۲۵ تا ۱۰۰ درصد) بر χ_{if} داشته است. با توجه به مقادیر ۱/۹ تا ۷/۲ درصدی پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{if})، این خاک‌ها دارای مقادیر کم تا متوسط ذرات پدوژنیک سوپراپارامگنتیک بوده‌اند. همبستگی نسبتاً بالایی بین χ_{if} با برخی ویژگی‌های از جمله شکل‌های آهن، ماده آلی، بافت خاک و میزان کرنات کلسیم مشاهده شد. با اندازه‌گیری χ_{if} که امکان اندازه‌گیری سریع و ارزانی دارد، می‌توان مناطق حساسی را که در معرض تخریب زیادی بوده، شناسایی و اقدامات مدیریتی مناسب را اتخاذ نمود.

واژه‌های کلیدی: اکسید آهن، پذیرفتاری مغناطیسی، تغییر کاربری اراضی، کیفیت خاک، موقعیت شیب

مقدمه

و تعریف آن بسته به هدف پژوهش متفاوت است. بنابراین باید شاخص‌هایی از خاک مورد بررسی قرار گیرند که بتوانند وضعیت عملکرد گیاه و نوع مدیریت را در آن شرایط به خوبی بیان نمایند و گویای وضعیت کلی سیستم خاک باشند. در این رابطه می‌توان به شاخص‌هایی مانند میزان کربن آلی، درصد ذرات اولیه، مقدار نیتروژن کل، چگالی ظاهری، مقدار آب قابل دسترس، هدایت هیدرولیکی، pH، بافت و ساختمان خاک و پایداری خاکدانه‌ها اشاره نمود (Lal, 1995). بخشی از ناپایداری سیستم کشاورزی به دلیل کاهش کیفیت خاک در طول زمان می‌باشد. بر همین اساس انتخاب نوع بهره‌برداری از اراضی باید با در نظر گرفتن حفظ کیفیت خاک انجام گیرد. تخریب ذخایر طبیعی موجب کاهش نواحی تحت کشت گیاهان طبیعی و تبدیل آنها به کاربری‌ها و پوشش‌های دیگر زمین می‌شود که تحت

خاک سالم پایه کشاورزی بوده و برای تأمین نیازهای انسانی، مانند غذا، خوراک، الیاف، آب تمیز و هوای پاک ضروری است. خاک یک بخش حیاتی اکوسیستم است که به منظور ارائه خدمات اولیه اکوسیستم از آنها پشتیبانی می‌کند (Amundson et al., 2015). کیفیت خاک بیانگر وضعیت خاک و توانایی تولید پایدار خاک می‌باشد

۱ و ۲- دانشجویان گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

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

۳- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

DOI: 10.22067/JSW.2022.75178.1140

سیستم مدیریت انسان می‌باشد (Bewket and Stroosnijder, 2003). تغییر کاربری از جنگل یا مرتع به کشاورزی باعث تخریب خاک گردیده و موجب کاهش موقت یا دائمی ظرفیت تولید است، می‌شود (Lal et al., 1999).

در چهار قرن گذشته حدود ۳۰ درصد از اراضی جنگلی و مراتع طبیعی، به زمین کشاورزی تبدیل شده‌اند (Hajabbasi et al., 1997). آشتگی‌های ناشی از جنگل‌زدایی، چرای بی‌رویه، آتش-سوزی‌های کنترل نشده و تبدیل مراتع و جنگل‌ها به اراضی کشاورزی در ایران و دیگر نقاط جهان کاهش کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک را به همراه داشته است (Doran and Parkin, 1994; Hajabbasi et al., 1997). خاک‌های اراضی جنگلی به دلیل مواد آلی زیاد و ساختمان مناسب همواره مورد توجه بوده‌اند، ولی تغییر در مدیریت و کاربری آنها و اعمال خاک‌ورزی، عموماً تأثیر عمده‌ای بر میزان ماده آلی و دیگر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌گذارد (Mehmandoust et al., 2020; Thompson and Oldfield, 1986). پستی و بلندی با تأثیر بر ویژگی‌های خاک و شرایط زهکشی به عنوان یک عامل طبیعی و تغییر کاربری اراضی به عنوان عامل انسانی، از مهمترین عوامل مؤثر بر تغییر و تحول خاک می‌باشند. این عوامل با اثرگذاری بر جهت و موقعیت شیب (کنترل حرکت رواناب و تأثیر بر فرسایش خاک، زهکشی و نگهداری آب)، بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مؤثر می‌باشند (Moghbeli et al., 2019; Owliaie et al., 2018; Owliaie and Najafi Ghiri, 2015).

اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در خاک، محصول ذاتی فرایندهای اصلی خاکساز هستند و بیانگر برهمکنش‌های پیچیده شیمیایی، زمین‌شناسی و زیستی میان مواد مادری، اجزای خاک (کانی‌ها، مواد آلی، موجودات زنده و ...) و عوامل بیرونی (اقلیم، دما، بارش، زمان و توپوگرافی) می‌باشند (Jordanova, 2017). این ترکیبات تقریباً در همه خاک‌ها در مقادیر و شکل‌های مختلف حضور دارند و میزان و نسبت بین شکل‌های آن از شاخص‌های مهمی است که در مطالعات مرتبط با مطالعات ژنتیکی خاک و اثرات کاربری بر ویژگی‌های مختلف خاک مورد استفاده قرار گرفته است (Enjavinejad et al., 2017; Moghbeli et al., 2021). این ترکیبات به ویژه نقش اساسی بر شاخص‌های مغناطیسی خاک به ویژه پذیرفتاری مغناطیسی خاک (χ_f) دارند. پذیرفتاری مغناطیسی یا قابلیت مغناطیسی شدن، درجه‌ای است که یک ماده، میدان مغناطیسی شناخته شده و معینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و مقدار این تأثیر، تابع غلظت و نوع کانی‌های مغناطیسی (عمدتاً اکسیدهای آهن) است که در نمونه وجود دارد (Sadiki et al., 2009).

منبع اصلی پذیرفتاری مغناطیسی در بیشتر خاک‌ها، کانی‌های فری‌مگنتیک مانند مگنتیت (Fe_3O_4) و مگهمیت ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)

می‌باشند. این اکسیدها در خاک‌های مناطق مختلف آب و هوایی در یک یا چند شکل و به مقادیر مختلف وجود دارند (Schwertmann and Taylor, 1989). خصوصیات کانی‌های مغناطیسی تابعی از نوع کانی، شکل بلور، اندازه آن و سایر عوامل می‌باشد (Mullins, 1977). افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌ها اساساً به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری‌مگنتیت می‌باشد که به میزان زیادی به عوامل خاک-ساز شامل ماده مادری، آب و هوا، پستی و بلندی، کاربری و پوشش گیاهی بستگی دارد. فرضیه مطرح در مورد افزایش پذیرفتاری مغناطیسی، بیشتر اشاره به تغییر شکل در جای آهن غیرمغناطیسی، به ریزبلورهای مگنتیت و مگهمیت دارد (Feng and Johnson, 1995). اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن شامل ترکیباتی بی‌شکل تا ترکیباتی کاملاً متبلور هستند. با استفاده از عصاره‌گیرهای مختلف می‌توان شکل‌های مختلف آنها را در خاک جداسازی نمود. اکسید آهن (III) بی‌شکل به وسیله اگزالات آمونیم اسیدی (Fe_0) اندازه‌گیری می‌شود، در حالی که مقدار کل ترکیبات آهن پدوژنیک (Fe_d) به وسیله سیترات-بی‌کربنات-دی‌تیونات (CBD) عصاره‌گیری می‌شود. بنابراین مقدار ($\text{Fe}_d - \text{Fe}_0$) معیاری از میزان ترکیبات پدوژنیک متبلور آهن، نسبت ($\text{Fe}_0 / \text{Fe}_d$) معیاری از اکسیدهای آهن فعال و نسبت ($\text{Fe}_d / \text{Fe}_t$) شاخص تبلور آهن در خاک می‌باشند (Munch and Ottow, 1983).

پژوهش‌هایی پیرامون اثر تغییرات کاربری بر شکل‌های آهن و شاخص‌های مغناطیس خاک صورت گرفته است. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کاربری اراضی بر توزیع و میزان پذیرفتاری مغناطیسی تأثیرگذار است (Magiera et al., 2006). افشاری و همکاران (Afshari et al., 2015) مطالعه‌ای را بر روی خاک‌های منطقه زنجان با کاربری‌های مختلف (شهری، صنعتی، کشاورزی و مرتع) و مواد مادری متفاوت انجام دادند. بر اساس نتایج منتشر شده بیشترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی خاک در اراضی شهری با مقدار $10^{-8} \times 467 \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$ گزارش شد. در پژوهش دیگری اثرات کاربری اراضی و موقعیت شیب بر تغییرات برخی ویژگی‌های خاک‌های اراضی تپه‌ماهوری جنوب ایران مطالعه شد. نتایج نشان داد که پذیرفتاری مغناطیسی در جنگل طبیعی بیشترین مقدار را داشته و پس از آن به ترتیب جنگل تخریب شده و زمین زراعی قرار گرفتند و در کلیه کاربری‌ها با افزایش شیب مقدار پذیرفتاری مغناطیسی کاهش یافت (Vafaiezhadeh et al., 2015). تغییر کاربری اراضی بر شاخص‌های مغناطیسی خاک مؤثر می‌باشد، به طوری که تفاوت‌های معنی‌داری در میانگین پذیرفتاری‌های مغناطیسی کاربری‌های مختلف وجود دارد. خاک‌های تحت کشت اغلب دارای مقادیر متوسط پذیرفتاری مغناطیسی کمتری نسبت به خاک‌های با پوشش طبیعی هستند (Mokhtari et al., 2011). همچنین نتایج این مطالعه نشان داد که خاک‌های تحت کشت اغلب دارای مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه به وسعت تقریبی ۳۰۰ هکتار در غرب شهر یاسوج قرار گرفته است. منطقه در مختصات جغرافیای $51^{\circ}28'30''$ تا $51^{\circ}30'49''$ طول شرقی و $30^{\circ}42'40''$ تا $30^{\circ}44'49''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). میانگین ارتفاع منطقه ۱۸۳۰ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین بارندگی و دمای منطقه مطالعاتی بر اساس آمار هواشناسی ایستگاه سینوپتیک یاسوج به ترتیب ۸۵۱ میلی‌متر و $15/1$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. رژیم رطوبتی و حرارتی خاک منطقه به ترتیب زیریک و تریمیک می‌باشد. منطقه مطالعاتی بر روی رسوبات آهکی-مارنی سازندهای آسماری و پابده-گورپی قرار دارد. رده‌بندی خاک‌های منطقه مطالعاتی شامل زیر گروه‌های Typic Haploxerolls در بخش‌های با پوشش جنگلی متراکم و Typic Xerorthents در سایر کاربری‌ها می‌باشند. منطقه دارای ۴ کاربری جنگل متراکم (DF)، جنگل مخروطه‌تُنک (SF)، کشت دیم (به طور عمده گندم و جو) (DL) و اراضی فرسایش یافته بدون پوشش (EL) می‌باشد. در هر کاربری دو کلاس شیب شامل شیب ۱۵-۰ و ۳۰-۱۵ درصد انتخاب و در هر موقعیت شیب و در هر کاربری، ۱۰ نقطه به صورت تصادفی از عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری شدند (در مجموع ۴۰ نمونه). نمونه‌ها در هوای آزاد خشک شده و پس از کوبیدن از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و برای تجزیه‌های فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی به آزمایشگاه منتقل شدند. چگالی ظاهری (BD) با استفاده از روش استوانه با حجم مشخص اندازه‌گیری شد (Blake and Hartge, 1986). درصد کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون (Page et al., 1982)، کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Page et al., 1982) و بافت خاک به روش هیدرومتری (Day, 1965) اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری ترکیبات بی‌شکل و آلی آهن (Fe_0) توسط عصاره‌گیری با آمونیوم اگزالات اسیدی در $pH=3$ در تاریکی صورت گرفت (McKeague et al., 1981). ترکیبات آهن متبلور، بی‌شکل و آلی (Fe_d) بوسیله عصاره‌گیری توسط سیترات-بی‌کربنات-دی‌تیونات (CBD) استخراج گردید (Holmgren, 1976). آهن کل خاک (Fe_t) نیز با روش هضم با تی‌زآب سلطانی (Aqua regia) شامل اسیدهای $HClO_4-HNO_3-HCl-HF$ اندازه‌گیری گردید (Sparks, 1996). میزان آهن موجود در عصاره‌ها توسط دستگاه جذب اتمی شیمادزو مدل AA 670 پس از رقیق کردن به میزان لازم اندازه‌گیری گردید. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های پودری خاک بوسیله دستگاه MS2 Meter، Bartington Dual Frequency در فرکانس‌های ۰/۴۶ و ۴/۶ KHz اندازه‌گیری شد. برای این منظور حدود ۱۰ گرم خاک خشک شده در آون (دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) در ظروف

کمتری نسبت به خاک‌های با پوشش طبیعی می‌باشد. نامبردگان مغناطیس‌سنجی را یک روش مناسب در اینگونه مطالعات معرفی نمودند.

پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) شاخصی از توسعه فرایندهای خاکسازی و بازتابی از اندازه ذرات فری مغناطیس آهن است که نسبت به حضور ذرات با اندازه کمتر از $1 \mu m$ (به ویژه ذرات سوپراپارامگنتیک (SP=Superparamagnetics) و تک حوزهای (SD=Single domain) با اندازه $0.3-1.0 \mu m$) حساس است (Yang et al., 2009). مقادیر بالای پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس نشان‌دهنده حضور مشخص ذرات خیلی ریز فری مغناطیس خاک‌ساز است (Lu et al., 2008). میزان پذیرفتاری مغناطیسی این ذرات زیاد، اما خواص مغناطیسی آنها پس از حذف میدان مغناطیسی به سرعت کاسته می‌شود. رفتار ویژه مغناطیسی این ذرات بسیار ریز بستگی به فرکانس میدان مغناطیسی دارد. حضور مواد سوپراپارامگنتیک که عمدتاً پدوژنیک بوده و در نتیجه فرایندهای بیوشیمیایی در خاک تشکیل می‌گردند، توسط χ_{fd} قابل اندازه‌گیری است (Dearing, 1999).

اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی به عنوان یک روش ساده، نسبتاً ارزان، سریع و غیر مخرب در مطالعات خاکشناسی یکی دو دهه اخیر مطرح می‌باشد (Dearing, 1999). مطالعات پذیرفتاری مغناطیسی در سالهای اخیر در ایران عمدتاً به مطالعات ژنتیکی، آلودگی خاک، تشکیل و تکامل خاک و همچنین نقش فرسایش بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی مرتبط بوده و کمتر به نقش تغییر کاربری و شیب اراضی بر تغییرات شاخص‌های مغناطیسی خاک به همراه شکل‌های شیمیایی آهن پرداخته شده است. کاربری‌های مختلف اراضی نقش مهمی در تعیین ویژگی‌های خاک‌ها دارند. در چند دهه اخیر رشد جمعیت و مهاجرت موجب شده است که اراضی دامنه‌ای (بعضاً با شیب زیاد) منطقه زاگرس (با کاربری جنگل و مرتع) یا تخریب و فرسوده شده و یا تبدیل به اراضی کشاورزی (عمدتاً دیمزار) شوند.

با توجه به زمان کم مورد نیاز برای اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی خاک و همچنین امکان اندازه‌گیری صحرائی، بررسی ارتباطات این شاخص با سایر ویژگی‌هایی از خاک که تعیین آنها زمان‌بر و پرهزینه می‌باشند، کمک قابل توجهی در سهولت پایش ویژگی‌های کیفی خاک می‌نماید. بنابراین انجام پژوهش‌هایی مرتبط با تغییر کاربری به عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی و ویژگی‌های خاکی ضروری می‌باشد. این مطالعه به منظور بررسی اثر کاربری‌های مختلف و شیب بر ویژگی‌های خاک به ویژه اشکال مختلف آهن و شاخص‌های مغناطیسی خاک انجام گردیده است.

تکرار و در مجموع ۴۰ نمونه در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SAS نسخه 9.3 انجام شد. توزیع فراوانی با کمک پارامترهای آماری شامل میانگین، میانه، حداقل، حداکثر، ضریب تغییرات، چولگی و کشیدگی با استفاده از نرم افزار SAS نسخه 9.3 انجام گرفت. مقایسه میانگین متغیرها با استفاده از آزمون دانکن در سطح احتمال ۵٪ انجام گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ توصیف آماری ویژگی‌های مغناطیسی، فیزیکی و شیمیایی خاک در کاربری‌های مطالعه شده و **جدول ۲** مقایسه میانگین ویژگی‌های مورد مطالعه در شیب‌ها و کاربری‌های مختلف را نشان می‌دهند.

پلاستیکی کوچک با قطر ۲/۲ سانتی‌متر ریخته تا ارتفاع آن به حدود ۲cm برسد. قرائت‌های شاهد بر روی ظروف خالی در ابتدا و انتهای قرائت نمونه خاک، جهت تصحیح اثرات احتمالی ظرف بر میزان پذیرفتاری مغناطیسی انجام گرفت.

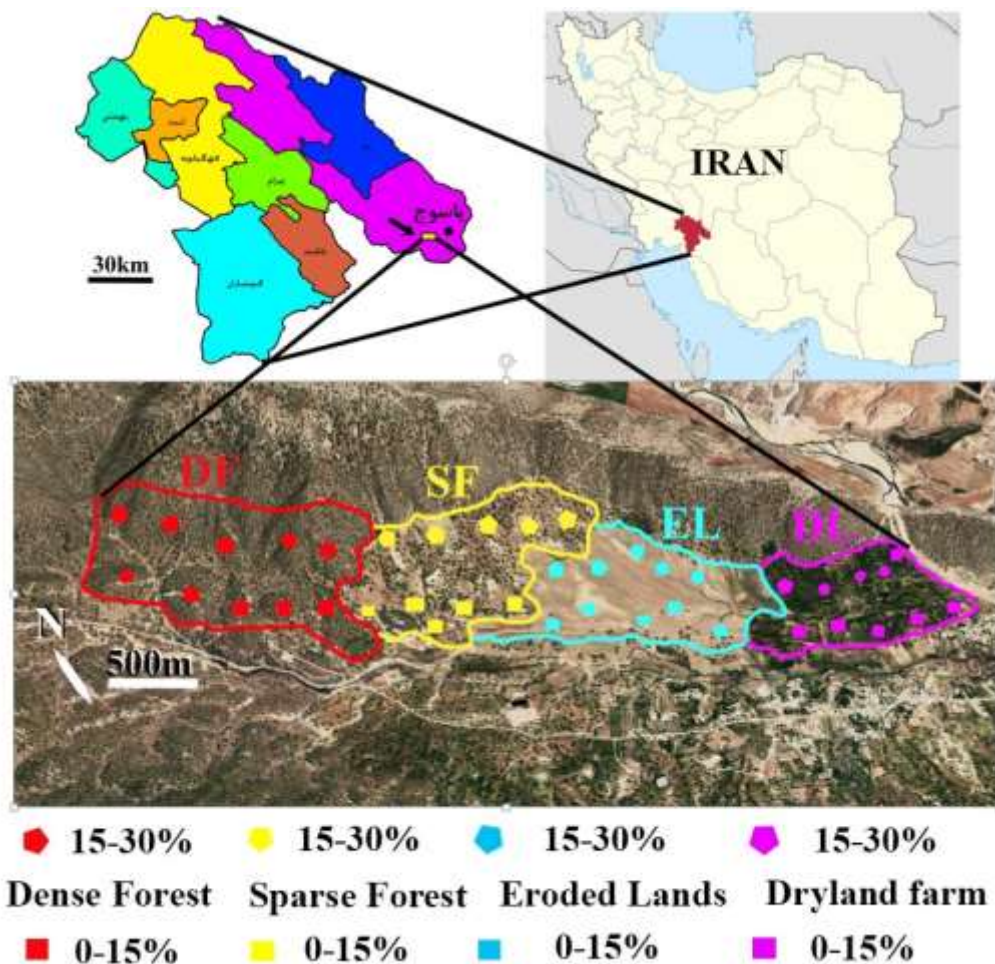
پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس ($X_{fd}\%$) با استفاده از فرمول (۱) به عنوان شاخصی از حضور ذرات خیلی ریز فرومغناطیس خاک ساز ناشی از فرآیندهای خاکساز محاسبه گردید (Dearing, 1999).

$$x_{fd}\% = \frac{(x_{lf} - x_{hf})}{x_{lf}} \times 100$$

(۱)

تجزیه‌های آماری

برای تجزیه آماری داده‌ها، طرح فاکتوریل (فاکتور ۱: کاربری در چهار سطح، فاکتور ۲: موقعیت شیب در دو سطح)، در هر موقعیت ۵



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در کشور و استان کهگیلویه و توزیع نقاط نمونه برداری خاک در کاربری‌های انتخاب شده

Figure 1- Geographic location of the studied region in Iran and Kohgilouye Province and distribution of soil sampled point in selected land uses

تبدیل کاربری‌های طبیعی زمین به اراضی زراعی و تخریب ساختمان، به عنوان دو عامل مهم برای افزایش چگالی ظاهری خاک‌ها عنوان شده است (Celik, 2005). ساختمان مناسب و ثبات خاکدانه‌ها در نتیجه وجود ماده آلی در افق سطحی خاک موجب افزایش تخلخل، کاهش چگالی ظاهری، افزایش نفوذپذیری، کاهش روان‌آب و نهایتاً کاهش فرسایش خاک خواهد شد (Adélia et al., 2011; Pathak et al., 2004).

بافت خاک‌های مطالعه شده لوم رسی شنی تا رسی می‌باشد. میزان رس در کاربری‌های جنگل متراکم، جنگل تنک، زراعی و اراضی فرسایش‌یافته به ترتیب کاهش یافته‌است، گرچه بین کاربری‌های زراعی و اراضی فرسایش‌یافته تفاوت معنی‌دار مشاهده نشد (جدول ۲). کاهش ماده آلی و همچنین دخالت انسان منجر به تخریب خاکدانه و جدا شدن ذرات رس و انتقال آنها از اراضی می‌شود. همچنین اثر شیب بر بافت خاک در همه کاربری‌ها (به جز اراضی فرسایش‌یافته) معنی‌دار بوده است و مقادیر بالاتر رس در پایین شیب مشاهده شده است (جدول ۲). حاج‌عباسی و همکاران (Hajabbasi et al., 1997) با مطالعه بافت خاک لایه سطحی منطقه لردگان بیان داشتند که مقدار رس خاک تحت کشت، نسبت به خاک جنگل کمتر است.

ضرایب تغییرات برای اکثر عوامل کمتر از ۳۵ درصد می‌باشد (جدول ۱) که بیانگر یکنواختی نسبی نمونه‌برداری در نقاط نمونه‌برداری و دقت آزمایش‌های آماری است (Ogunkunle and Eghaghara, 2007).

ماده آلی خاک‌ها به عنوان یک شاخص کیفی مهم در دامنه ۱/۳۹ تا ۷/۴۵ درصد متغیر بوده است که مقادیر بالاتر در کاربری جنگلی متراکم مشاهده شده است. مقدار ماده آلی در کاربری جنگل متراکم با سایر کاربری‌ها تفاوت معنی‌داری داشت، اما بین کاربری‌های جنگل تنک و اراضی دیمزار تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد (جدول ۲).

چگالی ظاهری خاک‌ها در دامنه ۱/۱۷ تا ۱/۷۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نوسان بوده است. کمترین میزان در جنگل متراکم (۱/۲۲) گرم بر سانتی‌متر مکعب و بیشترین میزان در اراضی فرسایش یافته (۱/۶۳) گرم بر سانتی‌متر مکعب مشاهده شده است (جدول ۲). همچنین اثر شیب فقط در کاربری‌های جنگل متراکم و اراضی فرسایش‌یافته معنی‌دار بوده است و در دو کاربری دیگر تفاوتی را نشان ندادند (جدول ۲). خاک اراضی زراعی به دلیل خاک‌ورزی و عبور ماشین‌آلات کشاورزی و همچنین مقدار ماده آلی کمتر، متراکم‌تر می‌باشند که توسط پژوهشگران زیادی افزایش چگالی ظاهری خاک‌ها طی تغییر کاربری اراضی به کاربری زراعی گزارش شده است (Carter et al., 1998; Celik, 2005; Evrendilek et al., 2004; Islam and Weil, 2000). تجزیه مواد آلی خاک بر اثر

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های مغناطیسی، فیزیکی و شیمیایی خاک در کاربری‌های مطالعه شده

Table 1- Descriptive statistics of soil magnetic and physical-chemical properties of the soils of the studied pedons (n = 40)¹

متغیر	واحد	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات	چولگی	کشیدگی
Variable	Unit	Minimum	Maximum	Mean	SD	CV (%)	Skew	Kurtosis
Sand	%	16.0	46	31.9	9.33	29.2	-0.27	-1.49
Silt	%	24.0	51	35.4	6.79	19.2	0.49	-0.66
Clay	%	23.0	48	32.6	6.79	20.8	0.54	-0.63
BD	g cm ⁻³	1.17	1.70	1.42	0.14	9.9	0.05	-0.99
CCE	%	11.1	33.8	23.6	5.06	21.4	-0.44	-0.01
OM	%	1.39	7.45	3.04	1.10	36.5	1.29	0.99
Feo	g kg ⁻¹	0.01	0.16	0.05	0.03	32.8	1.58	2.45
Fed	g kg ⁻¹	0.42	1.51	0.88	0.28	32.3	0.45	-0.76
Fet	g kg ⁻¹	1.03	2.04	1.47	0.26	17.8	0.52	-0.75
Feo/Fed	-	0.02	0.13	0.06	0.02	37.5	1.05	2.06
χ _{lf}	10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	36.7	96.6	61.8	19.4	31.4	0.36	-1.36
χ _{hf}	10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹	38.7	90.9	59.1	17.9	30.3	0.36	-1.36
χ _{fd}	%	1.93	7.2	4.05	1.18	29.1	0.41	-0.55
Fed/Fet	-	0.36	0.82	0.58	0.10	17.8	-0.08	-0.48

¹SD: standard deviation, CV: coefficient of variation, Skew: skewness

OM: مواد آلی خاک (Organic matter) BD (Bulk Density): چگالی ظاهری CCE: کربنات کلسیم معادل (Calcium Carbonate Equivalent) χ_{lf}: پذیرفتاری مغناطیسی خاک در فرکانس پایین (Low Frequency Magnetic Susceptibility) χ_{hf}: پذیرفتاری مغناطیسی خاک در فرکانس بالا (High Frequency Magnetic susceptibility) χ_{fd}: پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (Frequency Dependent Magnetic Susceptibility) Feo: آهن اکزالاتی (Oxalate extractable Fe)، Fed: آهن دی‌تیوناتی (Dithionite extractable Fe)، Fet: آهن کل (Total Fe).

عامل شیب به جز در کاربری جنگل متراکم بر تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی سایر کاربری‌ها در این منطقه اثر معنی‌داری نداشته است (جدول ۲). مطالعات دیگر نشان داده است که معمولاً میزان پذیرفتاری در پایین شیب به دلیل تحول در ماده مادری افزایش می‌یابد که این موضوع مرتبط با تغییرات بخش ریز خاک است (De Jong et al., 1998; Sparks, 1996). همچنین مطالعات کوئینانو و همکاران (Quijano et al., 2011) که در اراضی کشت شده در شمال شرق اسپانیا انجام شد نشان داد که پذیرفتاری مغناطیسی تحت تاثیر ارتفاع و شیب قرار گرفته به طوری که بیشترین میزان پذیرفتاری در بالادست شیب و کمترین میزان در پایین‌دست شیب مشاهده شد. مطالعات انجام گرفته پیرامون پذیرفتاری مغناطیسی خاک‌های استان کهگیلویه و بویراحمد، حداکثر مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی را در موقعیت‌های پایدار ژئومورفولوژیک و در شیب‌های کمتر و با مقادیر بالاتر ذرات رس نشان می‌دهند (Owliaie et al., 2018; Owliaie, 2014; Owliaie et al., 2006).

پستی و بلندی ارتباط نزدیکی با زهکشی خاک و انتقال ذرات خاک داشته که می‌تواند بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک نیز موثر باشد. مطالعات پذیرفتاری بر روی یک ردیف پستی و بلندی، بر اساس اینکه کدام اندازه ذره بر بخش مغناطیسی تاثیر دارد، ارتباط‌های مختلفی را نشان می‌دهد. دی‌یانگ و همکاران (De Jong et al., 1998) اظهار نمودند که میزان پذیرفتاری مغناطیسی در پایین شیب به دلیل هوادیدگی بیشتر ماده مادری می‌یابد که این موضوع را مرتبط با تغییرات بخش ریز خاک دانسته‌اند.

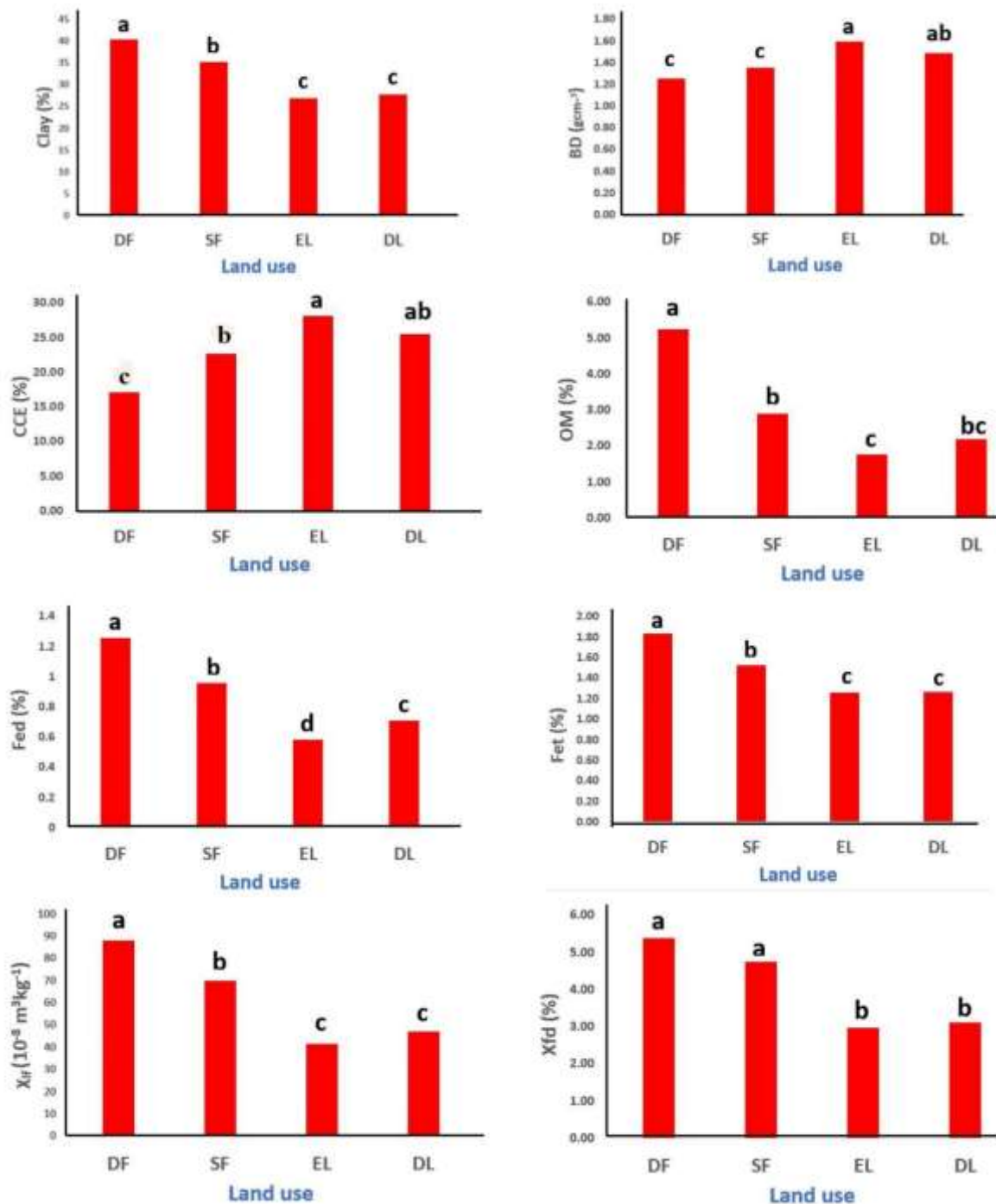
انتقال ذرات ریز خاک و به ویژه رس یکی از مهمترین دلایل افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در بخش‌هایی است که رس رسوب کرده است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ذرات ریز مغناطیسی (از جمله مگنیت) در طی این فرآیند، همراه با ذرات رس به صورت پوشش روی رس انتقال می‌یابند (Sadiki et al., 2011; Mokhtari et al., 2009).

وفائی‌زاده و همکاران (Vafaiezhadeh et al., 2016) مطالعه‌ای را در اراضی تپه‌ماهوری استان کهگیلویه و بویراحمد انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که میزان پذیرفتاری مغناطیسی در کاربری‌های مختلف در موقعیت‌های پایین شیب به طور معنی‌داری بیشتر از موقعیت‌های بالای شیب بوده که به هدررفت پیوسته خاک سطحی در نقاط بالادست و اضافه شدن این ذرات به قسمت‌های پایین‌دست نسبت داده شده است. همچنین کاهش معنی‌دار مقدار کربنات کلسیم در موقعیت‌های پایین شیب، که ناشی از شیب کمتر و آبشویی بیشتر در خاک رخ می‌باشد، از دلایل احتمالی دیگر افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در این موقعیت‌ها گزارش شده است.

دلیل این امر تجزیه مواد آلی و از هم پاشیده شدن خاکدانه‌ها در اراضی تحت کشت اعلام شده است که ذرات ریزتر از طریق فرسایش حمل شده و ذرات درشت‌تر بر جای می‌مانند. در مطالعه دیگری مرتبط با اثر تغییر کاربری بر بافت خاک در منطقه یاسوج گزارش شده است که جنگل‌تراشی و اجرای عملیات زراعی طولانی مدت بر روی اراضی شیب‌دار، بافت خاک را تحت تاثیر قرار داده و از کلاس غالب لوم رسی سیلتی در جنگل به کلاس سبک‌تر لوم سیلتی در کاربری زراعی تغییر داده است. دلیل این امر اثر فرسایش و از بین رفتن لایه‌های سطحی و رخنمون شدن لایه‌های عمقی در کاربری زراعی گزارش شده است (Vacca et al., 2000).

در خاک‌های مورد مطالعه پذیرفتاری مغناطیسی خاک در فرکانس پائین (f_{if}) در دامنه $10^{-8} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3$ تا $36/7 \times 10^{-8}$ در نوسان بوده‌است که اختلاف حدوداً ۳ برابری را نشان می‌دهد. افزایش پذیرفتاری خاک اساساً به دلیل تشکیل پدوژنیک کانی‌های فری‌مگنتیک می‌باشد که به میزان زیادی به عوامل خاک‌ساز از جمله پذیرفتاری مغناطیسی و پوشش گیاهی بستگی دارد (Feng and Johnson, 1995; Singer et al., 1996). کاربری‌های جنگل متراکم و تنک به ترتیب با مقادیر $91/5 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3$ و $72/5 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3$ بیشترین مقدار و کاربری اراضی فرسایش یافته با پذیرفتاری مغناطیسی $44/2 \times 10^{-8} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3$ کمترین مقدار را به خود اختصاص دادند (جدول ۲). تفاوت معنی‌داری بین مقدار f_{if} در همه کاربری‌ها به جز اراضی فرسایش یافته و کشت دیم مشاهده شد (شکل ۲). با توجه به فرسایش بیشتر در کاربری زراعی، انتقال رس و در نتیجه ذرات ریز کانی‌های مغناطیسی همراه آن به میزان بیشتری صورت گرفته و در نتیجه غلظت کانی‌های مغناطیسی در این کاربری نسبت به جنگل کمتر می‌باشد. محققین زیادی در مطالعات خود بیان کردند که تفاوت‌های معنی‌داری در میانگین پذیرفتاری مغناطیسی کاربری‌های مختلف وجود دارد، خاک‌های کشت‌شده به طور معنی‌داری، میانگین پذیرفتاری مغناطیسی پایین‌تری نسبت به کاربری‌های طبیعی جنگل و مرتع دارند. موقعیت زمین‌نما بر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی تاثیرگذار می‌باشد (De Jong et al., 2000; Hussain et al., 2014; Sadiki et al., 2009; kanu et al., 1998). تغییر کاربری بر پذیرفتاری مغناطیسی اثر معنی‌داری داشته است و باعث کاهش معنی‌دار آن در کاربری تحت کشت به دلیل هدررفت بیشتر رس و در نتیجه ذرات ریز مغناطیسی همراه آن شده است. خصوصیات مانند مقدار آهک، چگالی ظاهری، پهاش و درصد سیلت با تغییر کاربری از مرتع به کشاورزی، اغلب به طور معنی‌داری افزایش می‌یابند (Rahimi et al., 2013).

همچنین نتایج نشان داد که اگر چه مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در پایین شیب (با بافت سنگین‌تر) بالاتر بوده است، اما در مجموع



شکل ۲- مقایسه میانگین برخی ویژگی‌های خاک بین کاربری‌های مختلف در عمق ۱۵-۰ سانتی‌متر

(DF: کاربری جنگل متراکم، SF: کاربری جنگل تنک، EL: کاربری اراضی فرسایش یافته، DL: کاربری کشت دیم).

Figure 2- The comparison of mean soil properties in different land uses at 0-15 cm (DF: Dense Forest, SF: Sparse Forest, EL: Eroded land, DL: Dryland Farm).

هستگی مثبت و معنی‌داری بین مقدار رس و پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مورد مطالعه به دست آمد ($R^2=0.74$, $P<0.01$) (شکل

در منطقه مورد مطالعه نیز به نظر می‌رسد که تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی تا حدود زیادی تحت تاثیر تغییرات بافت خاک بوده است.

تفاوت معنی‌داری بین مقدار کربنات کلسیم معادل در همه کاربری‌ها به جز اراضی فرسایش‌یافته و کشت دیم مشاهده شد (شکل ۲). همچنین اثر شیب بر میزان کربنات کلسیم معادل فقط در کاربری جنگل متراکم معنی‌دار بوده‌است. در بین مواد دیامغناطیسی، گچ و کربنات‌ها به دلیل تحرکی که طی فرایندهای خاک‌سازی در خاک دارند، باعث رقیق شدن تأثیر مواد مغناطیسی می‌شوند. مواد آلی که به خاک (به‌ویژه به سطح خاک) اضافه می‌شوند و هم‌چنین رطوبت موجود در خاک نیز تأثیر مشابهی دارند (Dearing, 1999). با توجه به آهکی بودن مواد مادری و تغییرات پستی و بلندی در منطقه مطالعاتی، این عامل نیز بر پهنه‌بندی ویژگی‌های مغناطیسی خاک‌ها مؤثر بوده‌است.

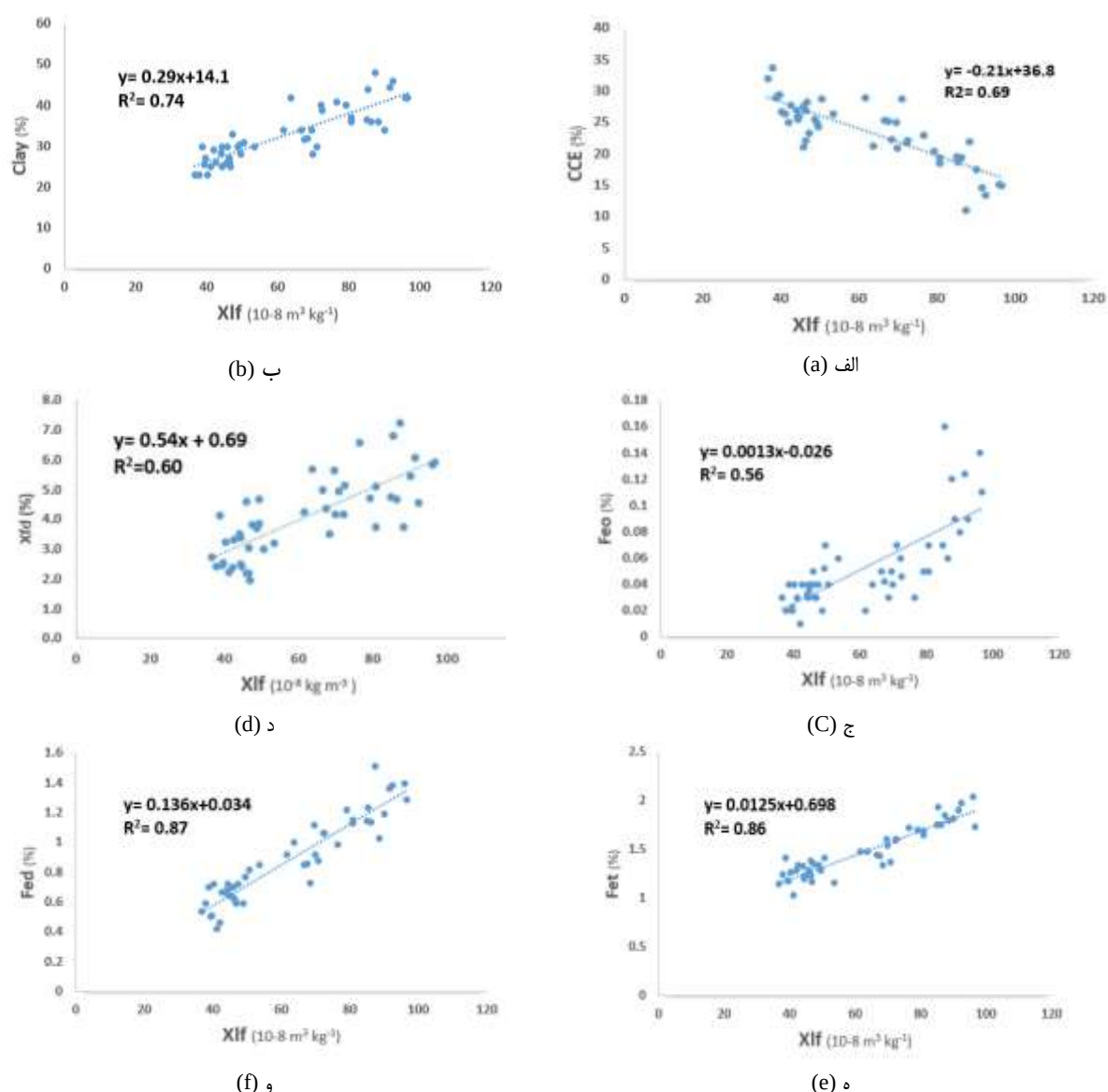
نفوذپذیری بیشتر خاک‌های جنگلی با توجه به وزن مخصوص ظاهری کمتر و ماده آلی بیشتر که موجب افزایش شدت تنفس خاک و تولید بیشتر دی اکسید کربن و حل شدن کربنات‌ها توسط اسید کربنیک می‌شود، شرایط را برای آبشویی بیشتر کربنات کلسیم از سطح خاک فراهم می‌نماید. تجزیه مواد آلی توسط ریزموجودات، منجر به تولید اسیدهای آلی می‌شود که بر انحلال و خنثی‌سازی کربنات‌های خاک مؤثر می‌باشند (Nasiri et al., 2019). بر این اساس رابطه منفی و معنی‌داری بین مقادیر کربنات کلسیم و پذیرفتاری مغناطیسی ($R^2=0.69$, $P<0.01$) خاک‌های مطالعه شده بدست آمد (شکل ۳ الف). تغییر در ترکیب مواد در سطح خاک و یا سایر تغییرات شدید در توده خاک می‌تواند میزان پذیرفتاری مغناطیسی در یک افق را نسبت به سایر افق‌ها تغییر دهد که این امر مربوط به افزایش یا کاهش غلظت ترکیبات مغناطیسی در خاک می‌باشد (De Jong et al., 2000). بارندگی زیاد، پوشش جنگلی، پایداری ژئومورفیک، مقدار بالای ماده آلی در خاک، زهکشی مناسب، تخلیه خاک از مواد دیامگنتیک و تکامل ژنتیکی از عوامل افزایش‌دهنده پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های جنوب ایران نام برده‌شده‌اند (Owliaie and Najafi Ghiri, 2018; Owliaie et al., 2006).

شاخص پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) در خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه ۱/۹۳ تا ۷/۲ درصد متغیر بوده است. مقادیر بیشتر این شاخص به ترتیب در کاربری‌های جنگل متراکم و جنگل تنک و حداقل مقدار در اراضی فرسایش یافته اندازه‌گیری شده است (شکل ۲). تفاوت معنی‌داری بین کاربری‌های جنگل و دو کاربری دیگری مشاهده شده است، ضمن آنکه اثر شیب فقط در کاربری جنگل متراکم بر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس (χ_{fd}) مؤثر بوده است (جدول ۲). همانگونه که ذکر شد مقادیر χ_{fd} در خاک‌های مطالعه‌شده همگی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشند. دیرینگ (Dearing, 1999) مدلی را برای تفسیر پذیرفتاری مغناطیسی وابسته به فرکانس به شرح زیر پیشنهاد کرد: بر این اساس نمونه‌های خاکی که χ_{fd} کمتر از ۲ درصد دارند، اساساً فاقد ذرات سوپرپارامگنتیک (SP) هستند و اغلب دارای ذرات با اندازه بزرگتر از ۰/۰۳ میکرون هستند.

۳ ج). بر این اساس با توجه به بیشتر بودن مقدار رس در پایین دست شیب، مقادیر پذیرفتاری مغناطیسی در این بخش نیز بالاتر بوده است. با توجه به اینکه همبستگی بالایی بین مقادیر شن و سیلت با پذیرفتاری مغناطیسی بدست نیامد، این امر می‌تواند بیانگر این مطلب باشد که منشاء ذرات مغناطیس عمدتاً در بخش رس خاک می‌باشد. ضمن آنکه کاربری جنگل متراکم نیز به دلیل مقادیر بالاتر رس در بافت خاک حداکثر مقدار پذیرفتاری مغناطیسی را نشان داد (جدول ۲). تغییرات مقدار ماده آلی خاک در کاربری‌ها و شیب‌های مختلف نسبتاً زیاد می‌باشد (۱/۴ تا ۷/۵ درصد). تفاوت معنی‌داری بین همه کاربری‌ها بجز دو کاربری اراضی فرسایش‌یافته و اراضی دیم از نظر مقدار ماده آلی خاک مشاهده شد. اثر شیب نیز فقط در کاربری‌های جنگل متراکم و تنک بر میزان ماده آلی خاک مؤثر بوده است (شکل ۲، جدول ۲). در بسیاری از پژوهش‌ها به نقش مواد آلی بر افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک اشاره شده است. دیرینگ و همکاران (Dearing et al., 1985) اظهار داشتند که افزایش میزان ماده آلی در سطح خاک، به خصوص در مناطق مرطوب‌تر و خنک‌تر عاملی برای افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در سطح خاک می‌باشد. فعالیت ریزموجودات عاملی در جهت افزایش تبدیل اکسیدهای آهن غیرمغناطیسی به اکسیدهای مغناطیسی آن می‌باشد. همچنین اشاره شده است که مقدار بیشتر مواد آلی و ریزموجودات هتروتروف در نزدیک سطح خاک می‌تواند تشکیل کانی‌های فری-مگنتیت را که نقش مهمی در افزایش پذیرفتاری مغناطیسی خاک دارد، افزایش دهند (Fine et al., 1989).

در خاک‌های مورد مطالعه رابطه مثبت و معنی‌داری نیز بین مقدار ماده آلی و پذیرفتاری مغناطیسی ($R^2=0.75$, $P<0.01$) وجود دارد. همچنین افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در خاک سطحی می‌تواند ناشی از فعالیت باکتری مگنتوتاکیک و همچنین چرخه احیاء و اکسید در افق سطحی در مقایسه با افق‌های عمقی خاک باشد. افق‌های سطحی به دلیل اینکه بیشتر در معرض فرایندهای خشک و تر شدن نسبت به عمق خاک هستند، امکان تجربه بیشتر شرایط اکسایش-کاهش را دارند. موجودات زنده اثرات متفاوتی بر تشکیل کانی‌های مغناطیسی دارند (Yang et al., 2009). بعلاوه نوع کاربری و پوشش گیاهی بر کلاته شدن و هوادیدگی اسیدی و در نهایت فرآیندهای خاصی مانند پادزولی شدن که تعیین کننده تشکیل و تجمع کانی‌های مغناطیسی است، مؤثرند (Blundell et al., 2009). فرسایش خاک و خروج ذرات رس بسیار ریز حاوی اکسیدهای آهن مغناطیسی از خاک منجر به کاهش پذیرفتاری مغناطیسی به ویژه در کاربری‌های زراعی و فرسایش یافته شده است.

کمترین مقدار کربنات کلسیم در کاربری جنگل متراکم و شیب S1 (به میزان ۱۴/۷ درصد) و بیشترین مقدار در اراضی فرسایش‌یافته و شیب S2 (به میزان ۲۹/۳ درصد) مشاهده شده است (جدول ۲).



شکل ۳- همبستگی میان پذیرفتاری مغناطیس (χ_{lf}) و برخی ویژگی‌های خاک در خاک‌های مطالعه شده
Figure 3- Correlation between magnetic susceptibility (χ_{lf}) and some of soil properties in the studied soils

ذرات به میزان زیادی به عوامل خاک‌ساز بستگی داشته و بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های این منطقه بیشتر متأثر از فرایندهای خاکساز می‌باشد (Lement *et al.*, 2005). فرضیه مطرح در مورد افزایش پذیرفتاری مغناطیسی، بیشتر اشاره به تغییر شکل درجای آهن غیرمغناطیسی، به ریز بلورهای مگنتیت و مگهمیت دارد (Singer *et al.*, 1996).

میزان Fe_o (شامل ترکیبات آلی و بی‌شکل آهن) در خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه ۰/۰۱ تا ۰/۱۶ درصد (میانگین ۰/۰۵ درصد) متغیر است (جدول ۱). وجود مواد آلی زیاد و شرایط زهکشی ضعیف از عواملی است که منجر به افزایش میزان Fe_o در خاک می‌شوند

نمونه‌هایی که χ_{fd} آنها در دامنه ۲ تا ۱۰ درصد است، دارای مخلوطی از ذرات SP و دانه‌های درشت فاقد سوپراپارامگنتیک و یا ذرات سوپراپارامگنتیک با اندازه کوچکتر از ۰/۰۰۵ میکرون بوده و نمونه‌هایی که حاوی بیش از ۷۵ درصد ذرات SP می‌باشند، آنها بزرگتر از ۱۰ درصد است. با توجه به اینکه χ_{fd} در خاک‌های مورد مطالعه در دامنه ۱/۹۳ تا ۷/۲ درصد متغیر بوده است، بر اساس مدل یاد شده ذرات مغناطیسی این خاک‌ها دارای مقادیر کم تا متوسط از ذرات SP هستند (Jordanova, 2017). مقادیر بالای χ_{fd} در کاربری جنگل، بیانگر غالب بودن فرایندهای پدوژنز در تشکیل ذرات ریز SP در مقایسه با ذرات درشت فرومغناطیس توارثی می‌باشد. تشکیل این

نسبت Fe_0/Fe_d در خاک‌های این مطالعه در دامنه ۰/۰۴ تا ۰/۰۹ بوده است. این نسبت شاخصی از تفاوت در محیط پدوژنیکی خاک از جمله وجود لیگاندهای آلی، سن خاک، درجه هوادهی و شرایط اکسایش-کاهش می‌باشد (Owliaie and Najafi Ghiri, 2018). خاک‌های غیراکوئیک دارای نسبت کمتری از Fe_0/Fed هستند که بیانگر حضور بیشتر اکسیدهای کریستالی آهن (هماتیت و گوتیت) هستند. به گفته لو و همکاران (Lu et al., 2012). خاک‌های هیدرومورفیک تشکیل شده بر روی مواد مادری متفاوت دارای نسبت Fe_0/Fed حدود ۰/۵۵ تا ۰/۶۰ می‌باشند که بیانگر فازهای اکسید آهن با تبلور ضعیف‌تر نسبت به اکسیدهای آهن تشکیل شده در خاک‌های خشک با مواد مادری یکسان هستند.

با توجه به پایین بودن این نسبت، خاک‌های منطقه مطالعاتی دارای شرایط زهکشی خوبی بوده و اکسیدهای آهن عمدتاً با تبلور خوب حضور دارند. مقادیر بالاتر این نسبت در کاربری‌های جنگل متراکم و کشت دیم مشاهده شد. همچنین اثر شیب فقط در کاربری جنگل متراکم معنی‌دار بوده است. در مطالعه مغناطیس‌سنجی صورت گرفته در خاک واحدهای مختلف فیزیوگرافی در دشت بشار یاسوج گزارش شد که شرایط زهکشی ضعیف موجب کاهش ۴۳ درصدی پذیرفتاری مغناطیسی، کاهش ۴۴ درصدی Fe_d ، افزایش ۵۲ درصدی Fe_d و کاهش ۶۵ درصدی شاخص تبلور (Fe_d/Fe_t) شده است (Enjavinejad et al., 2017). در شرایط هیدرومورفیک و کمبود اکسیژن، آهن از فرم $Fe(III)$ به شکل $Fe(II)$ تبدیل می‌گردد. در این شرایط امکان تشکیل اکسیدهای آهن بلورین کمتر وجود داشته و ترکیبات آهنی به شکل آلی و بی‌شکل (از جمله پیریت و سیدریت با تبلور کم) می‌باشند (Owliaie and Rezaie, 2014).

والایی و همکاران (Valaee et al., 2016) مطالعه‌ای را در خاک‌های لسی شمال ایران با رژیم‌های رطوبتی مختلف به منظور تعیین ارتباط پذیرفتاری مغناطیسی با برخی ویژگی‌های خاک از جمله شکل‌های آهن انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که پذیرفتاری مغناطیسی با Fed و $Fed-Fe_0$ همبستگی مثبت و معنی‌دار و با ماده آلی، درصد کربنات کلسیم، درصد سیلت و نسبت Fe_0/Fe_d همبستگی منفی و معنی‌دار دارد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش که به منظور ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی و موقعیت شیب بر تغییر برخی ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مغناطیسی خاک صورت گرفت، نشان داد که نوع کاربری اراضی و شیب زمین‌ها از عوامل موثر بر تغییر ویژگی‌های خاک در منطقه مختار یاسوج می‌باشند. تغییرات کاربری همراه با کاهش مواد آلی و تخریب خاک‌دانه‌ها و مستعد نمودن اراضی برای فرسایش و هدررفت

(Owliaie and Najafi Ghiri, 2018). حداکثر میزان Fe_0 در کاربری جنگل متراکم (با مواد آلی بیشتر) و شیب کمتر (۰ تا ۱۵ درصد) مشاهده شد. ماندگاری بیشتر رطوبت در شیب‌های پایینی، شرایط را برای افزایش مقدار ترکیبات غیربلورین آهن فراهم می‌نماید. اختلاف معنی‌داری بین میزان Fe_0 در کاربری‌های جنگل تنک و کشت دیم مشاهده نشد. همچنین اثر شیب در کاربری‌های جنگل متراکم و کشت دیم بر میزان Fe_0 معنی‌دار بوده است (جدول ۲). رابطه مثبت و معنی‌داری بین مقادیر Fe_0 و پذیرفتاری مغناطیسی ($R^2=0.56$) خاک‌های مطالعه شده بدست آمد (شکل ۳ ج).

مقدار Fed (شامل ترکیبات بلورین آهن) در خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه ۰/۴۲ تا ۱/۵۱ درصد (میانگین ۰/۸۸ درصد) بوده است (جدول ۱). بیشترین مقدار Fed در کاربری جنگل متراکم و کمترین مقدار در اراضی فرسایش یافته مشاهده شد (جدول ۲). اختلاف معنی‌داری بین مقادیر Fed در کاربری‌های مختلف مشاهده شد (شکل ۲). همچنین اثر شیب نیز در کلیه کاربری‌ها معنی‌دار می‌باشد و مقادیر بیشتر در شیب کمتر (۱۵-۰ درصد) مشاهده شد. رابطه مثبت و معنی‌داری بین مقادیر Fe_d و پذیرفتاری مغناطیسی ($R^2=0.87$) خاک‌های مطالعه شده بدست آمد (شکل ۳ و).

مقدار Fet (آهن کل) در خاک‌های مطالعه‌شده در دامنه ۱/۰۳ تا ۲/۰۴ درصد (میانگین ۱/۴۵ درصد) بوده است (جدول ۱). بیشترین مقدار Fet در کاربری جنگل متراکم و کمترین مقدار در اراضی فرسایش یافته مشاهده شدند (جدول ۲). اختلاف معنی‌داری بین مقادیر Fet در کاربری‌های مختلف بجز اراضی فرسایش یافته و کشت دیم مشاهده شد (شکل ۲). همچنین اثر شیب نیز در کلیه کاربری‌ها بجز کشت دیم معنی‌دار بوده است و مقادیر بیشتر در شیب کمتر (۱۵-۰ درصد) مشاهده شد. رابطه مثبت و معنی‌داری بین مقادیر Fe_t و پذیرفتاری مغناطیسی ($R^2=0.86$, $P<0.01$) خاک‌های مطالعه شده بدست آمد (شکل ۳ ه). با توجه به همبستگی معنی‌دار و نسبتاً بالای شکل‌های آهن به ویژه Fed و Fet با پذیرفتاری مغناطیسی در خاک‌های مورد مطالعه، می‌توان با اندازه‌گیری این شاخص (χ_{lf}) که روش سریع‌تری است، مقادیر اشکال آهن خاک را تخمین زد. در مطالعه اثر پستی و بلندی و کاربری اراضی بر پذیرفتاری مغناطیسی خاک در دشت مادوان در شمال یاسوج، رابطه مثبت و معنی‌داری بین χ_{lf} و Fe_d در خاک‌های با زهکشی مناسب ($R^2=0.87$, $p<0.01$) مشاهده شد (Owliaie and Najafi Ghiri, 2015).

اثر شیب تقریباً در همه کاربری‌ها بر شکل‌های آهن معنی‌دار بوده است. با توجه به اینکه تغییرات شیب و پستی و بلندی بر بسیاری ویژگی‌های خاک از جمله بافت خاک موثر است و ارتباط معنی‌دار مقدار رس با پذیرفتاری مغناطیسی، تغییرات مقدار رس (بافت) در شیب‌های مختلف (جدول ۲ و شکل ۳)، می‌تواند یکی از عوامل اصلی بر تغییرات شکل‌های آهن و پذیرفتاری مغناطیسی باشد.

پارامگنتیک و ذرات درشت‌تر فرومگناطیس توارنی در پذیرفتاری مغناطیسی خاک می‌باشد.

اثر شیب، تقریباً در همه کاربری‌ها بر شکل‌های آهن معنی‌دار بوده است. با توجه به همبستگی نسبتاً بالای پذیرفتاری مغناطیسی (χ_{fd}) با برخی ویژگی‌های خاک از جمله شکل‌های آهن، بافت خاک، میزان ترکیبات دیامگنتیک از جمله کربنات کلسیم در خاک‌های مورد مطالعه، می‌توان با تعیین این شاخص (χ_{fd}) که روش سریع و ارزانی است، مقادیر این ویژگی‌های خاک را نیز تخمین زد. با توجه به نتایج این پژوهش و پژوهش‌های مشابه، این امکان وجود دارد که با استفاده از شاخص‌هایی مانند مغناطیس‌سنجی، مناطق حساسی را که در معرض تخریب زیادی بوده و کیفیت خاک آنها به دلیل نوع مدیریت، به میزان زیادی کاهش یافته، شناسایی و جهت انجام طرح‌های حفاظتی و مدیریتی مناسب از آنها بهره جست.

سپاسگزاری

هزینه‌های انجام این پژوهش از محل اعتبار طرح پژوهشی به شماره ۸۹/۵۸۱ معاونت پژوهشی دانشگاه یاسوج صورت گرفته که بدین وسیله از همکاری این معاونت قدردانی می‌شود.

ذرات رس و کانی‌های ریز مغناطیسی آهن بر بسیاری از ویژگی‌های خاک تأثیر گذاشته است. ماده آلی به عنوان یک شاخص مهم کیفی خاک، کاهش حدود ۳ برابری را در نتیجه تغییر کاربری از جنگل متراکم به اراضی فرسایش یافته نشان می‌دهد که متعاقب آن افزایش چگالی ظاهری و کاهش نفوذپذیری خاک و سایر شاخص‌های کیفی خاک می‌باشد. جنگل‌تراشی و عملیات زراعی طولانی مدت بر روی اراضی شیب‌دار، بافت خاک را از کلاس لوم رسی سیلتی در جنگل به کلاس سبک‌تر لوم سیلتی در کاربری زراعی تغییر داده است.

پذیرفتاری مغناطیسی خاک که تابع ذرات مغناطیسی خاک می‌باشد، به میزان زیادی تحت تأثیر تغییر کاربری و به میزان کمتر تحت تأثیر موقعیت شیب می‌باشد. با توجه به این‌که این شاخص تحت تأثیر عواملی چون بافت خاک، وضعیت زهکشی، شرایط فرسایشی، نسبت کانی‌های مغناطیسی آهن، شرایط تکاملی خاک و غیره قرار دارد، تغییرات کاربری از جنگل به سایر کاربری‌ها اثرات معنی‌داری (حدود ۲ برابر) بر این شاخص داشته است. کاهش معنی‌دار مقدار کربنات کلسیم در موقعیت‌های پایین شیب از دلایل دیگر افزایش پذیرفتاری مغناطیسی در این موقعیت‌ها می‌باشد. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده χ_{fd} (دامنه ۱/۹ تا ۷/۲ درصد)، ذرات مغناطیسی این خاک‌ها دارای مقادیر کم تا متوسط از ذرات پدوژنیک سوپر پارامگنتیک هستند که بیانگر تأثیر توأم ذرات ریز سوپر

منابع

- Adélia N., Nunes António C., de Almeida Celeste O., and Coelho A. 2011. Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography* 31: 687-699. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.12.006>.
- Afshari A., Khademi H., and Ayoubi S.H. 2015. Lithological and anthropogenic factors affecting magnetic properties of calcareous soils in Zanjan. *Journal of Water and Soil Conservation* 22(3): 73-88. (In Persian with English abstract)
- Amundson R., Asefaw Berhe A., Hopmans J.W., Olson C., Ester Sztein A., and Sparks D.L. 2015. Soil and human security in the 21st century. *Science* 348: 1-6. DOI: 10.1126/science.12610.
- Bewket W., and Stroosnijder L. 2003. Effects of agroecological land use succession on soil properties in Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Geoderma* 111: 85-98.
- Blake G.R., and Hartge K.H. 1986. Bulk density. In: A. Klute, (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods*, 2ed. Agronomy Monograph No 9. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 363-375.
- Blundell A., Dearing J.A., Boyle J.F., and Hannam J.A. 2009. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales. *Earth-Science. Review* 95: 158-188. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.05.001>.
- Carter M.R., Gregorich E.G., and Angers D.A. 1998. Organic C and N storage and organic C fractions in adjacent cultivated and forest soils of eastern Canada. *Soil Tillage Research* 47: 253-261.
- Celik I. 2005. Land use effects on organic matter and physical properties of soil in a southern Mediterranean highland of Turkey. *Soil Tillage Research* 83: 270-277.
- Day R. 1965. Particle fractionation and particle size analysis. P: 545-566. In A. Black et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1*. ASA and SSSA, Madison, WI.
- De Jong E., Nestor P.A., and Pennock D.J. 1998. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution. *Catena* 32: 23-35.
- De Jong E., Pennock D.J., and Nestor P.A. 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan. *Catena* 40(3): 291-305. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00080-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00080-1).

- 12- Dearing J. 1999. Environmental Magnetic Susceptibility: Using the Bartington MS2 System. Chi Publishing, Kenilworth, England.
- 13- Dearing J.A., Maher B.A., and Oldfield F. 1985. Geomorphological linkages between soils and sediments: The role of magnetic measurements. In: K.S. Richards, R.R. Arnett, S. Ellis, (eds.), Geomorphology and soils. London: George Allen and Unwin 245–266. <https://doi.org/10.4324/9780429320781-13>.
- 14- Doran J.W., and Parkin T.B. 1994. Defining and assessing soil quality, In: J.W. Doran et al. (eds.) Defining soil quality for a sustainable Environment, Soil Science Society of America, Special Publication, NO.35, Madison, Wisconsin, USA, pp: 3-21.
- 15- Enjavinejad M., Owliaie H.R., and Adhami E. 2017. Study of magnetic susceptibility of the soils of a toposequence case study: Beshar Plain, Kohgilouye Province. Journal of Water and Soil 31(2): 478-489. (In Persian with English abstract)
- 16- Evrendilek F., Celik I., and Kilic S. 2004. Changes in soil organic carbon and other physical soil properties along adjacent Mediterranean forest, grassland, and cropland ecosystems in Turkey. Journal Arid Environment 59: 743-752. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.002>.
- 17- Feng Z.D., and Johnson W.C. 1995. Factors affecting the magnetic susceptibility of a loess-soil sequence, Barton County, Kansas, USA. Catena 24: 25-37.
- 18- Fine P., Singer M.J., Laven R., Verosub K., and Southard R.J. 1989. Role of pedogenesis in distribution of magnetic susceptibility in two California chronosequences. Geoderma 44: 287-306. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(89\)90037-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(89)90037-2).
- 19- Hajabbasi M.A., Jalalian A., and Karimzadeh H.R. 1997. Deforestation effects on soil physical and chemical properties, Lordegan, Iran. Plant and Soil 190: 301-308. <https://doi.org/10.1023/A:1004243702208>.
- 20- Holmgren G.G.S. 1976. A rapid citrate-dithionate extractable iron procedure. Soil Science Society America Proceeding 31: 210-211.
- 21- Hussain I., Olson K.R., and Jones R.L. 1998. Erosion patterns on cultivated and uncultivated hill slopes determined by soil fly ash contents. Soil Science 163(9): 726-738.
- 22- Islam K.R., and Weil R.R. 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. Agriculture Ecosystem Environment 79: 9-16.
- 23- Jordanova N. 2017. Soil magnetism. Application in pedology, environmental science and agriculture. ISBN: 978-0-12-809239-2. 450p.
- 24- Kanu M.O., Meludu O.C., and Oniku S.A. 2014. Comparative study of top soil magnetic susceptibility variation based on some human activities. Geofísica Internacional 53(4): 411-423. [https://doi.org/10.1016/S0016-7169\(14\)70075-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7169(14)70075-3)
- 25- Lal R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. p. 131-142. In: R. Lal., J. Kimble., E. Levine., and B.A. Stewart (Eds.), Soils and Global Change, Advances in Soil Science CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- 26- Lal R., Mokma D., and Lowery B. 1999. Relation between soil quality and erosion, In: R. Lal (ed.). Soil Quality and Soil Erosion, 39-56, Soil and Water Conservation Society and CRC Press, Boca Raton.
- 27- Lement M., Karlton E., and Olsson M. 2005. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders farming system in Ethiopia. Agriculture, Ecosystems & Environment 105: 373-386.
- 28- Lu S.G., Chen D.J. Wang S.Y., and Liu Y.D. 2012. Rock magnetism investigation of highly magnetic soil developed on calcareous rock in Yun-Gui Plateau, China: evidence for pedogenic magnetic minerals. Journal Applied Geophysics 77: 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.11.008>.
- 29- Lu S.G., Xue Q.F., Zhu L., and Yu J.Y. 2008. Mineral magnetic properties of a weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. Catena 73: 23–33.
- 30- Magiera T., Strzyszcz Z., Kapicka A., and Petrovsky E. 2006. Discrimination of lithogenic and anthropogenic influences on topsoil magnetic susceptibility in Central Europe. Geoderma 130(3): 299–311.
- 31- McKeague J.A., Wang C., Ross G.J., Acton C.J., Smith R.E., Anderson D.W., Petapiece W.W., and Lord T.M. 1981. Evaluation of criteria for Argillic horizons (Bt) of soils in Canada. Geoderma 25: 63-74.
- 32- Mehmandoost F., Owliaie H.R., Adhami E., and Naghiha R. 2020. Changes in biological, chemical and soil fertility characteristics as a result of land use change (A case study: Mokhtar region of Yasouj). Journal Water Soil Science 23(4): 141-154. (In Persian with English abstract)
- 33- Moghbeli Z., Owliaie H.R., Adhami E. Najafi-Ghiri M., and Sanjari S. 2021. Pedogenesis and spatial distribution of soil magnetic properties along a lithotoposequence in an arid region of Southern Iran. Catena 198(5): 104979. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104979>.
- 34- Moghbeli Z., Owliaie H.R., Sanjari S., and Adhami E. 2019. Genetic study of soil-landscape relationship in arid region of Faryab, Kerman Province. Journal of Water and Soil 33(2): 333-347. (In Persian with English abstract)
- 35- Mokhtari Karchegani P., Ayoubi S., Lu S.G., and Honarju N. 2011. Use of magnetic measures to assess soil redistribution following deforestation in hilly region. Journal of Applied Geophysics 75: 227–236.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.07.017>.

- 36- Mullins C.E. 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-A review. *Journal Soil Science* 28: 223-246.
- 37- Munch J.C., and Ottow J.C.G. 1983. Reductive transformation mechanism of ferric oxides in hydromorphic soils. *Environment Biogeochemistry Ecology Bull* 35: 383-394.
- 38- Nasiri E., Owliaie H.R., Safari Y., and Sedghi-Asl M. 2019. Geostatistical assessing of some soil properties variability due to the oak land deforesting in Mokhtar Plain, Yasouj. *Applied Soil Research* 7(3): 83-97. (In Persian with English abstract)
- 39- Ogunkunle A.O., and Eghaghara O.O. 2007. Influence of land use on soil properties in a forest region of Southern Nigeria. *Soil Use and Management* 8(3): 121-124. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1992.tb00906.x>.
- 40- Owliaie H.R., and Najafi Ghiri M. 2015. Effects of topography and land use on the soil magnetic susceptibility, Case study: Madvan Plain, Kohgilouye Province. *Journal of Water and Soil* 18(70): 159-170.
- 41- Owliaie H.R., Adhami E., Najafi Ghiri M., and Shakeri S. 2018. Pedological investigation of a Litho-Toposequence in a semi-arid region of Southwestern Iran. *Eurasian Soil Science* 51(12): 1447-1461.
- 42- Owliaie H.R., and Najaf Ghiri M. 2018. The Magnetic Susceptibility and Iron Oxides of Aquic Soils in Southern Iran. *Eurasian Soil Science* 51(10): 1252-1265. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100095>.
- 43- Owliaie H.R. 2014. A magnetic investigation along a NE-SW transect of the Yasouj Plain, Southwestern Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science* 60(7): 1015-1024. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.855724>.
- 44- Owliaie H.R., and Rezaei S. 2014. Effect of topography and land use on genesis, chemical forms of Fe and Mn, and clay mineralogy of soils of Yasouj western plain. *Journal of Water and Soil Conservation* 21(2): 109-129. (In Persian with English abstract)
- 45- Owliaie H.R., Heck R.J., and Abtahi A. 2006. The magnetic susceptibility of soils in Kohgilouye, Iran. *Canadian Journal Soil Science* 86: 97-107. <https://doi.org/10.4141/S05-003>.
- 46- Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. 1982. *Methods of Soil Analysis, Second edition. Part 2: Chemical and Biological Properties*. Soil Science Society of America Journal Publisher.
- 47- Pathak P., Sahrawat K.L., Rego T.J., and Wani S.P. 2004. Measurable biophysical indicators for impact assessment: changes in soil quality. In: B. Shiferaw, H.A. Freeman., and S.M. Swinton. (Eds.), *Natural Resurce Management in Agriculture, Methods for Assessing Economic and Environmental Impacts*, ICRISAT. Patancheru, India. <https://doi.org/10.1079/9780851998282.0053>.
- 48- Quijano L., Gaspar L., López-Vicente M., Chaparr A.E., Machín J., and Navas A. 2011. Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils. *Latin mag Letters*, Volume 1, Special Issue, D10, 1-6. *Proceedings Tandil, Argentina*.
- 49- Rahimi M.R., Ayoubi S., and Abdi M.R. 2013. Magnetic susceptibility and Cs-137 inventory as influenced by land use change and slope position in a hilly, semiarid region of west-central Iran. *Journal of Applied Geophysics* 89: 68-75. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.11.009>.
- 50- Sadiki A., Faleh A., Navas A., and Bouhlassa S. 2009. Using magnetic susceptibility to assess soil degradation in the Eastern Rif, Morocco. *Earth Surface Processes and Landforms* 34: 2057-2069
- 51- Schwertmann U., and Taylor R.M. 1989. Iron oxides. PP. 379-438. In: J.B. Dixon and S.B. Weed (Eds.), *Minerals in soil environment*. Soil Science Society of America, Madison, USA.
- 52- Singer M.J., Verousb K.L., Fine P., and Tempas J. 1996. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils. *Quaternary International* 34-36: 243-248.
- 53- Sparks D.L. 1996. *Methods of soil analysis. Part 3 - chemical methods*, Soil Science Society of America, Wisconsin, Madison 1085-1121.
- 54- Thompson R., and Oldfield F. 1986. *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin, London. 227p.
- 55- Vacca S., Loddo G., Ollesch R., Puddu G., Serra D., and Tomasi A. 2000. Measurement of runoff and soil erosion in three areas under different land use in Sardinia, Italy. *Catena* 40: 69-92. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(00\)00088-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(00)00088-6).
- 56- Vafaiezadeh R., Ayoubi SH., Mosadeghi M.R., and Yousefifard M. 2016. Slope and land use changing effects on soil properties and magnetic susceptibility in hilly lands, Yasouj region. *Journal of Water and Soil* 30(2): 632-642. (In Persian with English abstract)
- 57- Valaee M., Ayoubi Sh., Khormali F., Gao Lu Sh., and Karimzadeh H.R. 2016. Using magnetic susceptibility to discriminate between soil moisture regimes in selected loess and loess-like soils in northern Iran. *Journal of Applied Geophysics* 127: 23-30 <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.02.006>.
- 58- Yang P., Mao R., and Shao H. 2009. An investigation on magnetic susceptibility of hazardous saline-alkaline soils from the contaminated Hai River Basin, China. *Journal of Hazardous. Materials* 172: 494-497.



Investigating the Efficiency of Visible-Near Infra-Red (NIR) Spectrometry to Estimate Selected Soil Properties in Semirom Area, Isfahan

F. Rahmati¹, S. Hojati^{2*}, K. Rngzan³, A Landi⁴

Received: 10-04-2022

Revised: 25-04-2022

Accepted: 25-05-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Rahmati F., Hojati S., Rangzan K., and Landi A. 2022. Investigating the Efficiency of Visible-Near Infra-Red (NIR) Spectrometry to Estimate Selected Soil Properties in Semirom Area, Isfahan. Journal of Water and Soil 36(2): 283-300. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.75858.1150](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.75858.1150)

Introduction

Estimating soil properties on large scales using experimental methods requires specialized equipments and can be extremely time-consuming and expensive, especially when dealing with a high spatial sampling density. Soil Visible and Near-Infrared (V-NIR) reflectance spectroscopy has proven to be a fast, cost-effective, non-destructive, environmental-friendly, repeatable, and reproducible analytical technique. V-NIR reflectance spectroscopy has been used for more than 30 years to predict an extensive variety of soil properties like organic and inorganic carbon, nitrogen, organic carbon, moisture, texture and salinity. The objectives of this study were to estimate soil properties (carbonate calcium equivalent (CCE), electrical conductivity (EC), pH, and organic carbon (OC)) using visible near-infrared and short-wave Infrared (SWIR) reflectance spectroscopy (350-2500 nm). In this study, the best predictions of all the soil properties, model and pre-processing technique were also determined. The Partial Least Squares Regression (PLSR), Artificial Neural Network (ANN), Support Vector Machine Regression (SVMR) and Principal Component Regression (PCR) models were also compared to estimate soil properties.

Materials and Methods

A total number of 200 surface soil samples (0-10 cm) were collected from the Semirom region (51° 17' - 52° 3' E; 30° 42' - 31° 51' N), Isfahan, Iran. The samples were air dried and passed through a 2 mm sieve, and using standard procedures soil properties were determined in the laboratory. Accordingly, soil pH and the EC contents of soil samples were determined in saturated pastes and extracts, respectively. The CCE content of the soils were measured using back titration, and the OC contents of the samples were measured using Walkley-Black method. The Reflectance spectra of all samples were measured using an ASD field spectrometer. The selection of the best model was done according to the value of the Ratio of Performance to Deviation (RPD), the coefficient of determination (R^2), and the Root Mean Square Error (RMSE).

Results and Discussion

Once the models were constructed using PLSR, ANN, SVMR and PCR approaches, descriptive analysis was carried out for each property, for the data measured in the laboratory. The parameters calculated for the properties were mean, coefficient of variation (CV), minimum and maximum, standard deviation and range. Coefficient of variation for the organic carbon, CCE, pH, and EC values were 21.7, 12.4, 1.34, and 28.74, respectively. Wilding (1985) proposed low, medium, and high variability for the CV values less than 15%, 15-35%, and greater than 35%, respectively. Accordingly, the organic carbon and EC of soils could be classified in the group with moderate variability. However, the calcium carbonate equivalent and pH are in the group with

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Associate Professor and Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: s.hojati@scu.ac.ir)

3- Professor, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

low variability. Since spectral data preprocessing has an effective role on improving the calibration, in order to perform spectral preprocessing, two first nodes at the first (350-400 nm) and the end (2450-2500 nm) of each spectrum were removed. In addition, two interruptions were eliminated, due to the change in the detector in the range of 900 to 1700 nm. Different preprocessing methods i.e., Standard Normal Variable (SNV) and First (FD) and Second Derivatives (SD) and Savitzky-Golay preprocessing techniques were performed on spectral data. Then, using PLSR, the cross-validation method was used to evaluate soil properties calibration and validation. According to Stenberg (2002), for agricultural applications, The values of RPD greater than 2 indicate that the models provide precise predictions, the values of RPD between 1.5 and 2 are considered to be reasonably representative, and the values of RPD less than 1.5 indicate poor predictive performance. The results indicated the desirable capability of the PLSR method in estimating the EC ($RPD > 2$, $R^2 = 0.94$), CCE ($RPD > 2$, $R^2 = 0.88$), and OC ($RPD > 2$, $R^2 = 0.89$). The best results of the pH ($RPD > 2$, $R^2 = 0.79$) were estimated by the SVMR method. In this study the best methods of preprocessing techniques were First (FD) and Second Derivatives (SD) and Savitzky-Golay filter.

Conclusion

In general, based on the results of this study, VNIR spectroscopy was successful in estimating soil properties and showed its potential for substituting laboratory analyses. Moreover, spectroscopy could be considered as a simple, fast, and low-cost method in predicting soil properties. The PLSR model with First and Second derivatives and Savitzky-Golay pre-processing techniques seems to be more robust algorithm for estimating EC, OC, and CCE. The best results of the pH were estimated by the SVMR method with First and Second derivatives and Savitzky-Golay pre-processing techniques.

Keywords: Artificial Neural Network (ANN), Partial Least Squares Regression (PLSR), Principal Component Regression (PCR), Spectroscopy, Support Vector Machine Regression (SVMR)

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۲۸۳-۳۰۰

بررسی کارایی روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در تخمین برخی ویژگی‌های خاک منطقه‌ی سمیرم اصفهان

فاطمه رحمتی^۱ - سعید حجتی^{۲*} - کاظم رنگزن^۳ - احمد لندی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴

چکیده

اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک در یک مقیاس وسیع به دلیل حجم بالای نمونه‌برداری و تجزیه‌های آزمایشگاهی، زمان‌بر و گران است. بنابراین استفاده از روش‌های ساده، سریع، ارزان و پیشرفته مانند طیف‌سنجی خاک می‌تواند مفید باشد. این مطالعه با هدف بررسی کارایی روش طیف‌سنجی در پیش‌بینی برخی از ویژگی‌های خاک در منطقه سمیرم استان اصفهان انجام شد. به این منظور تعداد ۲۰۰ نمونه خاک سطحی (۱۰ سانتی‌متری) جمع‌آوری گردید. مقادیر کربن آلی، pH، EC و کربنات کلسیم معادل در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. همچنین، طیف‌سنجی نمونه‌های خاک با استفاده از دستگاه طیف‌سنج زمینی FieldSpec3 در محدوده طول موج ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر انجام گرفت. سپس روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول و مشتق دوم با فیلتر ساولیتزکی گلائی و متغیر نرمال استاندارد بر روی طیف‌ها انجام شدند. برای برقراری ارتباط بین ویژگی‌های خاک با ویژگی‌های طیفی آن از مدل‌های حداقل مربعات جزئی (PLSR)، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVMR) استفاده گردید. بهترین مدل در برآورد هدایت الکتریکی خاک، کربنات کلسیم و کربن آلی مدل PLSR و برای واکنش خاک مدل SVMR و بهترین روش‌های پیش‌پردازش، روش‌های مشتق‌گیری بودند که ضرایب تبیین آن‌ها به ترتیب ۰/۹۴، ۰/۸۸، ۰/۹۰ و ۰/۷۹ بودند و تمام برآوردها، کمترین RMSE را نسبت به روش‌های دیگر و $RPD > 2$ داشتند. به طور کلی نتایج این مطالعه بر قابلیت روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک در برآورد مکانی چندین ویژگی خاک به صورت همزمان، دلالت دارد. بنابراین، این روش می‌تواند به عنوان روشی جایگزین برای روش‌های مرسوم آزمایشگاهی در تعیین ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR)، رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVMR)، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR)، شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، طیف‌سنجی

مقدمه

جمع‌آوری اطلاعات مکانی خاک از سطح وسیع، نیازمند شیوه‌های جدیدی است که به صورت ساده، ارزان و در حداقل زمان ممکن بتواند اطلاعات چندین خصوصیت خاک را ثبت نماید. یکی از این روش‌ها، روش طیف‌سنجی می‌باشد (Summers et al., 2011). به تهیه منحنی بازتاب پدیده یا پدیده‌های مورد نظر در محدوده‌ای از طول موج‌های مشخص طیف‌سنجی گویند. برای این اندازه‌گیری از اسپکترومترهای^۵ استفاده می‌شود. در طیف‌سنجی، انرژی الکترومغناطیسی گسیل شده از یک منبع نور به پدیده برخورد نموده

امروزه نیاز جهانی به جمع‌آوری اطلاعات مکانی خاک به منظور پایش محیط زیست، مدل‌سازی و مدیریت مکانی خاک وجود دارد.

۱، ۲ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری، دانشیار و استاد، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(Email: s.hojati@scu.ac.ir)
(*)- نویسنده مسئول:

۳- استاد، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

اسکن می‌شوند، به طور مؤثری کاهش می‌یابد. همچنین، هزینه ثابت برای تجزیه و تحلیل‌های نمونه در روش طیف‌سنجی خیلی کمتر از روش‌های آزمایشگاهی متداول است (Guerrero et al., 2010).

در سال‌های اخیر، بسیاری از پژوهشگران از بازتاب طیفی خاک به عنوان گزینه‌ای بهینه برای تجزیه و تحلیل رفتار کمی خاک و همچنین برآورد ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که این روش دارای دقت قابل قبولی می‌باشد (Knadel et al., 2013; Rasooli et al., Janik et al., 2009; 2018). ناوار و همکاران (Nawar et al., 2016) از روش‌های مختلف واسنجی در محدوده طول موج مرئی-مادون قرمز نزدیک برای تخمین مقدار رس و کربن آلی خاک استفاده کردند و مقدار ضریب تبیین را برای کربن آلی و رس به ترتیب ۰/۸۵ و ۰/۹ به دست آوردند. هانگ و همکاران (Hong et al., 2018) با استفاده از روش طیف‌سنجی مرئی-مادون قرمز نزدیک کربن آلی ۲۷۵ نمونه خاک را از استان هوبی چین اندازه‌گیری نمودند و مقدار ضریب تبیین را ۰/۸۳ به دست آوردند. خیامیم و همکاران (Khayamim et al., 2015) این روش را برای تخمین مقدار ماده آلی، کربنات‌ها و درصد گچ ۲۴۸ نمونه مرکب خاک سطحی از کل استان اصفهان استفاده کردند و مقادیر ضرایب تبیین را برای ماده آلی، کربنات‌ها و گچ به ترتیب ۰/۶۱، ۰/۴۵ و ۰/۸ به دست آوردند.

با توجه به ماهیت تجربی توابع رگرسیونی طیفی و تغییرپذیری مکانی و زمانی ویژگی‌های خاک در مناطق مختلف، ضروری است این توابع برای سایر مناطق و خاک‌های متنوع‌تر استخراج و مورد ارزیابی قرار گیرد. از این رو این پژوهش با هدف امکان‌سنجی استفاده از روش طیف‌سنجی در تخمین برخی ویژگی‌های خاک سطحی (واکنش خاک، شوری، کربنات کلسیم معادل، و میزان کربن آلی خاک) در شهرستان سمیرم استان اصفهان صورت گرفت. در این پژوهش در تخمین ویژگی‌های خاک به روش طیف‌سنجی علاوه بر استفاده از دو مدل رایج حداقل مربعات جزئی (PLSR)، رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR) که روابط خطی بین ویژگی‌های خاک و اطلاعات طیفی را مدل‌سازی می‌کنند، از دو مدل رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVMR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) که قادر به مدل‌سازی روابط غیر خطی بین ویژگی‌های خاک و اطلاعات طیفی هستند نیز استفاده شد و کارایی این چهار مدل با یکدیگر مقایسه گردید. همچنین اثر نوع روش پیش پردازش مورد استفاده در آنالیز طیف‌های به دست آمده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

بخشی از آن منعکس، قسمتی جذب و بخش دیگر عبور داده می‌شود. میزان جذب، انعکاس و عبور انرژی از جسم به ماهیت و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن بستگی دارد. بنابراین، به لحاظ ویژگی‌های ترکیب مولکولی و ساختار منحصر به فرد، پدیده مورد نظر رفتار طیفی منحصر به فردی را ایجاد می‌کند. به همین دلیل، به رفتار این ناحیه از طیف الکترومغناطیس اثر انگشت طیفی^۱ نیز می‌گویند (Clark, 1999).

استفاده از طیف‌های خاک، قابلیت فراوانی در زمینه تجزیه خاک دارد. در مورد ویژگی‌های طیف‌های خاک، به طور کلی رطوبت، بافت، ساختمان، مقدار کربن آلی، نوع و فراوانی کانی‌های رسی، کربنات‌ها، گروه‌های هیدروکسیل آب خاک، ترکیبات آلی و اکسیدهای آهن و آلومینیوم، از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک هستند که مقدار بازتاب طیفی را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Stenberg et al., 2002). از مزایای استفاده از روش‌های طیف‌سنجی برای تخمین ویژگی‌های خاک، سرعت آن‌ها است. به این دلیل که آماده‌سازی نمونه‌های خاک مانند روش‌های آزمایشگاهی معمولی سخت نیست. اگرچه خشک و الک کردن در برخی از موارد برای از بین بردن تأثیر رطوبت خاک و اندازه ذرات در طیف بازتابی خاک لازم است. آماده‌سازی نمونه فقط شامل هوا خشک کردن و نرم کردن نمونه خاک می‌باشد. علاوه بر این، در مقایسه با روش‌های آزمایشگاهی که ممکن است چند ساعت طول بکشد، اسکنی کامل از یک نمونه خاک ارایه می‌شود که ممکن است کمتر از چندثانیه طول بکشد. همچنین، تعداد زیادی از ویژگی‌های خاک فقط با یک بار اسکن کردن قابل تشخیص هستند. به طوری که از طیف مادون قرمز نزدیک، ۳۰ تا ۵۰ اسکن در کمتر از یک دقیقه به دست می‌آیند و پیش‌بینی همزمان خواص فیزیکی، شیمیایی و کانی‌شناسی خاک چند ثانیه بیشتر طول نمی‌کشد. از مزیت‌های دیگر این روش، عدم استفاده از مواد شیمیایی و غیرمخرب بودن آن است. بنابراین، این روش اجازه حفظ یکپارچگی پایه سیستم خاک را می‌دهد و نمونه خاک دچار تغییر و تحول نمی‌شود. دستگاه طیف‌سنج زمینی قابل حمل است و قابلیت اجرا در آزمایشگاه و مزرعه را دارد. از سوی دیگر، ویژگی‌های خاک در یک نمونه می‌تواند چندین بار اندازه گرفته شود و از طیف بازتابی نمونه مشابه، به راحتی تکرارهای متعددی به دست می‌آید. به همین دلیل، روش طیف‌سنجی امکان استفاده از روش‌های آماری چند منظوره برای تجزیه و تحلیل واریانس و تعیین دقت و صحت روش را به وجود می‌آورد. این روش نسبت به روش‌های آزمایشگاهی، هزینه کم‌تری دارد و هزینه متغیر هر نمونه، که شامل استهلاک اسپکترومترها و متعلقات و تعمیر و نگهداری روزمره آن‌ها است، با افزایش تعداد نمونه‌های خاکی که

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهرستان سمیرم در استان اصفهان می‌باشد (شکل ۱). این شهرستان با مساحت ۵۲۲۴ کیلومتر مربع در جنوب غربی استان اصفهان قرار گرفته است و بین طول جغرافیایی ۱۷° تا ۵۱°۳۳' شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° تا ۳۱°۵۱' شمالی واقع شده است. در این منطقه تشکیلات دوره دوم زمین‌شناسی تا عهد حاضر مشاهده می‌شود. از نظر چینه‌شناسی، سنگ‌های مربوط به دوره‌های مختلف در کل منطقه قابل مشاهده است. نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های جدید و قدیم رودخانه‌های فصلی و دائمی است که عمدتاً اراضی زراعی را شامل می‌باشد.

برآوردها حاکی از آن است که در مجموع ۳۷/۶ درصد کل اراضی منطقه را اراضی مواج یا همان فلات‌ها یا دشت‌های بریده می‌پوشانند. خاک‌های منطقه اغلب متعلق به رده‌های انتی‌سولز، آلفی‌سولز و اینسپتی‌سولز می‌باشند. اطلاعات حاصل از مطالعه‌ی نقشه ژئومرفولوژی منطقه نشان می‌دهد که سنگ‌های کربناته با منشأ کارستی بیشتر در مناطق مرکزی و جنوبی شهرستان سمیرم پراکنده شده‌اند. این سنگ‌ها در منطقه مرکزی، با واحدهای اراضی کوه و تپه توأم می‌باشند. در حالی که در منطقه جنوبی این سازند با اراضی مسطح و کم ارتفاع توأم شده است.

آب و هوای این شهرستان بر اساس تقسیم‌بندی کوپن جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های گرم و خشک و در ارتفاعات جنوبی جزء مناطق معتدل سرد با تابستان‌های خنک و خشک می‌باشد. بیش از ۹۶ درصد سطح شهرستان دارای میانگین دمای سالیانه‌ی ۷/۵ تا ۱۲/۵ درجه است. بارندگی سالانه منطقه نیز از ۳۵۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر در مناطق مختلف متغیر است (Jalalian, 1997).

نمونه‌برداری و آنالیزهای آزمایشگاهی

به منظور انجام این پژوهش تعداد ۲۰۰ نمونه از لایه سطحی خاک (۱۰ سانتیمتر فوقانی) با فواصل ۵ کیلومتر در ۵ کیلومتر به روش نمونه‌برداری تصادفی (Minasny and McBratney, 2006) برداشت شد و موقعیت هریک از نمونه‌ها با استفاده از دستگاه موقعیت‌یاب جهانی (GPS)^۱ ثبت گردید. پس از هوا خشک نمودن نمونه‌های برداشت شده و عبور آن‌ها از الک دو میلی‌متری، تجزیه‌های آزمایشگاهی لازم بر روی آن‌ها انجام گرفت. برای این منظور، واکنش خاک در خمیر اشباع و قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با استفاده از دستگاه pH متر و دستگاه هدایت‌سنج

(Richards, 1954)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Bouyoucos, 1951)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی (Lanyon and Heald, 1982) و محتوای کربن آلی نمونه‌ها با روش والکلی-بلک (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد.

طیف‌سنجی

در این مطالعه، تهیه طیف‌ها در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه طیف‌سنج ASD به نام FieldSpec 3 با روش پروب تماسی^۲ در اتاق تاریک با شرایط استاندارد انجام شد (شکل ۲). این دستگاه نوری به طور اختصاصی برای استفاده در سنجش از دور میدانی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد که منحنی طیفی را در ناحیه‌ی مرئی-مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز کوتاه اندازه‌گیری می‌کند.

لازم به توضیح است که بازتاب مطلق نمونه‌ها در دامنه ۳۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر و با درجه وضوح یک نانومتر ثبت می‌شود که در مجموع، تعداد بی‌شماری نقطه در هر طیف به دست می‌آید. زمان جمع‌آوری داده‌ها در این دستگاه برای هر طیف ۰/۱ ثانیه است (Janik et al., 2009). طیف‌ها با استفاده از نرم‌افزار ViewSpecPro 6.2.0 به صورت فایل متنی در آمد و وارد نرم‌افزار Unscrambler X 10.4 گردید. سپس، به منظور به حداقل رساندن تأثیرات عوامل ناخواسته مانند زبری سطح خاک، بقایای آلی درشت، آلودگی پروب، تغییر فاصله سنسور و خاک و تأثیرات پرتوافکنی جوی از روش‌های پیش پردازش استفاده شد. نتایج پژوهش‌های مختلف در تخمین ویژگی‌های طیف‌سنجی نشان می‌دهد که روش‌های مختلف پیش-پردازش تأثیر قابل توجهی بر روی مدل رگرسیونی دارند (Gras et al., 2014; Nawar et al., 2016; Kuśnierek, 2011). بنابراین در این پژوهش دو بخش دارای نویز در ابتدا و انتهای طیف‌ها در محدوده‌ی طول موجی بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ نانومتر و ۲۴۵۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر، و همچنین دو طول موج در محدوده ۹۰۰ تا ۱۷۰۰ نانومتر به دلیل وقفه حاصل از تغییر آشکارساز حذف گردید و آن‌گاه روش‌های پیش‌پردازش شامل متغیر نرمال استاندارد^۳، مشتق اول^۴ و مشتق دوم^۵ به همراه فیلتر ساویتزکی گلای بر روی داده‌های طیفی برازش یافت.

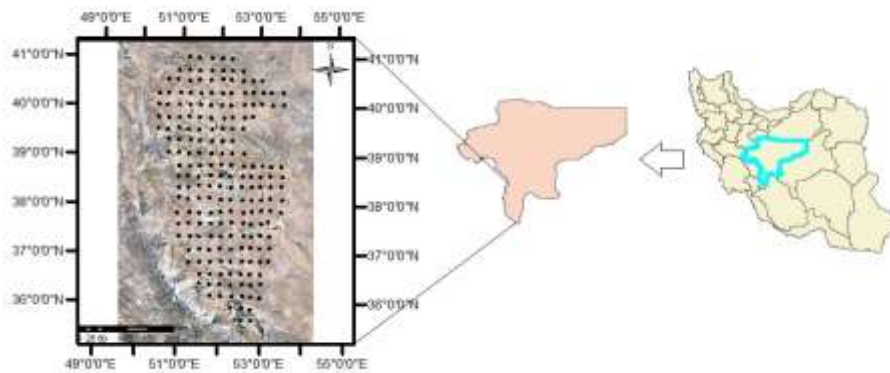
2- Contact Probe

3- Standard Normal Variabl

4- First Derivative of reflectance

5- Second Derivative of reflectance

1- Global Positioning System



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری در منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of study area and the selected site

PLSR از طریق یک رابطه خطی چندمتغیره، ارتباطی بین دو ماتریس x و y ایجاد می کند و ترکیبی از رگرسیون خطی چندگانه^۵ (MLR) و تجزیه به مؤلفه های اصلی^۶ (PCA) است. در مدل PCR مؤلفه های اصلی، تنها با مقادیر متغیرهای X تعیین می شود (Wold et al., 2001). روش ماشین بردار پشتیبان یک روش یادگیری با نظارت و غیر پارامتریک است و می تواند بر مشکلات روش های دیگر که از گرایش بالقوه آن ها به بیش برآزش اطلاعات باز می گردد غلبه کند. این مدل بر مبنای تئوری مفاهیم آماری^۸ استوار است و برای برآوردهای رگرسیونی غیرخطی کاربرد دارد. جواب کلی را با به حداقل رساندن خطای تعیین می کند (Vapnik and Vapnik, 1998). شبکه های هوش مصنوعی شبکه ای متشکل از تعدادی نرون می باشد که در داخل شبکه به هم متصل هستند. تفاوت اصلی شبکه های عصبی مصنوعی با سایر روش های متداول این است که در این روش نیازی به استفاده از رابطه جبری قابل کشف بین متغیرهای اولیه و ثانویه وجود ندارد و این شبکه ها خود رابطه منطقی بین متغیرها را طی روند آموزش کشف می کنند (Sargent, 2001). در این پژوهش از ۸۰ درصد نمونه ها برای آموزش و از ۲۰ درصد نمونه ها برای آزمون استفاده گردید. مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نرم افزار JMP با دو لایه مخفی برای ایجاد شبکه پرسپترون مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق برای واسنجی و بررسی عملکرد مدل ها از روش اعتبارسنجی متقاطع^۹ استفاده گردید. برای ارزیابی دقت نتایج،

بررسی های انجام شده حاکی از آن است که در میان روش های پیش پردازش، روش مشتق گیری باعث تقویت و بارزسازی پدیده های جذبی بسیار ضعیف می شود. با این حال، کاربرد روش های مشتق گیری مانند مشتق دوم باعث تقویت نویزها نیز می شوند، از این رو باید از این روش ها به همراه روش های هموارسازی استفاده شود. یکی از بهترین روش های هموارسازی، روش ساویتزکی گلاي^۱ می باشد که نویزهای تیز طیف ها را بدون از بین بردن اطلاعات طیفی آن ها برطرف می کند. در این روش، الگوریتم ساویتزکی گلاي یک چند جمله ای را بر هر بخش متوالی طیف (همسایگی)، برازش می کند و مقادیر اصلی طیف را با مقدارهای برازش شده جایگزین می کند. تعداد نقطه های همسایگی و درجه چندجمله ای باید طوری انتخاب شوند که نسبت سیگنال به نویز را به گونه ای افزایش دهد که اطلاعات طیفی پیک ها هم حفظ شوند (Savitzky and Golay, 1964). در این پژوهش، از چند جمله ای های درجه ۲ و تعداد نقاط همسایگی ۱۵ استفاده شد. از دیگر روش های پیش پردازش طیفی، استفاده از متغیر نرمال استاندارد است که با به کاربردن تبدیلات خطی بر روی هر طیف، سبب حذف خطاهای چندگانه ناشی از پراکنش و نیز اندازه ذرات خاک و ناهمواری های سطحی می شود.

برای برقراری ارتباط بین ویژگی های خاک با ویژگی های طیفی آن از مدل های رگرسیون حداقل مربعات جزئی^۲ (PLSR) شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۳، رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVMR)^۴ و رگرسیون مؤلفه اصلی^۵ (PCR) استفاده شد. مدل

5- Principal Component Regression

6- Multiplicative Scatter Correction

7- Principal Component Analysis

8- Statistical learning theory

9- Cross Validation

1- SavitzkyGolay

2- Partial Least Square Regression

3- Artificial Neural Network

4- Support Vector Machine Regression

دهنده تغییرپذیری متوسط و ضریب تغییرات بالاتر از ۳۵ درصد نشان دهنده تغییرات زیاد ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بر این اساس، تغییرات مقادیر کربنات کلسیم معادل و pH در منطقه کم و تغییر مقادیر کربن آلی و EC در منطقه متوسط می‌باشد. در این مطالعه هرچه میزان تغییرات ویژگی‌های خاک کمتر بود، دقت مدل‌ها پایین‌تر به دست آمد. به طوری که دامنه تغییرات کم pH خاک در منطقه موجب شد دقت پایین‌تری در برآورد آن نسبت به دیگر ویژگی‌های خاک به دست آید. در صورتی که دامنه تغییرات بیشتر EC باعث بهتر شدن دقت برآورد آن نسبت به ویژگی‌های دیگر خاک گردیده است. ناوار (Nawar et al., 2016) نیز در پژوهشی نتیجه گرفت که در صورتی که محدوده غلظت خصوصیت خاک گسترده‌تر باشد، دقت برآورد مدل آماری بیشتر می‌شود. زیرا پراکندگی بیشتر داده‌ها سبب افزایش SD و RPD می‌شود.

از مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله ۱)، ضریب تبیین (R^2) (معادله ۲) و شاخص RPD (معادله ۳) استفاده شد. در این روابط x_o مقدار اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه، x_e مقدار اندازه‌گیری شده به روش طیف‌سنجی، n تعداد داده‌ها و SD انحراف معیار می‌باشد.

$$RMSE = [1/n \sum (x_o - x_e)]^{1/2} \quad (1)$$

$$R^2 = [(\sum (x_e - \bar{x}_e)(x_o - \bar{x}_o)) / (\sum (x_e - \bar{x}_e)^2 (\sum (x_o - \bar{x}_o)^2)] \quad (2)$$

$$RPD = SD / RMSE \quad (3)$$

نتایج و بحث

جدول ۱ توصیف آماری ویژگی‌های خاک اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه در این مطالعه را نشان می‌دهد. براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط ویل‌دینگ (Wilding, 1985) ضریب تغییرات کمتر از ۱۵ نشان دهنده تغییرپذیری کم، ضریب تغییرات ۱۵ تا ۳۵ درصد نشان



شکل ۲- دستگاه طیف‌سنج ASD FieldSpec 3 مورد استفاده در این مطالعه

Figure 2- The ASD Field Spectrometer 3 used in this study

جدول ۱- توصیف آماری ویژگی‌های خاک در منطقه مطالعاتی

Table 1- Summary statistics of soil properties

ویژگی آماری Statistical parameter	هدایت الکتریکی خاک EC (dS m ⁻¹)	واکنش خاک pH	کربنات کلسیم معادل CCE (%)	کربن آلی OC (%)
میانگین Mean	0.60	7.6	31.6	0.89
حداکثر Max	1.52	8.2	70.0	2.17
حداقل Min	0.29	7.0	5.0	0.30
دامنه Range	1.23	1.2	65.0	1.87
انحراف معیار SD	0.17	0.1	3.9	0.19
ضریب تغییرات CV	28.74	1.3	12.4	21.70

در خاک گزارش شده است (Seifi et al., 2020). در محدوده مرئی، باندهای جذبی مهم در برآورد کربن آلی در محدوده ۴۱۰، ۵۷۰ و ۶۶۰ نانومتر وجود دارند (Viscarra Rossel et al., 2006).

نتایج مدل سازی

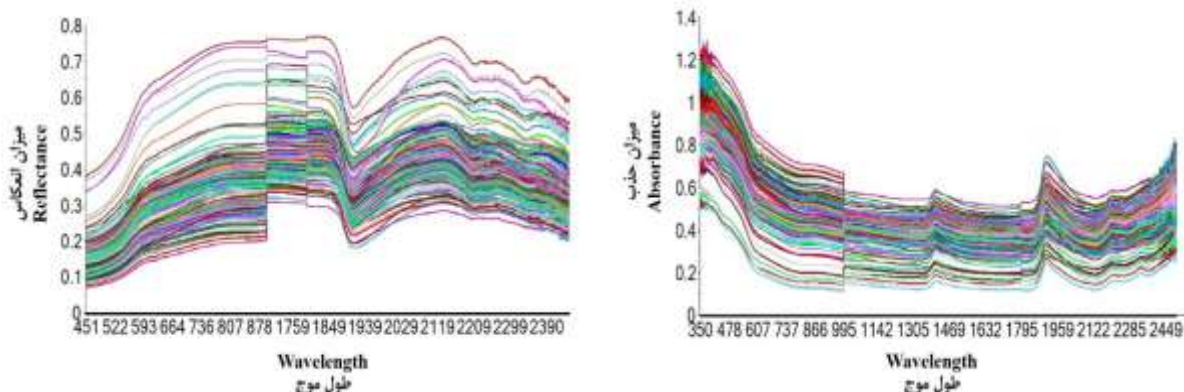
در این پژوهش، با استفاده از فاکتورهای بهینه که از مدل PLSR و مؤلفه‌های اصلی که از مدل PCR به دست آمد معادلات رگرسیونی بین ویژگی‌های خاک با فاکتورها یا مؤلفه‌های بهینه به وسیله مدل رگرسیون خطی چندگانه به دست آمد و تعداد مؤثرترین فاکتورها در مدل PLSR یا مؤلفه‌های اصلی در مدل PCR تعیین گردیدند که در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. همچنین، نتایج مدل سازی خصوصیات خاک به چهار روش PCR، SVMR، ANN و PLSR با استفاده از آماره‌های R^2 ، RMSE و RPD مورد ارزیابی قرار گرفت. جدول ۳ نتایج مدل سازی ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

نتایج برآورد میزان کربنات کلسیم معادل در روش PCR نشان داد مقدار R^2 ۰/۷۷ تا ۰/۸۷ در گروه کالیبراسیون و ۰/۷۷ تا ۰/۸۵ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR مقدار R^2 ۰/۸۳ تا ۰/۸۸ در گروه کالیبراسیون و ۰/۸۱ تا ۰/۸۴ در گروه اعتبارسنجی می‌باشد. در روش ANN، R^2 از ۰/۵۸ تا ۰/۸ تا در گروه کالیبراسیون و از ۰/۷۳ تا ۰/۹۶ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، R^2 از ۰/۸۲ تا ۰/۸۷ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۷۵ تا ۰/۷۷ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RMSE ۱/۴۰ تا ۱/۸۲ در گروه کالیبراسیون و ۱/۴۹ تا ۱/۸۴ در گروه اعتبارسنجی است.

شکل ۳ نمودارهای میزان انعکاس و میزان جذب طیف‌های خام به دست آمده از نمونه‌های خاک در این پژوهش را نشان می‌دهد. مقادیر انعکاس از طریق معادله ۴ به جذب تبدیل می‌شود. در این معادله A و R به ترتیب مقادیر جذب و انعکاس را بر حسب درصد نشان می‌دهند.

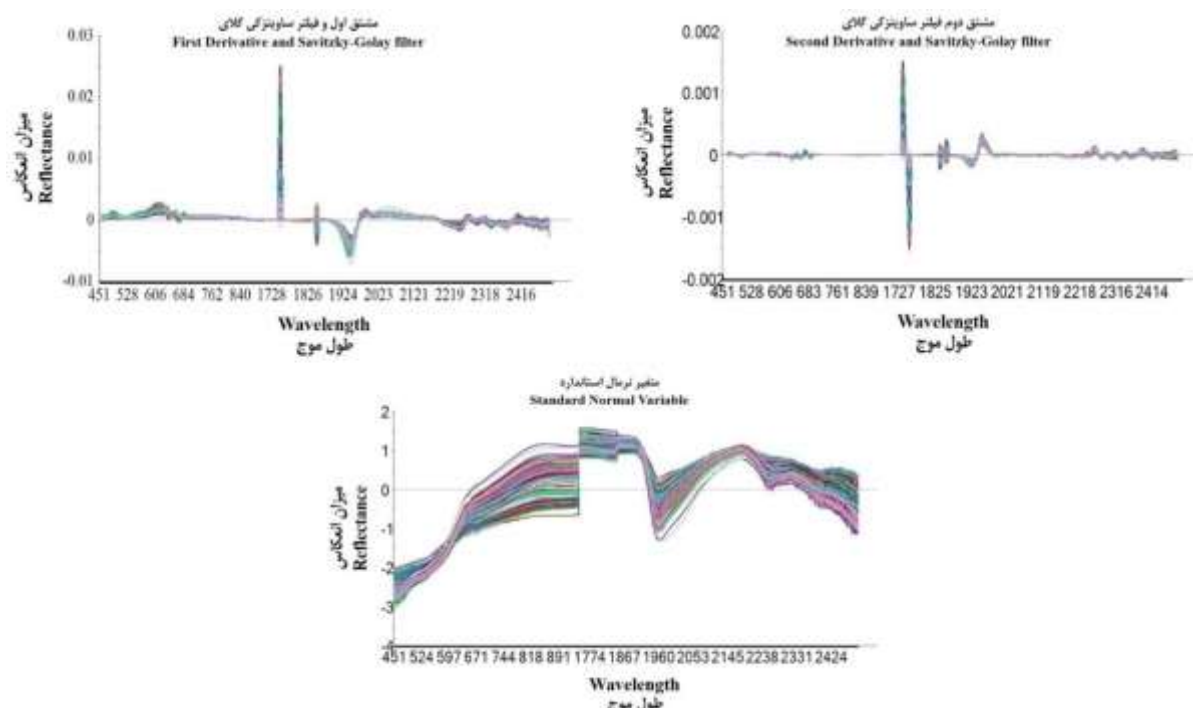
$$A = \log(1/R) \quad (4)$$

ریوس و همکاران (Reeves et al., 2002) بیان کردند نتایج تخمین ممکن است بر مبنای روش‌های مختلف پردازش آماری داده‌ها و مشتقات طیف‌ها تغییر کند. کازنیرک (Kusnierek, 2011) نیز در مطالعات خود افزایش ۳۰ درصدی دقت مدل سازی را با بکارگیری روش‌های مختلف پیش پردازش در مقایسه با شرایط بدون پیش پردازش گزارش نمود. شکل ۴ نمودارهای میزان انعکاس طیف‌های به دست آمده از نمونه‌های خاک در این پژوهش را با اعمال روش‌های پیش پردازش مشتق اول و فیلتر ساویتزکی گلائی، مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی و متغیر نرمال استاندارد نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، قله‌های جذب در نمودارهای مشتق اول و دوم به طور بارزتری دیده می‌شوند. به طور کلی، شکل کلی همه طیف‌ها در همه خاک‌ها تقریباً مشابه است. در طول موج‌های ۱۴۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر عوارض جذبی بارزی در طیف‌ها دیده می‌شود که این باندها در حقیقت به OH شبکه رس در طول موج‌های ۱۴۰۰ و ۲۲۰۰ نانومتر مربوط می‌شود (Islam et al., 2003). ویژگی جذبی در طول موج ۲۳۰۰ نانومتر به حضور کربنات‌ها مرتبط می‌باشد (Viscarra Rossel et al., 2009). همچنین دو محدوده ۵۵۰ و ۷۵۰ نانومتر و برخی از باندهای جذبی در محدوده ۱۴۰۰، ۱۹۰۰، ۲۲۰۰ و ۲۳۵۰ نانومتر برای تشخیص نمک‌های موجود



شکل ۳- نمودارهای میزان انعکاس و میزان جذب طیف‌های خام به دست آمده از همه نمونه‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش

Figure 3- Reflectance and absorbancespectraof soilsamples in the visible- near-infrared and shortwave infrared regions



شکل ۴- نمودارهای میزان انعکاس طیف‌های به دست آمده از همه نمونه‌های خاک مورد استفاده در این پژوهش با روش‌های پیش پردازش مشتق اول و فیلتر ساویتزکی گلائی، مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی و متغیر نرمال استاندارد

Figure 4- Reflection spectrum of 200 soil samples after applying First (FD) and Second Derivative of reflectance (SD), and standard normal variate (SNV) pre-processing in the visible- near-infrared and shortwave infrared regions

جدول ۲- معادلات رگرسیونی بین ویژگی‌های خاک با فاکتورها یا مؤلفه‌های بهینه

Table 2- Regresssion equations between soil properties and optimal Factor-Principal Component

ویژگی خاک Soil Properties	مدل Model	روش پیش‌پردازش Pre-processing Approach	رابطه رگرسیونی Regresssion Equation	تعداد فاکتور-مؤلفه بهینه The Number of Optimal Factor- Component
کربنات کلسیم معادل CCE	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter	$Y=26.11+162.67X_1+213.29X_2+481.21X_3+1.98$	3
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter	$Y=26.11+1926.76X_1+8032.48X_2+2.21$	2
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	$Y=26.11+0.37X_1+0.67X_2+0.33X_3+2.77$	3
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance + SavitzkyGolay Filter	$Y=26.11+161.5X_1-156.15X_2+157.02X_3+592.84X_4+2.15$	4
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolay Filter	$Y=26.11-1921.02X_1-2484X_2-7415.85X_3+2.38$	3
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	$Y=26.11+0.37X+3.55$	1

کربن آلی OC	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.9+9.61X ₁ +15.07X ₂ +0.0043	2
		First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.9+32.1444X ₁ +667.7036X ₂ +241.6793X ₃ +442.59X ₄ +0.0039	4
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=0.9+0.0129X ₁ +0.0293X ₂ +0.0765X ₃ +0.1011X ₄ +0.843X ₅ + 0.0111	5
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.9+1.1692X ₁ +34.8686X ₂ + 0.0044	2
هدایت الکتریکی EC	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.9-16.6780X ₁ + 789.1693X ₂ + 317.4172X ₃ + 0.0065	3
		Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=0.9- 0.002X ₁ + 0.06X ₂ + 0.03X ₃ + 0.0015X ₄ -0.007X ₅ + 0.18X ₆ + 0.0137	6
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.61+6.15X ₁ +20.27X ₂ +19.54X ₃ +31.71X ₄ +27.77X ₅ +0.0019	5
واکنش خاک pH	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.61+72.6155X ₁ +421.2268X ₂ +670.5409X ₃ +318.9074X ₄ +385.2262X ₅ +411.4921X ₆ +0.0021	6
		Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=0.61+0.013X ₁ +0.047X ₂ +0.027X ₃ +0.05X ₄ +0.039X ₅ +0.0395X ₆ +0.046X ₇ +0.088 X ₈ +0.0031	8
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.61+6.0324X ₁ -6.87X ₂ -30.16X ₃ -24.77X ₄ +6.18X ₅ +53.41X ₆ +0.0033	6
	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=0.61-72.28X ₁ +194.8914X ₂ -75.57X ₃ -600.45X ₄ +0.01	4
		Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=0.61+0.012X ₁ +0.049X ₂ -0.02X ₃ +0.0063	3
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=7.61+3.12X ₁ +10.39X ₂ +14.085X ₃ +11.88X ₄ +0.0025	4
	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=7.61+36.24X ₁ +272.66X ₂ +348.96X ₃ +0.0059	3
		Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=7.61+0.0074X ₁ +0.0220X ₂ +0.023X ₃ +0.0033	3
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=7.61+3.01X ₁ -5.77X ₂ +15.6X ₃ +18.87X ₄ +10.7X ₅ -15.51X ₆ +0.0026	6
	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	First Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی	Y=7.61-35.85X ₁ -164.59X ₂ -42.35X ₃ +493.54X ₄ +0.0031	4
		Second Derivative of reflectance + SavitzkyGolayFilter		
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد	Y=7.61+0.007X ₁ -0.018X ₂ +0.024X ₃ +0.026X ₄ +0.0034	4
		Standard Normal Variable		
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی		

جدول ۳- نتایج مدل‌سازی با مدل‌های PLSR، ANN، PCR و SVMR ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

Table 3- Statistics results of PLSR, ANN, SVMR and PCR methods with different pre-processing techniques for estimating of soil properties

ویژگی‌های خاک Soil properties	مدل Model	روش پیش‌پردازش Pre-processing.method	اعتبارسنجی (Validation)			کالیبراسیون (Calibration)		
			RPD	RSME	R ²	RPD	RSME	R ²
کربنات کلسیم معادل CCE	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.53	1.53	0.84	2.87	1.35	0.88
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.55	1.52	0.84	2.72	1.43	0.86
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	2.28	1.7	0.81	2.43	1.59	0.83
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.59	1.49	0.85	2.76	1.4	0.87
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance	2.55	1.52	0.84	2.63	1.47	0.85
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	2.1	1.84	0.77	2.13	1.82	0.77
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.48	1.56	0.8	1.93	2.01	0.74
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.22	0.74	0.73	1.5	2.58	0.58
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	6.24	0.62	0.96	2.19	1.77	0.8
	رگرسیون ماشین بردار پشتیبان SVMR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.94	1.96	0.75	2.37	1.63	0.84
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance	1.98	1.95	0.76	2.58	1.5	0.87
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	2.09	1.85	0.77	2.28	1.7	0.82
	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.76	0.07	0.88	2.92	0.07	0.89
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.67	0.07	0.87	3.08	0.06	0.9
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.72	0.11	0.68	1.83	0.1	0.71
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.76	0.07	0.88	2.88	0.07	0.88
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.27	0.08	0.82	2.38	0.08	0.83
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.55	0.12	0.61	1.65	0.12	0.64

کربن آلی OC	شبکه عصبی مصنوعی ANN	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.9	0.1	0.66	2.11	0.09	0.8
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.3	0.15	0.22	1.36	0.14	0.49
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	1.9	0.1	0.67	1.73	0.11	0.66
	رگرسیون ماشین بردار پشتیبان SVMR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.11	0.09	0.8	2.38	0.08	0.88
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.11	0.09	0.8	2.38	0.08	0.88
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	1.58	0.12	0.63	1.73	0.11	0.7
هدایت الکتریکی EC	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	3.62	0.05	0.93	3.98	0.04	0.94
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	3.21	0.05	0.91	3.74	0.05	0.93
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	2.79	0.06	0.88	3.14	0.05	0.9
	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.88	0.06	0.89	3.04	0.06	0.9
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.1	0.66	1.72	0.1	0.68
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	2.17	0.08	0.79	2.23	0.08	0.8
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	3	0.06	0.9	3.6	0.05	0.92
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.64	0.11	0.54	1.38	0.13	0.47
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	2.57	0.07	0.75	3	0.06	0.89
	رگرسیون ماشین بردار پشتیبان SVMR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	3	0.06	0.9	3.6	0.05	0.92
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.57	0.07	0.87	3	0.06	0.91
		متغیر نرمال استاندارد						
		Standard Normal Variable	2.57	0.07	0.85	3	0.06	0.88
	رگرسیون حداقل مربعات جزئی PLSR	مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.89	0.05	0.73	2.02	0.05	0.76
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی						
		Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.82	0.06	0.71	1.96	0.05	0.75

واکنش خاک pH	رگرسیون مؤلفه اصلی PCR	متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.69	0.06	0.66	1.75	0.06	0.69
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.89	0.05	0.73	2	0.05	0.76
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.76	0.06	0.69	1.85	0.05	0.71
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.69	0.06	0.67	1.75	0.06	0.68
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	2.5	0.04	0.68	1.43	0.07	0.58
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.06	0.5	1.25	0.08	0.38
	شبکه عصبی مصنوعی ANN	متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	2	0.05	0.67	1.67	0.06	0.72
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.43	0.07	0.64	1.67	0.06	0.75
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.06	0.66	2	0.05	0.79
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.67	0.06	0.65	1.67	0.06	0.71
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.43	0.07	0.64	1.67	0.06	0.75
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.06	0.66	2	0.05	0.79
رگرسیون ماشین بردار پشتیبان SVMR	رگرسیون ماشین بردار پشتیبان SVMR	متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.67	0.06	0.65	1.67	0.06	0.71
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.43	0.07	0.64	1.67	0.06	0.75
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.06	0.66	2	0.05	0.79
		متغیر نرمال استاندارد Standard Normal Variable	1.67	0.06	0.65	1.67	0.06	0.71
		مشتق اول+فیلتر ساویتزکی گلائی First Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.43	0.07	0.64	1.67	0.06	0.75
		مشتق دوم+فیلتر ساویتزکی گلائی Second Derivative of reflectance +SavitzkyGolayFilter	1.67	0.06	0.66	2	0.05	0.79

پیش‌بینی کاملاً مناسب است (Summers et al., 2011). نتایج $RMSE$ ، R^2 ، RPD در تخمین مقدار کربنات کلسیم معادل خاک نشان داد که با توجه به این که در مدل ANN، برای روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول و دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی RPD بین ۱/۵ تا ۲ و برای روش پیش‌پردازش متغیر نرمال استاندارد RPD بیشتر از ۲ به دست آمد. بنابراین، پیش‌بینی مدل برای روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول و دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی قابل قبول و برای روش پیش‌پردازش متغیر نرمال استاندارد کاملاً مناسب بود. برای بقیه مدل‌ها با استفاده از هر سه روش پیش‌پردازش RPD بیشتر از ۲ به دست آمد که نشان می‌دهد پیش‌بینی مدل‌ها کاملاً مناسب بوده است. در برآورد کربنات کلسیم خاک بیشترین R^2 و کمترین $RMSE$ برای مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق اول و فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان دهنده دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. کمترین ضریب تبیین و بیشترین $RMSE$ برای مدل ANN و روش پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان دهنده پایین‌ترین دقت در بین سایر روش‌ها می‌باشد. ریوس و اسمیت (Reeves and Smith, 2009) $R^2=0.83$ و $RPD=2.5$ را در آمریکا و خیامیم و همکاران (Khayamim et al., 2015) $R^2=0.54$ را با استفاده از مدل PLSR در خاک‌های استان اصفهان برای تخمین کربنات‌ها

در روش PLSR، $RMSE$ ۱/۳۵ تا ۱/۵۹ در گروه کالیبراسیون و ۱/۵۲ تا ۱/۷ در گروه اعتبارسنجی می‌باشد. در روش ANN، $RMSE$ از ۱/۷۷ تا ۲/۵۸ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۶۲ تا ۱/۷۴ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، $RMSE$ از ۱/۵ تا ۱/۷ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۸۵ تا ۱/۹۶ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RPD ۲/۱۳ تا ۲/۷۶ در گروه کالیبراسیون و ۲/۵۵ تا ۳/۴۲ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR، RPD از ۲/۴۳ تا ۲/۸۷ در گروه کالیبراسیون و از ۲/۲۸ تا ۲/۵۵ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش ANN، RPD از ۱/۵ تا ۲/۱۹ در گروه کالیبراسیون و از ۲/۲۲ تا ۶/۲۴ در گروه اعتبارسنجی متغیر است.

در روش SVMR، RPD از ۲/۲۸ تا ۲/۵۸ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۹۴ تا ۲/۰۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. به‌طور کلی، بهترین مدل، مدلی است که $RMSE$ کمتر و R^2 و RPD بیشتری داشته باشد. هر گاه مقدار R^2 بین ۰/۶۶ و ۰/۸ باشد، دقت پیش‌بینی مدل چندان مناسب نیست؛ در حالی که مقدار R^2 بین ۰/۸۱ تا ۰/۹ پیش‌بینی خوبی را با استفاده از مدل بیان می‌کند و R^2 بیش از ۰/۹ نشان دهنده پیش‌بینی بسیار مناسب مدل است. زمانی که مقدار RPD کمتر از ۱/۵ باشد، دقت پیش‌بینی مدل ضعیف است. اگر بین ۱/۵ تا ۲ باشد، پیش‌بینی قابل قبول و در صورتی که بیشتر از ۲ باشد،

$R^2=0/67$ و $RMSE=0/28$ و $CaCO_3$ با $R^2=0/51$ و $R^2=0/62$ =
 $RMSE$ گزارش کردند. شیفرا و هرگارتن (Shiferaw and Hergarten, 2014) نیز داده‌های طیفی و روش‌های PLSR را برای تخمین کربن آلی در اتیوپی به کار بردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان‌دهنده دقت بالای مدل PLSR بوده است.

نتایج برآورد میزان EC در روش PCR نشان داد مقدار R^2 ۰/۶۸ تا ۰/۹۳ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۶۶ تا ۰/۹۲ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR مقدار R^2 ۰/۹۰ تا ۰/۹۴ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۸۸ تا ۰/۹۳ در گروه اعتبارسنجی می‌باشد. در روش ANN، R^2 از ۰/۴۷ تا ۰/۹۲ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۵۴ تا ۰/۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، R^2 از ۰/۸۸ تا ۰/۹۲ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۸۵ تا ۰/۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، $RMSE$ ۰/۰۶ تا ۲/۷۴ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۶ تا ۲/۷۷ در گروه اعتبارسنجی است. در روش $RMSE$ ، PLSR، $RMSE$ ۰/۰۴ تا ۰/۰۵۴ در گروه کالیبراسیون و ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ در گروه اعتبارسنجی است. در روش ANN، $RMSE$ از ۰/۰۵ تا ۰/۱۳ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۶ تا ۰/۱۱ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، $RMSE$ از ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۷ تا ۰/۰۶ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RPD از ۰/۰۶ تا ۳/۰۴ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۶ تا ۲/۸۸ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PLSR ۳/۱۴ تا ۳/۹۸ در گروه کالیبراسیون و از ۲/۷۹ تا ۳/۶۲ در گروه اعتبارسنجی است. در روش ANN، RPD از ۱/۳۸ تا ۳/۶ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۶۴ تا ۳ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، RPD از ۳ تا ۳/۶ در گروه کالیبراسیون و از ۲/۵۷ تا ۳ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. نتایج $RMSE$ ، R^2 ، RPD در تخمین مقدار هدایت الکتریکی خاک نشان داد که در تخمین ویژگی‌های خاک به روش طیف‌سنجی بیشترین دقت برای هدایت الکتریکی خاک به دست آمده است که به دلیل ضریب تغییرات بیشتر و دامنه تغییرات بیشتر هدایت الکتریکی خاک نسبت به ویژگی‌های دیگر خاک می‌باشد. با توجه به آماره RPD که در مدل‌های PLSR و SVMR برای هر سه روش پیش‌پردازش و در مدل‌های PCR و ANN برای روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی و SNV، پیش‌بینی مدل کاملاً مناسب، برای مدل PCR با روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی پیش‌بینی مدل قابل قبول و برای مدل ANN با روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی دقت پیش‌بینی مدل ضعیف بود. در برآورد هدایت الکتریکی خاک، بیشترین R^2 و کمترین $RMSE$ برای مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق اول و فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. نشان‌دهنده دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. همکاران (Ostovari et al., 2018) در پژوهشی بر روی خاک‌های جنوب ایران تخمین قابل قبولی از ماده آلی خاک توسط مدل PLSR با

گزارش کردند. حسنی و همکاران (Hassani et al., 2014) نیز در مطالعه‌ای بر روی خاک‌های گچی-آهکی، با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی و مدل PLSR نتیجه قابل قبولی را برای تخمین کربنات کلسیم معادل را ($R^2=0/72$) به دست آوردند.

نتایج برآورد میزان کربن آلی در روش PCR نشان داد مقدار R^2 ۰/۶۴ تا ۰/۸۸ در گروه کالیبراسیون و ۰/۶۱ تا ۰/۸۸ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR مقدار R^2 ۰/۷۱ تا ۰/۸۹ در گروه کالیبراسیون و ۰/۶۸ تا ۰/۸۸ در گروه اعتبارسنجی می‌باشد. در روش ANN، R^2 از ۰/۴۹ تا ۰/۸ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۲۲ تا ۰/۶۷ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، R^2 از ۰/۷ تا ۰/۸۸ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۶۳ تا ۰/۸ در گروه اعتبارسنجی متغیر است.

در روش PCR، $RMSE$ ۰/۰۷ تا ۰/۱۲ در گروه کالیبراسیون و ۰/۰۷ تا ۰/۱۲ در گروه اعتبارسنجی است. در روش $RMSE$ ، PLSR، $RMSE$ ۰/۰۷ تا ۰/۱ در گروه کالیبراسیون و ۰/۰۷ تا ۰/۱۱ در گروه اعتبارسنجی است. در روش ANN، $RMSE$ از ۰/۰۹ تا ۰/۱۴ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۱ تا ۰/۱۵ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، $RMSE$ از ۰/۰۸ تا ۰/۱۱ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۹ تا ۰/۱۲ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RPD از ۱/۶۵ تا ۲/۸۸ در گروه کالیبراسیون و ۱/۵۵ تا ۲/۷۶ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR، RPD از ۱/۸۳ تا ۲/۹۲ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۷۲ تا ۲/۷۶ در گروه اعتبارسنجی است. در روش ANN، RPD از ۱/۳۶ تا ۲/۱۱ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۳ تا ۱/۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVMR، RPD از ۱/۷۳ تا ۲/۳۸ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۵۸ تا ۲/۱۱ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. نتایج $RMSE$ ، R^2 ، RPD در تخمین مقدار کربن آلی خاک نشان داد که با توجه به این که برای همه مدل‌ها با روش پیش‌پردازش متغیر نرمال استاندارد بین ۱/۵ تا ۲ به دست آمد که نشان‌دهنده دقت قابل قبول می‌باشد و برای مدل ANN با روش پیش‌پردازش مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی کمتر از ۱/۵ به دست آمد که نشان می‌دهد دقت پیش‌بینی مدل ضعیف بوده است. برای بقیه مدل‌ها و روش‌های پیش‌پردازش RPD بیش از ۲ به دست آمد. بنابراین، دقت پیش‌بینی مدل کاملاً مناسب بوده است. در برآورد کربن آلی خاک بیشترین R^2 و کمترین $RMSE$ برای مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان‌دهنده دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. کمترین ضریب تبیین و بیشترین $RMSE$ برای مدل ANN با روش پیش‌پردازش مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان‌دهنده پایین‌ترین دقت در بین سایر روش‌ها می‌باشد. استواری و همکاران (Ostovari et al., 2018) در پژوهشی بر روی خاک‌های جنوب ایران تخمین قابل قبولی از ماده آلی خاک توسط مدل PLSR با

پیش پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان دهنده پایین‌ترین دقت در بین سایر روش‌ها می‌باشد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2018) با استفاده از طیف‌های جذبی و بازتابی ۱۰۰ نمونه خاک سطحی در چین، میزان هدایت الکتریکی خاک را با روش PLSR برآورد نمودند و کاربرد روش PLSR را برای پیش‌بینی هدایت الکتریکی خاک مناسب دانستند. آلدبا و همکاران (Aldabaa et al., 2015) نیز با استفاده از روش طیف‌سنجی در ۹۱ نمونه خاک جمع‌آوری شده از عمق ۵-۱۰ سانتی متری در غرب تگزاس اقدام به تخمین هدایت الکتریکی خاک با استفاده از اطلاعات طیفی روش طیف‌سنجی و دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون برداری پشتیبان نمودند و مقادیر ضریب تبیین و مجذور میانگین مربعات خطا برای دو مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان به ترتیب برابر با ۰/۹۱ و ۰/۲۶ و ۰/۸۹ و ۰/۲۹ با استفاده از طیف‌های اصلی گزارش کردند.

نتایج برآورد میزان pH در روش PCR نشان داد مقدار $R^2 = 0/68$ تا ۰/۷۶ در گروه کالیبراسیون و ۰/۶۷ تا ۰/۷۳ در گروه اعتبارسنجی است. در روش PLSR مقدار R^2 ۰/۶۹ تا ۰/۷۶ در گروه کالیبراسیون و ۰/۶۶ تا ۰/۷۳ در گروه اعتبارسنجی می‌باشد. در روش ANN، R^2 از ۰/۳۸ تا ۰/۷۲ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۵ تا ۰/۶۸ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVM، R^2 از ۰/۷۱ تا ۰/۷۹ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۶۴ تا ۰/۶۶ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RMSE از ۰/۵۰ تا ۰/۵۷ در گروه کالیبراسیون و ۰/۵۲ تا ۰/۵۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PLSR، RMSE از ۰/۴۹۶ تا ۰/۵۷ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۵۳ تا ۰/۵۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش ANN، RMSE از ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۴ تا ۰/۰۶ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVM، RMSE از ۰/۰۵ تا ۰/۰۶ در گروه کالیبراسیون و از ۰/۰۶ تا ۰/۰۷ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PCR، RPD از ۱/۷۵ تا ۲ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۶۹ تا ۱/۸۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش PLSR از ۱/۷۵ تا ۲/۰۲ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۶۹ تا ۱/۸۹ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش ANN، RPD از ۱/۲۵ تا ۱/۶۷ در گروه کالیبراسیون و از ۱/۶۷ تا ۲/۵ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. در روش SVM، RPD از ۱/۶۷ تا ۱/۴۳ در گروه اعتبارسنجی متغیر است. نتایج RMSE، R^2 و RPD در تخمین واکنش خاک نشان داد که برای مدل PLSR نسبت به سایر مدل‌ها دقت بالاتری به دست آمد. با توجه به آماره RPD که در هر دو مدل PLSR و PCR برای روش پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی دقت پیش‌بینی مدل‌ها کاملاً مناسب و برای روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی و متغیر نرمال استاندارد دقت پیش‌بینی مدل‌ها قابل قبول بود. در مدل SVM

برای روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی دقت پیش‌بینی مدل کاملاً مناسب و برای روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی و متغیر نرمال استاندارد دقت پیش‌بینی مدل قابل قبول بود. برای مدل ANN و روش‌های پیش‌پردازش مشتق اول و دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی پیش‌بینی مدل ضعیف و برای روش پیش‌پردازش متغیر نرمال استاندارد دقت پیش‌بینی مدل قابل قبول به دست آمد. در برآورد واکنش خاک بیشترین R^2 و کمترین RMSE برای مدل SVM و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان دهنده دقت بالاتر این روش نسبت به سایر روش‌ها می‌باشد. کمترین ضریب تبیین و بیشترین RMSE برای مدل ANN و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد که نشان دهنده پایین‌ترین دقت در بین سایر روش‌ها می‌باشد. ویسکارا راسل و بهرنز (Viscarra Rossel et al., 2009) از SVM به منظور برآورد کربن آلی خاک به روش طیف‌سنجی استفاده کردند و دقت قابل قبولی $R^2 = 0/72$ ، $RMSE = 2/83$ و $RPD = 1/86$ را برای این مدل به دست آوردند. ترا و همکاران (Terra et al., 2015) در برزیل نیز دقت بالایی را برای مدل SVM برای برآورد ویژگی‌های خاک به روش طیف‌سنجی به دست آوردند.

در این مطالعه بر اساس آماره‌های مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و شاخص RPD برآوردهای ضعیف‌تری برای واکنش خاک نسبت به سایر ویژگی‌های خاک به دست آمد. برآورد ضعیف pH می‌تواند به دلیل دامنه تغییرات محدود آن باشد که این موضوع توسط ویسکارا راسل و همکاران (Viscarra Bilgili et al., 2010) و بیلگی و همکاران (Rossel et al., 2006) نیز تایید شده است.

در این پژوهش هر چهار مدل با بالاتر بودن ضریب تغییرات و دامنه تغییرات ویژگی‌های خاک برآورد دقیق‌تری داشتند. به طوری که بهترین دقت مدل‌ها در برآورد هدایت الکتریکی خاک و پس از آن به ترتیب برای کربنات کلسیم معادل و کربن آلی خاک به دست آمد و کمترین دقت مدل‌ها برای واکنش خاک به دست آمد. بر اساس شاخص RPD هر چهار مدل در برآورد هدایت الکتریکی خاک، کربنات کلسیم معادل و کربن آلی خاک دقت‌های کاملاً مناسب و قابل قبولی را داشتند و فقط دقت مدل شبکه عصبی مصنوعی با روش پیش‌پردازش مشتق دوم و فیلتر ساویتزکی گلائی ضعیف بود (Savitzky and Golay, 1964). هر چهار مدل در تخمین هدایت الکتریکی خاک با روش پیش‌پردازش مشتق اول و فیلتر ساویتزکی گلائی با ضرایب تبیین نزدیک به هم و بالاتر از ۰/۹ دقت بسیار مناسبی را داشتند. اما کمترین ضرایب تبیین و پایین‌ترین دقت این مدل‌ها برای واکنش خاک به دست آمد. به طوری که ضرایب تبیین

ماشین بردار پشتیبان (SVMR) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سه روش پیش‌پردازش متغیر نرمال استاندارد، مشتق اول و مشتق دوم به همراه فیلتر ساویتزکی گلائی ارزیابی شد. با توجه به نتایج ارزیابی بر اساس آماره‌های مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و شاخص RPD، بهترین مدل در برآورد هدایت الکتریکی خاک و کرنات کلسیم، مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی، برای کرن آلی مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی و برای واکنش خاک مدل SVMR و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی بود. در این پژوهش بهترین نتایج در برآورد همه ویژگی‌های خاک با استفاده از روش‌های مشتق اول و دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد. به طور کلی نتایج این پژوهش بر قابلیت روش طیف‌سنجی مرئی مادون قرمز نزدیک در برآورد مکانی چندین ویژگی خاک به صورت همزمان، دلالت دارد. بنابراین این روش می‌تواند به عنوان روشی جایگزین برای روش‌های مرسوم آزمایشگاهی در تعیین ویژگی‌های خاک مورد استفاده قرار گیرد.

همه مدل‌ها برای واکنش خاک کمتر از ۰/۸ به دست آمد و پیش‌بینی مدل‌ها چندان مناسب نبود. با توجه به نتایج ارزیابی بر اساس آماره‌های مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تبیین (R^2) و شاخص RPD، بهترین مدل در برآورد هدایت الکتریکی خاک و کرنات کلسیم، مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق اول با فیلتر ساویتزکی گلائی، برای کرن آلی مدل PLSR و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی و برای واکنش خاک مدل SVMR و روش پیش‌پردازش مشتق دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی بود. در این پژوهش بهترین نتایج در برآورد همه ویژگی‌های خاک با استفاده از روش‌های مشتق اول و دوم با فیلتر ساویتزکی گلائی به دست آمد. زیرا در روش‌های مشتق‌گیری برخی ویژگی‌های طیفی ضعیف، تقویت گردیده است (Shiferaw and Hergarten, 2014).

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، امکان استفاده از داده‌های طیفی خاک در محدوده‌ی مرئی-مادون قرمز نزدیک برای برآورد برخی ویژگی‌های خاک‌ها منطقه مورد مطالعه با استفاده از چهار مدل رگرسیون حداقل مربعات جزئی (PLSR) و رگرسیون مؤلفه اصلی (PCR) رگرسیون

منابع

1. Aldabaa A., Weindorf D.C., Chakraborty S., Sharma A., and Li B. 2015. Combination of proximal and remote sensing methods for rapid soil salinity quantification. *Geoderma* 34(46): 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.09.011>.
2. Bilgili A., van Es H., Akbas F., and Durak A. 2010. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in a semi-arid area of Turkey. *Arid Environments* 74(2): 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.011>.
3. Bouyoucos G.J. 1951. A recalibration of hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Agronomy* 43: 434–438. <https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>.
4. Clark R.N. 1999. Spectroscopy of rocks and minerals, principles of spectroscopy. John Wiley and Sons.
5. Gras J.P., Barthès B.G. Mahaut B., and Trupin. S. 2014. Best practices for obtaining and processing field visible and near infrared (VNIR) spectra of topsoil. *Geoderma* 215: 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.021>.
6. Guerrero C., Viscarra Rossel R.A., and Mouazen A.M. 2010. Diffuse reflectance spectroscopy in soil science and land resource assessment. *Geoderma* 158: 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.008>.
7. Hassani A., Bahrami H.A., Noroozi A.A., and Oustan Sh. 2014. Visible-near infrared reflectance spectroscopy for assessment of soil properties in gypseous and calcareous soils. *Watershed Engineering and Management* 6(2): 125–138. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/IJWMSE.2014.101721>.
8. Hong Y., Chen S., Zhang Y., Chen Y., Yu L., Liu Y., and Cheng H. 2018. Rapid identification of soil organic matter level via visible and near-infrared spectroscopy: Effects of two-dimensional correlation coefficient and extreme learning machine. *Science of the Total Environment* 644: 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.319>.
9. Islam K., Singh B., and McBratney A. 2003. Simultaneous estimation of several soil properties by ultraviolet, visible and nearinfrared reflectance spectroscopy. *Australian Journal of Soil Research* 41: 1193–1202. <https://doi.org/10.1071/SR02137>.
10. Jalalian A. 1997. The studies of lands resources and capability determination in Semirom area. The Ministry of Jihad Sazandegi, Isfahan Province. (In Persian)
11. Janik L.J., Forrester S.T., and Rawson A. 2009. The prediction of soil chemical and physical properties from mid-

- infrared spectroscopy and combined partial least-squares regression and neural networks (PLS-NN) analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 97(2): 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2009.04.005>.
12. Khayamim F., Khademi H., Stenberg B., and Wetterlind J. 2015. Capability of vis-NIR Spectroscopy to Predict Selected Chemical Soil Properties in Isfahan Province. *Isfahan University of Technology* 19(72): 81-92. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.72.8>.
13. Knadel M., Deng F., Alinejadian A., de Jonge L.W., Møldrup P., and Greve M.H. 2013. Moisture effects on visible-near infrared soil spectra-from wet to hyper dry. P. 422-433. In ASA, CSSA, and SSSA, -6 Nov. 2013. International Annual Meetings, Florida, United States of America. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0401>.
14. Kuśnierek K. 2011. Pre-processing of soil visible and near infrared spectra taken in laboratory and field conditions to improve the within-field soil organic carbon multivariate calibration. p. 100-103. The 2th Global Workshop on Proximal Soil Sensing, 15-18 May. 2011. Montreal, Canada.
15. Lanyon L.E., and Heald W.R. 1982. Magnesium, calcium, strontium and barium. P. 247-260. In: A. L., Page et al. (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part2, Agron. Monogr. ASA and SSSA*, Madison, WI. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c14>.
16. Minasny B., and McBratney A.B. 2006. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers and Geosciences* 32(9): 1378-1388. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.12.009>.
17. Nawar S., Buddenbaum H., Hill J., Kozak J., and Mouazen A. 2016. Estimating the soil clay content and organic matter by means of different calibration methods of vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Soil and Tillage Research* 155: 510-522. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.021>.
18. Ostovari Y., Ghorbani-Dashtaki S., Bahrami H.A., Abbasi M., Dematte J.A.M., Arthur, E., and Panagos P. 2018. Towards prediction of soil erodibility, SOM and CaCO₃ using laboratory Vis-NIR spectra: A case study in a semi-arid region of Iran. *Geoderma* 314: 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.014>.
19. Rasooli N., Farpour M., Khayamim F., and Ranjbar H. 2018. Prediction of selected soil properties using visible and near infrared spectroscopy in Bardsir area, Kerman Province. *Iranian Journal of Soil Research* 32(2): 231-243. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJSR.2018.117044>.
20. Reeves J., McCarty G., and Mimmo T. 2002. The potential of diffuse reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. *Environmental Pollution* 116: 277-284. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00259-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00259-7).
21. Reeves J., and Smith D.B. 2009. The potential of mid-and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for determining major-and trace-element concentrations in soils from a geochemical survey of North America. *Applied Geochemistry* 24(8): 1472-1481. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.04.017>.
22. Richards L.A. 1954. *Diagnosis and Improvement of Saline-Alkali Soils*. US Department of Agriculture, Washington DC.
23. Sargent D.J. 2001. Comparison of artificial neural networks with other statistical approaches: results from medical data sets. *Cancer* 91: 1636-42. [https://doi.org/10.1002/1097-0142\(20010415\)91:8+<1636::AID-CNCR1176>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/1097-0142(20010415)91:8+<1636::AID-CNCR1176>3.0.CO;2-D).
24. Savitzky A., and Golay M.J. 1964. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36: 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>.
25. Seifi M., Ahmadi A., Neyshabouri M.R., Taghizadeh-Mehrjardi R., and Bahrami H.A. 2020. Remote and Vis-NIR spectra sensing potential for soil salinization estimation in the eastern coast of Urmia hyper saline lake, Iran. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 20: 100398. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100398>.
26. Shiferaw A., and Hergarten Ch. 2014. Visible near infra-red (Vis-NIR) spectroscopy for predicting soil organic carbon in Ethiopia. *Ecology and Natural Environment* 6: 126-139. <https://doi.org/10.5897/JENE2013.0374>.
27. Summers D., Lewis M., Ostendorf B., and Chittleborough D. 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecological Indicators* 11: 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.001>.
28. Stenberg B., Jonsson A., and Börjesson T. 2002. Near infrared technology for soil analysis with implications for precision agriculture. In *Near Infrared Spectroscopy*. p. 279-284. Proceedings of the 10th International Conference. NIR Publications, 2002. Chichester, UK, Kyongju S. KA.
29. Terra F.S., Demattê J.A.M., and Viscarra Rossel R.A. 2015. Spectral libraries for quantitative analyses of tropical Brazilian soils: comparing Vis-NIR and mid-IR reflectance data. *Geoderma* 255-256: 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.04.017>.
30. Vapnik V., and Vapnik V. 1998. *Statistical learning theory*. John Wiley and Sons.
31. Viscarra Rossel R.A., McGlynn R., and McBratney A. 2006. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 137(1-2): 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004>.
32. Viscarra Rossel R.A., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., and Skjemstad J.O. 2006. Visible, near infrared, midinfrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil

- properties. *Geoderma* 131: 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>.
33. Viscarra Rossel R.A., Cattle S.R., Ortega A., and Fouad Y. 2009. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by Vis–NIR spectroscopy. *Geoderma* 150: 253–266. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.025>.
34. Viscarra Rossel R., and Behrens T. 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158: 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.025>.
35. Walkley A., and Black I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63: 251–263. <https://doi.org/10.1097/00010694-194704000-00001>.
36. Wang J., Ding J., Abulimiti A., and Cai L. 2018. Quantitative estimation of soil salinity by means of different modeling methods and visible-near infrared (VIS–NIR) spectroscopy, Ebinur Lake Wetland, Northwest China. *PeerJ*, 6: e4703. <https://doi.org/10.7717/peerj.4703>.
37. Wilding L. 1985. Soil Spatial variability: Its documentation, accommodation, and implication to soil surveys. p. 166–194. In *Soil Spatial Variability*. D.R. Nielson and J. Bouma (ed.), Pudo. 1985. Wageningen, NL.
38. Wold S., Sjostrom M., and Eriksson L. 2001. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 58: 109–130. [https://doi.org/10.1016/S0169-7439\(01\)00155-1](https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1).



Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture

M. Fashaei^{1*}, S.H. Sanaei-Nejad², M. Quchanian³

Received: 04-12-2021

Revised: 07-03-2022

Accepted: 17-04-2022

Available Online: 21-07-2022

How to cite this article:

Fashaei M., Sanaei-Nejad S.H., and Quchanian M. 2022. Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture. Journal of Water and Soil 36(2): 301-317. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.73711.1118](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.73711.1118)

Introduction

Drought analysis in agriculture can not only be achieved by measuring precipitation changes but also by using other parameters such as soil moisture. Due to the fact that soil moisture affects plant growth and yield, it is often considered for monitoring agricultural drought. Remote sensing data are often provided from three sources: microwave, visible and thermal. Most satellite soil moisture-based algorithms rely on passive microwave images, active microwaves, or a combination of data from several different sensors. Among the various remote sensing methods, the microwave electromagnetic spectrum has fewer physical limitations than other spectrum in measuring soil moisture. However, microwave soil moisture data often have very large pixel dimensions (more than 10 km), making it difficult to use them on a small scale.

Materials and Methods

In this study, in order to calculate the agricultural drought index at the field-scale, AMSR2 Retrieval data were calibrated first using field moisture measurement data in the Neishabour plain during 2017 to 2019. During the research period, 560 soil samples (20 samples in 28 shifts) were collected and soil moisture was measured in the laboratory of the Department of Water Science and Engineering, Ferdowsi University of Mashhad. LPRM_AMSR2_SOILM3_001 is one of the third level products of the AMSR2 sensor, which is produced on a daily basis with a spatial resolution of $25 \times 25 \text{ km}^2$. Land surface parameters including surface temperature, surface soil moisture and plant water availability were obtained by passive microwave data using the Land parameter Retrieval Method (LPRM). Then, by using Modis sensor images (NDVI and LST), linear downscaling equations were extracted. The dimensions of the AMSR2 images were reduced from 25 kilometers to 1000 meters using these equations. In next step, SMADI Agricultural Drought Index, which is a combination of vegetation characteristics, soil moisture and land surface temperature, was used to monitor agricultural drought at the field-scale. Statistical indicators such as coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE) and root mean square error (RMSE) were also used to evaluate the statistical performance.

Results and Discussion

By visual analysis of the role of vegetation and land unevenness, it was found that these two factors affect the regression relationships extracted for calibration of remote sensing data. The RMSE and MAE values for the regression equations used in the calibration process were calculated in the range of 1.6 to 4%, which can be considered acceptable in comparison with the mean values of the soil moisture data (15 to 20). The results showed that changes in SMADI index in three land use zones including rainfed cultivation (R1), medium rangeland (R2) and poor rangeland (R3) have experienced a similar trend to precipitation changes, illustrating

1, 2 and 3- Ph.D. in Agrometeorology, Professor and Ph.D. Candidate in Irrigation and Drainage Engineering, Department of Water Science and Engineering, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: mo.fashaei@alumni.um.ac.ir)

that precipitation is one of the most effective factors in major changes in SMADI agricultural drought index fluctuations. It was also observed that SMADI index changes with a delay of 1 to 8 days compared to the precipitation changes in all three zones. In all three zones, the SMADI index followed a similar trend to in-situ soil moisture changes. At most 80% of the changes in SMADI-R1 index can be explained by in-situ SM-R1, and the rest of the changes were related to other environmental factors or measurement error. This decreases to 68% in the R3 zone. It should be noted that soil moisture monitoring can more accurately reflect the impact of environmental factors on the changes in agricultural drought index such as SMADI than other variables; because the rainfall recorded at the meteorological station does not necessarily occur uniformly throughout the study area. On the other hand, any amount of precipitation will not necessarily lead to an effective change in soil moisture storage. This also renders assessment of the performance of agricultural drought indicators difficult.

Conclusion

Examination of statistical indices of coefficient of determination (R^2), mean absolute error value (MAE) and root mean square error (RMSE) showed that the algorithm used in downscaling as well as estimating SMADI agricultural drought index is well able to reflect the interactions between precipitation, soil moisture, vegetation and changes in canopy temperature profile. This feature justifies and strengthens its application in agrometeorological analysis.

Keywords: AMSR2, Downscaling, Land surface temperature, Passive microwave, Water deficit

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۲، خرداد-تیر ۱۴۰۱، ص ۳۰۱-۳۱۷

پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه مبتنی بر تصاویر دورسنجی مایکروویو رطوبت خاک

محمد فشائی^{۱*} - سیدحسین ثنائی نژاد^۲ - مرجان قوجانیان^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

چکیده

وقوع خشکسالی در کشاورزی صرفاً با اندازه‌گیری تغییرات بارش قابل رصد نیست بلکه متغیرهای دیگری همچون رطوبت خاک نیز در آن نقش دارند. در میان روش‌های مختلف دورسنجی، طیف الکترومغناطیس مایکروویو محدودیت‌های فیزیکی سایر امواج رادیومتری در اندازه‌گیری رطوبت خاک را ندارد. با این تفاوت که داده‌های مایکروویو رطوبت خاک غالباً دارای ابعاد پیکسل بسیار بزرگ (بیش از ۱۰ کیلومتر) هستند و این موضوع کاربرد آنها در مقیاس‌های کوچک را با مشکل مواجه می‌سازد. در این پژوهش به منظور محاسبه شاخص خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه، ابتدا با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری میدانی رطوبت در محدوده دشت نیشابور طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۳۹۸، واسنجی داده‌های بازتابی رطوبت خاک سنجنده AMSR2 انجام شد. سپس با کمک تصاویر سنجنده مودیس روابط خطی ریزمقیاس نمایی تصاویر رطوبت خاک استخراج شده و ابعاد تصویر از ۲۵ کیلومتر به ۱۰۰۰ متر کاهش یافت. در گام بعدی از شاخص خشکی کشاورزی SMADI که تلفیقی از خصوصیات پوشش گیاهی، رطوبت خاک و دمای سطح زمین است برای پایش خشکی کشاورزی در مقیاس مزرعه استفاده شد. به منظور ارزیابی نتایج، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در سه کاربری اراضی منتخب شامل زراعت دیم ($R1$)، مرتع متوسط ($R2$) و مرتع فقیر ($R3$) بررسی شد. شاخص‌های MAE و RMSE در بازه ۱۶ تا ۴ و شاخص R^2 در بازه ۰.۷۳ تا ۰.۸۴ قرار گرفت. نتایج نشان داد که الگوریتم استفاده شده در ریزمقیاس نمایی و همچنین برآورد شاخص خشکی کشاورزی SMADI به خوبی قادر به بازتاب اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی است و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: دمای سطح زمین، ریزمقیاس نمایی، کمبود آب گیاه، مایکروویو غیرفعال، AMSR2

مقدمه

آنگاه که انطباق مناسبی بین داده‌های دورسنجی و ویژگی‌های اندازه‌گیری شده خاک و گیاه صورت گیرد ما می‌توانیم در مورد شرایط نواحی پهناوری که در مورد آنها اندازه‌گیری میدانی انجام نشده باشد نتیجه‌گیری کنیم. به این ترتیب ارزش واقعی سنجنش از دور یعنی توانایی در کسب اطلاعات وسیع با نیروی انسانی، هزینه و زمان کمتر

حاصل می‌شود.

باتوجه به اینکه رطوبت خاک بر رشد گیاه و عملکرد آن تاثیر می‌گذارد لذا اغلب برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین رطوبت خاک یک متغیر ویژه مهم برای نظارت بر پایداری و توسعه خشکسالی است (AghaKouchak, 2014)؛ (Wilhite, 2005; Boken, 2005). تکنیک‌های سنجنش از دور معمولاً داده‌های رطوبت خاک را برای یک گستره مکانی بزرگ و با قدرت تفکیک زمانی متوسط برای سطح زمین با هزینه‌های اندک ارائه می‌کنند (Mohanty et al., 2017). تحقیقاتی که پیرامون اطلاعات به‌دست آمده از مشاهدات رطوبت خاک ماهواره‌ای (در مقایسه با رطوبت خاک مدل شده و بارش زمینی مشاهده شده) در مورد تنش آبی و تأثیر آن بر تنوع تولید محصول انجام شده نشان داد که رطوبت خاک برای نشان دادن خشکسالی کشاورزی از بارش در

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، استاد و دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mo.fashaei@alumni.um.ac.ir)

شرایط خشکسالی مناسب تر است، زیرا ارتباط بیشتری با کاهش عملکرد محصول دارد (Modanesi et al., 2019; Niaz et al., 2018).

داده‌های دورسنجی غالباً از سه منبع مایکروویو، نوری و حرارتی تامین می‌شود (Peng and Loew, 2017). اغلب الگوریتم‌های مبتنی بر رطوبت خاک ماهواره‌ای، متکی بر تصاویر مایکروویو غیرفعال (Chen et al., 2016)، مایکروویو فعال (Takada et al., 2009)، یا ترکیبی از داده‌های چند سنجنده مختلف هستند (Entekhabi et al., 2010; Kim and Hogue, 2012). در مقایسه با سنجنش از دور مایکروویو غیرفعال، سنسورهای حرارتی/نوری دارای توانایی بازیابی رطوبت خاک سطحی در مقیاس مکانی کوچک‌تر هستند. هرچند داده‌های ماهواره‌های حرارتی/نوری حساسیت بیشتری به عوامل محیطی از قبیل شرایط هواشناسی و پوشش گیاهی و وجود ابر و غبار دارند (Adegoke and Carleton, 2002).

در حال حاضر ماهواره‌های متعددی مانند SMOS، SMAP، AMSR-E، ASCAT و ESA GGI وجود دارند که قادر هستند با فاصله زمانی دو تا سه روزه بازیابی رطوبت سطحی خاک را ارائه کنند (Chen and Wang, 2018; Montzka et al., 2017).

البته سنجنده‌ها قادر نیستند به طور مستقیم رطوبت خاک را اندازه‌گیری نمایند. روابط تجربی وجود دارند که دمای روشنایی مایکروویو غیرفعال را بر اساس رابطه بین گذردهی خاک و مقدار آب در خاک، به رطوبت خاک مرتبط می‌سازند (Wang and Qu, 2009). بررسی دو مدل پرکاربرد بازیابی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 که یکی به نام JAXA و دیگری LPRM شناخته می‌شود حاکی از آن است که روش LPRM از خطای RMSE کمتری نسبت به JAXA برخوردار است. (Kim et al., 2015).

ضخامت بسیار کم لایه سطحی (۲ تا ۷ سانتی‌متر) که توسط ماهواره سنجنش می‌شود، مقیاس بزرگ تصاویر ماهواره‌ای (حدود ۲۰ کیلومتر) و کیفیت پایین در شرایط خاص مثل پوشش گیاهی متراکم و کوهستانی بودن مناطق جز بزرگ‌ترین محدودیت‌های فعلی تکنیک‌های تخمین رطوبت خاک با استفاده از سنجنش از دور هستند (Dostálová et al., 2014; Brocca et al., 2017). به همین دلیل بخشی از پژوهش‌ها در حوزه رطوبت خاک و هواشناسی کشاورزی به ویژه در سال‌های اخیر به اعتبارسنجی، ریزمقیاس‌نمایی و یا تلفیق داده‌های سایر سنجنده‌های منابع طبیعی با تصاویر مایکروویو رطوبت خاک اختصاص یافته تا بتوان برای کاربری‌های مختلف از آن بهره برد (Adnan et al., 2016; Martínez et al., 2020; Fernández et al., 2014; Zhang et al., 2014; Zhu et al., 2019).

به طور معمول ریزمقیاس‌نمایی با کمک یک متغیر واسطه همچون دمای سطحی یا پوشش گیاهی صورت می‌گیرد. به طور مثال،

بر اساس رابطه اینترسی حرارتی مابین تغییرات دمای روزانه و متوسط رطوبت خاک ترکیب شده با شرایط پوشش گیاهی، می‌توان ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده SMOS و AMSR-E از ۲۵ کیلومتر به ۱ کیلومتر را انجام داد (Fang and Lakshmi, 2014) و یا می‌توان تصاویر بزرگ مقیاس (۲۵ کیلومتر) رطوبت خاک به دست آمده از داده‌های مایکروویو را از طریق ادغام با تصاویر دما-پوشش گیاهی (TVDI) سنجنده مودیس، ریزمقیاس (۱۰ کیلومتر) نمود (Farokhi et al., 2016; Wang et al., 2019). همچنین رطوبت خاک ماهواره فعال-غیرفعال رطوبت خاک (SMAP) نیز با استفاده از داده‌های MODIS ریزمقیاس شده است (Fashaee and Sanaei-Nejad, 2020; Ghafari et al., 2021).

کاربرد شاخص‌های مرسوم خشکی کشاورزی همچون شاخص رطوبت استاندارد شده تجربی (ESSMI)، شاخص کمبود آب (SWDI)، شاخص رطوبت خاک (SMI)، شاخص شرایط خشکی کشاورزی (ADCI)، شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)، شاخص رطوبت اشیاع خاک (SMSI) و شاخص خشکی یکپارچه مایکروویو (MIDI) نشان می‌دهد که رطوبت خاک، فعالیت گیاهی و دمای سطح زمین مهم‌ترین متغیرهای مرتبط با خشکسالی هستند (Sur et al., 2019). اغلب این شاخص‌ها زمانیکه با استفاده از داده‌های دورسنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند از سازگاری مکانی و زمانی خوبی با وقایع خشکی کشاورزی برخوردارند (Carrão et al., 2016)، همچنین در مناطق هموار و غیرکوهستانی نتایج بهتری حاصل می‌شود (Paredes-trejo and Barbosa, 2017). با کمک سایر تصاویر ماهواره‌ای که از منبع نوری/حرارتی استفاده می‌کنند می‌توان دامنه کاربرد این شاخص‌ها را توسعه داده و از جمله در ارزیابی پدیده سیل مورد توجه قرار داد (Saha et al., 2018). این مزیت نیز وجود دارد که یک شاخص با کمک داده‌های سنجنده‌های مایکروویو متنوعی آزموده شده و نتایج آن با هم مقایسه شود (Zhu et al., 2019). از سوی دیگر داده‌های دورسنجی رطوبت خاک از این قابلیت برخوردار هستند که در تصحیح بانک‌های اطلاعاتی مرسوم رطوبت خاک در کشورهای مختلف به کار گرفته شود (Mladenova et al., 2020).

اگرچه رطوبت خاک را در مقیاس کوچک توسط سنجنش از دور مایکروویو فعال نیز می‌توان بازیابی کرد، اما استفاده از داده‌های سنجنش از دور فعال برای تخمین رطوبت خاک به دلیل وابستگی زیاد این داده‌ها به زبری سطح و پوشش گیاهی به سختی امکان‌پذیر است و تخمین‌های رطوبت خاک بازیابی شده از این طریق، دارای عدم قطعیت بیشتری هستند (Jagdhuber et al., 2019).

در این پژوهش با هدف دورسنجی پایش خشکی کشاورزی (کمبود آب گیاه) در مقیاس مزرعه با استفاده از داده‌های دورسنجی رطوبت خاک؛ داده‌های بازیابی رطوبت خاک مایکروویو غیرفعال

الف) سنجنده AMSR2: این سنجنده نسخه جدیدتر سنجنده AMSR-E است که توسط JAXA طراحی و از سال ۲۰۱۲ روی ماهواره GCOM-W1 نصب شد. مکانیزم تصویربرداری کانونی، این سنجنده را قادر می‌سازد تا داده‌های شب و روز را در پوششی به وسعت ۹۹ درصد سطح زمین در طی ۲ روز ارائه دهد. این سنجنده برای تولید نقشه‌های بخار آب، آب مایع موجود در ابر، درجه حرارت سطح دریا، سرعت باد سطح دریاها، تمرکز یخ دریا، عمق برف و محتویات رطوبت خاک زمین مناسب است (NOAA, 2020).

محصول SOILM3_001_LPRM_AMSR2_ یکی از محصولات سطح سوم سنجنده AMSR2 است که به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی ۲۵ در ۲۵ کیلومتر مربع تولید می‌شود. پارامترهای سطح زمین شامل دمای سطحی، رطوبت خاک سطحی و موجودیت آب گیاه توسط داده‌های مایکروویو غیرفعال سنجنده و با استفاده از الگوریتم بازیابی پارامترهای زمین (LPRM) حاصل می‌شود.

الگوریتم LPRM مبتنی بر یک مدل انتقال تابشی پیش‌رونده برای بازیابی رطوبت خاک سطحی و عمق نوری پوشش گیاهی عمل می‌کند. همچنین دمای سطح زمین نیز به صورت مجزا از باند Ka (۳۶/۵ گیگاهرتز) سنجنده AMSR2 به دست آمده است (De Jue and Owe, 2014).

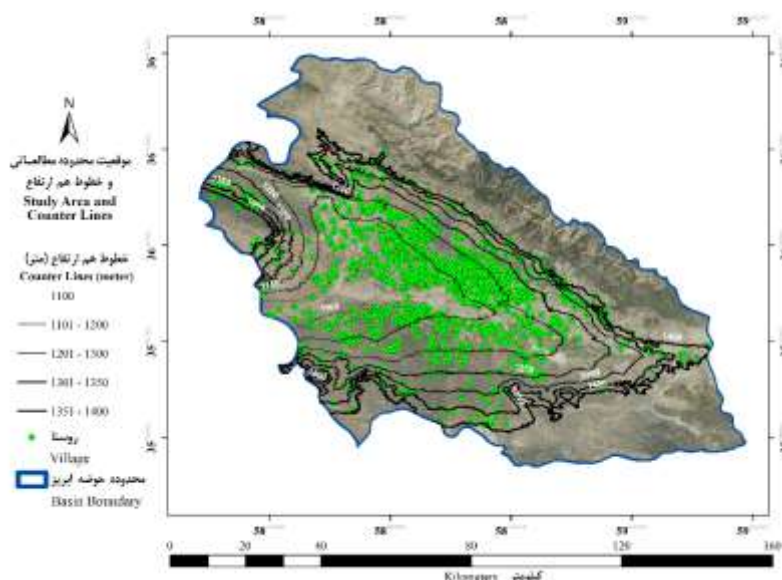
سنجنده AMSR2 به همراه تصاویر سنجنده مودیس و با اتکا به داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی مورد استفاده قرار گرفت. برآورد شاخص خشکی کشاورزی که کاملاً مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای بوده و با استفاده از طیف مایکروویو و در مقیاس مزرعه محاسبه شده باشد دستاورد نوآورانه این پژوهش است.

مواد و روش‌ها

حوضه آبریز نیشابور در طول جغرافیایی $58^{\circ}17'$ تا $59^{\circ}30'$ و عرض جغرافیایی $35^{\circ}40'$ تا $36^{\circ}39'$ واقع شده است. وسعت کل حوضه آبریز دشت نیشابور حدود ۷۳۵۰ کیلومتر مربع است. دشت نیشابور با وسعت ۳۴۷۷ کیلومتر مربع، ۴۷/۴۴ درصد مساحت حوضه آبریز نیشابور را تشکیل می‌دهد. (Velayati, 2000)

در این پژوهش بخشی از دشت مورد استفاده قرار گرفت که دامنه تغییرات ارتفاع در آن از حدود ۳۰۰ متر تجاوز نکند. در شکل ۱ نقشه موقعیت محدوده مطالعاتی، خصوصیات توپوگرافی و موقعیت روستاها نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲ کاربری اراضی در محدوده مطالعاتی معرفی شده است. بخش اعظم محدوده مطالعاتی به زراعت دیم و مراتع فقیر و متوسط اختصاص یافته است. توزیع جغرافیایی روستاها در این شکل می‌تواند به عنوان یک شاخص برای تحلیل بصری مطلوب بودن آب و خاک مورد توجه باشد.

داده‌های ماهواره‌ای



شکل ۱- نقشه خصوصیات توپوگرافی و موقعیت روستاها در محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور
Figure 1- Topographic characteristics and location of villages map in the study area of Neishabour plain

است. اندازه‌گیری رطوبت نمونه‌های خاک به صورت حجمی و به روش آون خشک انجام شده است. در طی مدت پژوهش ۵۶۰ نمونه خاک (۲۰ نمونه در ۲۸ نوبت) جمع‌آوری و اندازه‌گیری رطوبت خاک در محل آزمایشگاه گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد.

در شکل ۲ موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری نمایش داده شده است.

به منظور بررسی رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی؛ ابتدا ضریب وزنی هر یک از نقاط متناسب با مساحت تحت پوشش کاربری اراضی آن نقطه (شکل ۲) محاسبه شده و سپس میانگین وزنی رطوبت حجمی نقاط ۵ گانه داده‌برداری شده در هر پیکسل با مقدار رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده AMSR2 مقایسه شده است.

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2:

فنگ و همکاران (Fang et al., 2013) و فنگ و لاکشمی (Fang and Lakshmi, 2014) مدلی را برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های میکروویو رطوبت خاک بزرگ مقیاس مبتنی بر دمای سطحی و پوشش گیاهی توسعه دادند. این مدل بر نظریه اینرسی حرارتی استوار است که مقاومت حرارتی یک شی را بیان می‌کند. اینرسی حرارتی متناسب با رسانایی گرمایی، تراکم و ظرفیت گرمایی ویژه مواد است. ظرفیت گرمایی ویژه آب به طور عمومی بیشتر از خاک فاقد پوشش گیاهی است و این بدان معنی است که زمین خشک نسبت به زمین مرطوب سریعتر به تغییرات دما پاسخ می‌دهد. از این ویژگی می‌توان برای تبیین رابطه بین مقدار متوسط روزانه رطوبت خاک و تغییرات دمای سطح زمین استفاده کرد. رابطه خطی ۱ بر همین اساس استوار است:

$$\theta_{(s,t)}^{av} = a_0 + a_1 \Delta T_{(s,t)} \quad (1)$$

در رابطه شماره ۱، $\theta_{(s,t)}^{av}$ میانگین رطوبت خاک روزانه (داده ماهواره‌ای یا ایستگاهی)، و $\Delta T_{(s,t)}$ نیز تغییرات روزانه دمای سطحی ثبت شده توسط ماهواره در طول مدت شبانه روز است. a_0 و a_1 به ترتیب شیب و عرض از مبدا خط برازش داده شده هستند. ابتدا با استفاده از رابطه فوق ارتباط بین تغییرات روزانه دمای سطحی و رطوبت خاک برآورد شده، سپس از همین رابطه برای برآورد رطوبت خاک با استفاده از محصول دمای سطحی مودیس استفاده شده است.

به منظور برآورد دو متغیر رطوبت خاک و دمای سطحی در محدوده مطالعاتی، از محصول فوق در دو گذر روز و شب استفاده شده است. تصاویر در بازه زمانی ۲۲ نوامبر ۲۰۱۷ (۱ آذر ۱۳۹۶) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۸ (۱۵ خرداد ۱۳۹۷) و ۱ آوریل ۲۰۱۹ (۱۲ فروردین ۱۳۹۸) تا ۵ ژوئن ۲۰۱۹ (۱۵ خرداد ۱۳۹۸) از وب سایت داده‌های زمین به نشانی <https://search.earthdata.nasa.gov> و برای تمام روزها در بازه زمانی مذکور با فرمت NETCDF4 دریافت شده است.

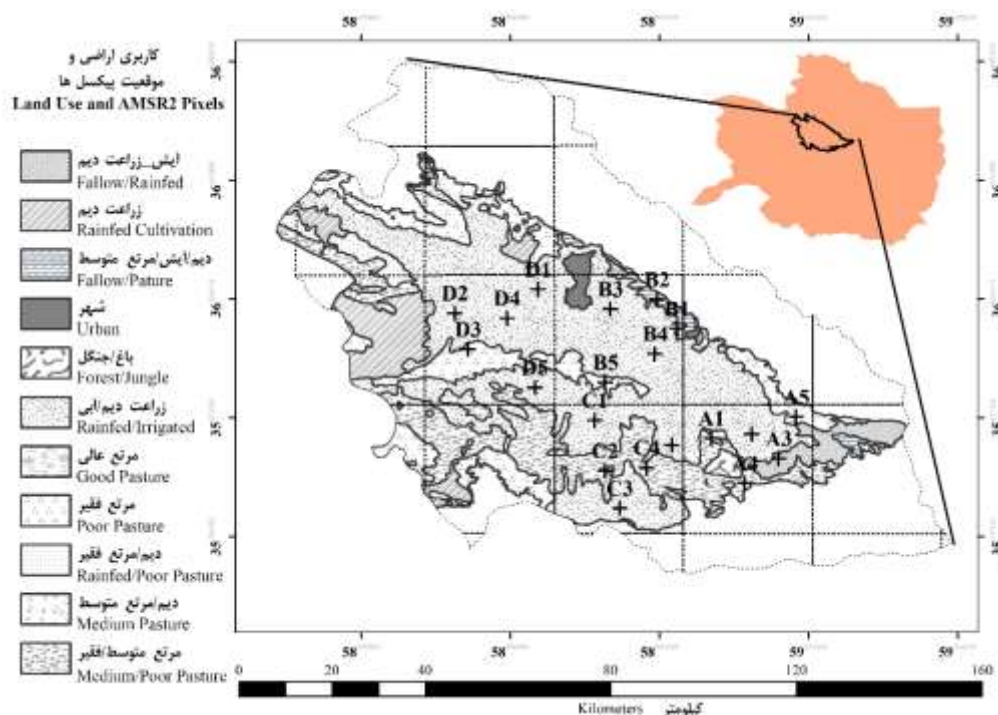
ب) سنجنده MODIS: عملیات ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس انجام شده است. محصول دمای سطح زمین (LST: Land Surface Temperature) یکی از محصولات روزانه سنجنده مودیس در گروه MOD11 است که با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و با استفاده از الگوریتم روزانه مجزا (Split Window) بازبایی می‌شود. همچنین شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) که در فواصل ۱۶ روزه و در تفکیک‌های مکانی متنوع تولید می‌شود، نیز در محصول MOD13 سنجنده مودیس ارائه می‌شود. هر دو محصول فوق در ابعاد ۱۰۰ متر (LST) و ۲۵۰ متر (NDVI) از پایگاه داده‌های زمین دریافت شدند.

+ داده‌های هواشناسی: داده‌های ایستگاه هواشناسی همدیدی نیشابور واقع در بخش شمال شرقی محدوده مطالعاتی شامل بارش ۲۴ ساعته، دمای متوسط روزانه و دمای نقطه شبنم از اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی دریافت شد.

واسنجی اطلاعات رطوبت خاک سنجنده AMSR2: به

منظور واسنجی داده‌های سنجنده AMSR2 پس از بر هم نهادن لایه‌های اطلاعاتی زیر، نقاط نمونه‌برداری در سطح محدوده مطالعاتی تعیین شد: (۱) لایه مرز محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت نیشابور (۲) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده AMSR2 با ابعاد ۲۵ کیلومتر (۳) موقعیت مکانی پیکسل‌های سنجنده MODIS با ابعاد ۱۰۰۰ متر (۴) کاربری اراضی (۵) راه‌های اصلی و فرعی

با تلفیق لایه‌های فوق در محیط نرم افزار ArcMap 10.5 نقاط نمونه‌برداری به گونه‌ای انتخاب شد که به ازای هر پیکسل سنجنده AMSR2، ۵ نقطه وجود داشته باشد که این نقاط نماینده کاربری‌های اراضی غالب آن پیکسل باشند. در نهایت ۴ پیکسل که بیشترین پوشش در محدوده مورد نظر را داشتند گزینش شدند. سپس نقاط نمونه‌برداری با فرمت N_i نام‌گذاری شدند. که N نام پیکسل سنجنده AMSR2 واقع در محدوده مطالعاتی است و می‌تواند یکی از حروف A، B، C و D را اختیار کند. i شماره نقطه در هر پیکسل



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی، موقعیت پیکسل‌های AMSR2 و نقاط نمونه‌برداری رطوبت خاک
Figure 2- Land use, location of AMSR2 pixels and soil moisture sampling points map

شماره ۲ است.

در مرحله بعد با استفاده از مقادیر رطوبت خاک دورسنجی، شاخص SMCI از طریق رابطه ۴ محاسبه خواهد شد:

$$SMCI = \frac{(SSM_{max} - SSM_i)}{(SSM_{max} - SSM_{min})} \quad (4)$$

در رابطه شماره ۴، SSM، مقدار رطوبت خاک است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده است. همچنین اندیس‌های $\min$ و $\max$ به ترتیب معرف مقدار رطوبت خاک در هر پیکسل، حداقل و حداکثر مطلق رطوبت خاک در هر تصویر است.

بازه زمانی کاربرد شاخص SMADI متناسب با تغییر بازه زمانی استخراج مقادیر حداقل و حداکثر شاخص‌های ورودی آن تغییر می‌کند. به طور مثال مقادیر اندیس‌های $\min$ و $\max$ در مورد هر یک از شاخص‌های NDVI، LST و SSM می‌تواند مربوط به بازه زمانی روزانه، هفتگی، ماهانه و ... باشد. بر این اساس نتایج شاخص SMADI نیز در بازه روزانه، هفتگی و ... به دست خواهد آمد.

در نهایت شاخص SMADI با ترکیب شاخص‌های فوق و به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$SMADI = SMCI \times MTCT/VCI \quad (5)$$

کلیه شاخص‌های رابطه شماره ۵ مقداری بین صفر و یک دارند که در شاخص SMADI مقدار صفر بیانگر بیشترین تنش خشکی و

شاخص خشکی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک

شاخص خشکی کشاورزی رطوبت خاک (SMADI: Soil Moisture Agricultural Drought Index) در سال ۲۰۱۶ توسط سانچز و همکاران (Sánchez et al., 2016) ارائه شد. این شاخص به طور کامل مبتنی بر داده‌های سنجش از دور بوده و با تلفیق تصاویر مرئی و مایکروویو در بردارنده متغیرهای دمای سطح زمین، پوشش گیاهی و رطوبت خاک محاسبه می‌شود. روابط محاسبه شاخص مذکور به صورت زیر است:

پس از محاسبه شاخص NDVI شاخص VCI از طریق رابطه ۲ محاسبه خواهد شد:

$$VCI = \frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \quad (2)$$

در رابطه شماره ۲ اندیس‌های $\min$ و $\max$ به ترتیب معرف مقدار شاخص پوشش گیاهی در هر پیکسل، حداقل و حداکثر مقدار شاخص پوشش گیاهی در هر تصویر است. پس از آن شاخص MTCT از طریق رابطه ۳ محاسبه خواهد شد:

$$MTCT = \frac{(LST_i - LST_{min})}{(LST_{max} - LST_{min})} \quad (3)$$

در رابطه شماره ۳، LST، مقدار دمای سطح زمین است که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به دست آمده است. و اندیس‌ها مشابه رابطه

از چهار پیکسل A، B، C و D در شکل ۳ ارائه شده است. در شکل ۳، بیشترین میزان همبستگی بین دو متغیر In-situ SM و AMSR2 SM در پیکسل D با ضریب تبیین 0.84 و کمترین میزان همبستگی در پیکسل A با ضریب تبیین 0.73 مشاهده شد. به منظور ریشه‌یابی دلیل اختلاف واکنش به امواج الکترومغناطیسی در ۴ پیکسل مذکور، اختلاف وضعیت پوشش گیاهی و کاربری اراضی در آن‌ها بررسی شده است. در جدول ۱ خصوصیات آماری دامنه تغییرات شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در محدوده مطالعاتی مربوط به سنجنده مودیس ارائه شده است.

مطابق شکل ۳ و جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین تنوع کاربری اراضی در پیکسل A و کمترین آن در پیکسل D مشاهده می‌شود. خصوصیات آماری شاخص NDVI نشان می‌دهد پیکسل A از بیشترین مقدار و پیکسل D از کمترین میزان انحراف معیار برخوردار است. که این می‌تواند بیانگر میزان پراکندگی مقادیر حول میانگین باشد که فزونی آن در پیکسل A بیانگر تنوع و دامنه تغییرات وسیع‌تر پوشش گیاهی است. با بررسی مجدد شکل ۲ می‌توان دریافت بیشترین شیب تغییرات ارتفاع مربوط به پیکسل A و کمترین آن مربوط به D است.

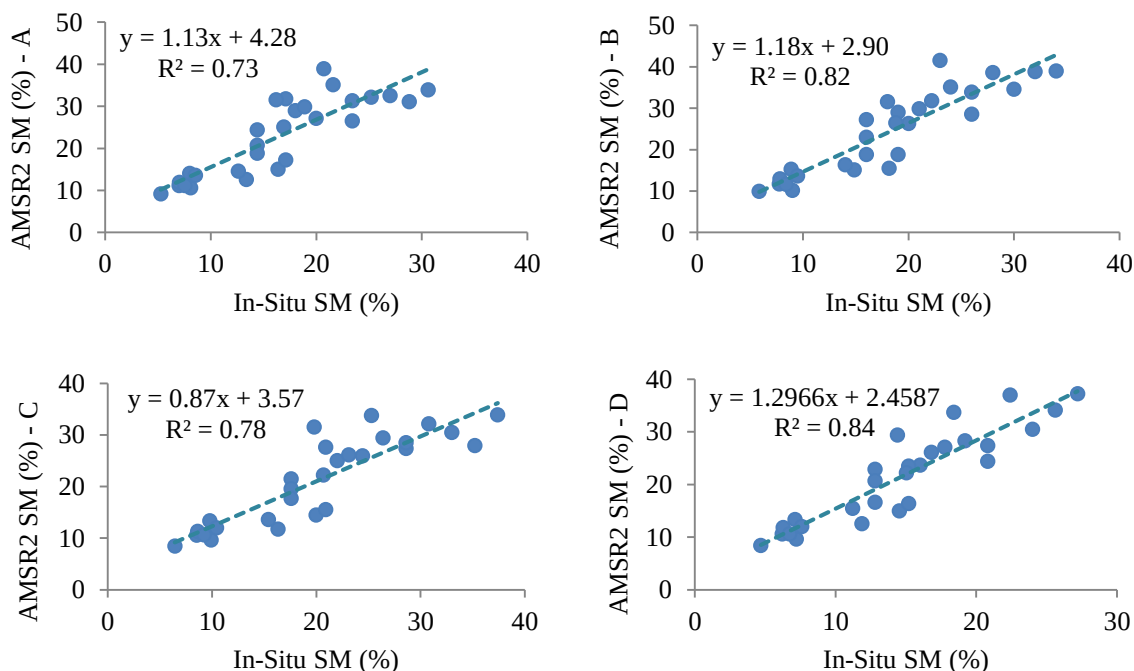
یک کمترین تنش خشکی خواهد بود. در روابط فوق، همه تصاویر متناسب با شاخص LST به‌دست آمده از محصولات سنجنده مودیس در مقیاس ۱۰۰۰ متر مورد استفاده قرار گرفته است.

به منظور ارزیابی نتایج، شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدرمطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) در سه کاربری اراضی منتخب شامل زراعت دیم ($R1$)، مرتع متوسط ($R2$) و مرتع فقیر ($R3$) بررسی شد.

نتایج و بحث

واسنجی داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2

باتوجه به اختلاف‌های موجود در نوع پوشش کاربری هر یک از پیکسل‌ها؛ بر این اساس برازش رابطه خطی بین داده‌های رطوبت خاک سنجنده AMSR2 [که بعد از این با نام اختصار AMSR2 SM یاد می‌شود] ابتدا با میانگین وزنی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی [که بعد از این با نام اختصار In-situ SM نمایش داده می‌شود] به ازای هر پیکسل صورت گرفته و سپس رابطه خطی برای کل محدوده مطالعاتی محاسبه شد. نتایج برازش رابطه خطی بین داده‌های ماهواره‌ای و مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی به ازای هر یک



شکل ۳- برازش رابطه خطی مجزا برای ۴ پیکسل A، B، C و D بین In-situ SM و AMSR2 SM ($P < 0.05$)

Figure 3- Independent linear regression fitting for 4 pixels A, B, C and D between AMSR2 SM and In-situ SM ($P < 0.05$)

جدول ۱- خصوصیات آماری تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI در پیکسل‌های A، B، C و D

Table 1- Statistical characteristics of NDVI changes in pixels A, B, C and D

شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

نام پیکسل Pixel name	Normalized Difference Vegetation Index			
	انحراف معیار Standard Deviation	میانگین Mean	کمینه Minimum	بیشینه Maximum
A	0.08	0.13	0.04	0.53
B	0.06	0.17	0.05	0.62
C	0.05	0.14	0.06	0.67
D	0.03	0.16	0.01	0.57

گفت گرچه رابطه برازش یافته قادر است حداکثر ۷۸ درصد تغییرات رطوبت خاک ماهواره‌ای را با تغییرات داده‌های میدانی تفسیر کند اما خط برازش داده شده رابطه ریاضی مناسبی بین متغیر مستقل و وابسته برقرار کرده و نقاط متناظر کمترین فاصله از این خط را دارا هستند. در مراحل بعدی این پژوهش از روابط رگرسیون به‌دست آمده در شکل ۳ به‌عنوان ضرایب واسنجی داده‌های AMSR2 استفاده شده است.

در جدول ۲ خلاصه بررسی شاخص‌های آماری مربوط به دقت برازش رابطه خطی ارائه شده است. در این جدول مقادیر خطاهای RMSE و MAE در محدوده ۱/۶ تا ۴ هستند که می‌توان در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. در پیکسل C باتوجه‌به بیشتر بودن میانگین رطوبت خاک، اگر چه مقدار ضریب تبیین به‌دست آمده از پیکسل‌های B و D کمتر است اما مقادیر خطای RMSE و MAE کمتری نیز به‌دست آورده است. لذا می‌توان

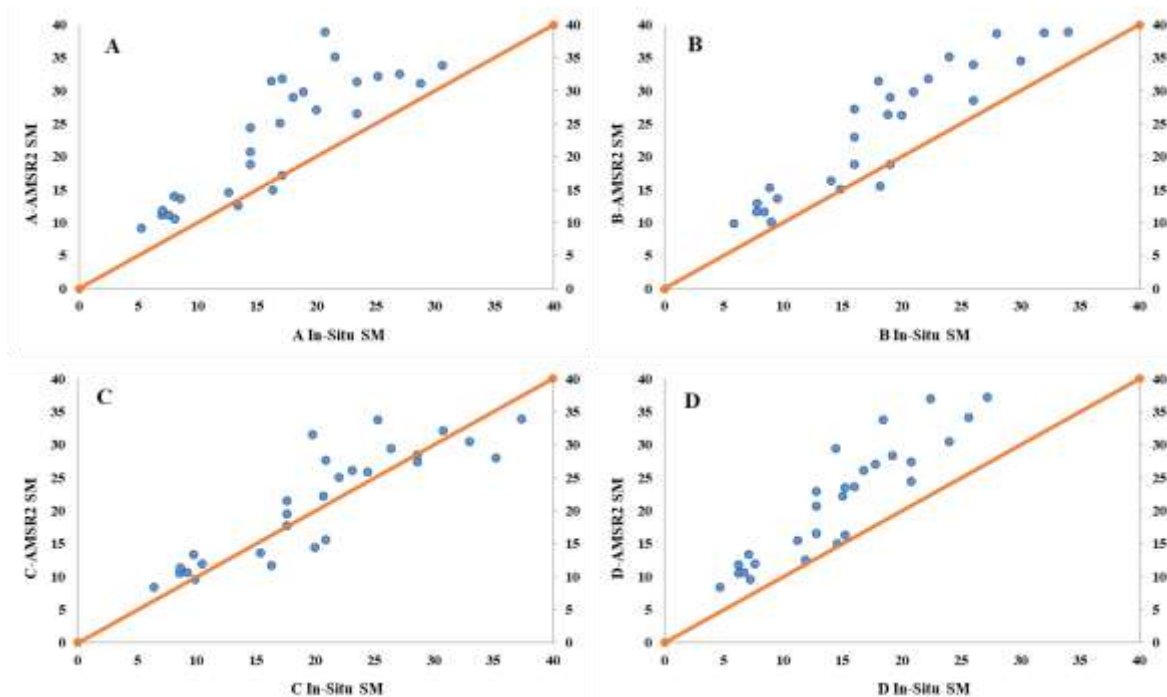
جدول ۲- خصوصیات آماری برازش رابطه خطی بین AMSR2 SM و In-Situ SM در پیکسل‌های A، B، C و D
Table 2- Linear regression characteristics for 4 pixels A, B, C and D between AMSR2 SM and Insitu SM

نام پیکسل Pixel name	In-Situ میانگین Mean In-Situ SM	میانگین قدر مطلق خطا Mean Absolute Error (MAE)	ریشه میانگین مربعات خطا Root Mean Square Error (RMSE)	ضریب تبیین Coefficient of Determination (R ²)
A	16	3.3	4.0	0.73
B	18	3.2	3.8	0.82
C	20	6.1	2.1	0.78
D	15	3.4	3.9	0.84

- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های رطوبت خاک:

در جدول ۳ خلاصه شاخص‌های آماری رابطه خطی بین تغییرات روزانه دما و AMSR2 SM که هر دو از سنجنده AMSR2 به دست آمده ارائه شده است. از آن جایی که اختلاف روزانه دمای سطحی رابطه عکس با میانگین رطوبت خاک سطحی دارد لذا کلیه ضرایب به دست آمده منفی است. همچنین کمترین ضریب تبیین به پیکسل A و بیشترین مقدار آن به پیکسل D و B تعلق دارد. باتوجه‌به اینکه تغییرات دما و رطوبت خاک هر دو تحت تاثیر عامل ارتفاع و پوشش گیاهی دستخوش تغییر می‌شوند لذا در این مورد نیز مشابه نتایج بخش قبل می‌توان کمینه و بیشینه ضرایب همبستگی را به تفاوت پیکسل‌ها از نظر پوشش گیاهی و دامنه تغییرات ارتفاعی ارتباط داد.

در شکل ۴ وضعیت توزیع داده‌های متناظر رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی و دورسنجی در ۴ پیکسل مورد مطالعه نسبت به نیم‌ساز ربع اول نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در هر ۴ پیکسل اغلب نقاط بالای خط نیم‌ساز قرار گرفته و باتوجه به اینکه ستون عمودی به داده‌های دورسنجی اختصاص دارد از این‌رو مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنجنده دارای بیش‌برآورد هستند. همچنین مشاهده می‌شود که این وضعیت فارغ از خصوصیات فیزیکی پیکسل‌ها (به غیر از پیکسل C) رخ داده و بر این اساس می‌توان گفت ناشی از دقت اندازه‌گیری سنجنده و الگوریتم LPRM است. مقدار بیش برآورد در پیکسل‌های A، B و D به طور میانگین ۶ درصد و در پیکسل C حدود ۱ درصد است. لازم به ذکر است مقادیر بیش‌برآورد یا کم‌برآورد در روابط برازش یافته در جدول ۲ انعکاس یافته است.



شکل ۴- توزیع مقادیر متناظر رطوبت خاک AMSR2 SM و In-Situ SM برای ۴ پیکسل A، B، C و D نسبت به نیم‌ساز ربع اول
Figure 3 - Distribution of corresponding soil moisture values of AMSR2 SM and In-Situ SM for 4 pixels A, B, C and D compared to the first quarter bisector

جدول ۳- شیب خط، عرض از مبدا و ضریب تعیین رابطه خطی تغییرات روزانه دما و AMSR2 SM ($P < 0.05$)
Table 3- Slope, intercept and coefficient of determination of linear regression between daily temperature changes and AMSR2 SM ($P < 0.05$)

نام پیکسل	ضریب تعیین	عرض از مبدا	شیب خط
Pixel name	Coefficient of determination (R^2)	Intercept	Line Slope
A	0.81	39.80	-2.44
B	0.95	41.76	-2.30
C	0.88	45.73	-2.67
D	0.95	50.97	-2.23

بخش‌های قبلی، داده‌های ورودی فوق به‌طور کامل مبتنی بر محصولات سنجنده مودیس و AMSR2 با ابعاد ۱۰۰۰ متر (ابعاد مزرعه) استخراج شده است.

در پژوهش‌های مشابه، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج از سایر شاخص‌های خشکسالی کشاورزی مشابه، عملکرد محصولات زراعی، شاخص پوشش گیاهی، بارندگی، رطوبت خاک و امثال آن استفاده می‌شود. باتوجه به ماهیت کشاورزی و کوتاه مدت شاخص SMADI در این پژوهش مقایسه آن با شاخص‌های مرسوم خشکسالی هواشناسی از جمله SPI و SPEI نمی‌توانست گزاره‌های درستی ارائه نماید، چرا که ماهیت فیزیکی و همچنین بازه‌های زمانی آن با شاخص مورد استفاده در این پژوهش اساساً متفاوت است. از سوی دیگر شاخص‌های وابسته به پوشش گیاهی مانند NDVI، VCI، SAVI و امثال آن نیز پیشاپیش در محاسبه شاخص SMADI به کار

در گام بعدی، از روابط فوق برای محاسبه رطوبت خاک ریزمقیاس شده در ابعاد ۱۰۰۰ متر استفاده شده است. بر این اساس تغییرات دمای روزانه سطحی به‌دست آمده از اختلاف دو تصویر سنجنده مودیس در گذر روز و شب (ماهواره‌های ترا و آکوا) به‌عنوان ورودی رابطه خطی (برگرفته از روابط ارائه شده در جدول ۳) و خروجی آن رطوبت خاک ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 با ابعاد ۱۰۰۰ متر خواهد بود که از این به بعد با نام اختصاری (Down Scaled AMSR2: DS-AMSR2) معرفی می‌شود.

شاخص خشکی کشاورزی

به منظور محاسبه شاخص خشکی کشاورزی SMADI سه مجموع داده ورودی شامل رطوبت خاک، شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین مورد نیاز است. باتوجه به توضیحات ارائه شده در

سری زمانی این متغیر به شکل میانگین متحرک با گام‌های زمانی سه روزه نمایش داده شده است.

در شکل ۶ هر سه منحنی، روندی مشابه با تغییرات بارش را تجربه کرده‌اند و این نشان می‌دهد بارش یکی از موثرترین عوامل در بروز تغییرات عمده در نوسان شاخص خشکی کشاورزی SMADI است. چرا که علی‌رغم اختلاف در سایر عوامل محیطی در هر یک از محدوده‌های R1، R2 و R3 به ندرت نشانه‌ای از بروز نوسان قابل توجه در سری زمانی تغییرات شاخص مشاهده می‌شود.

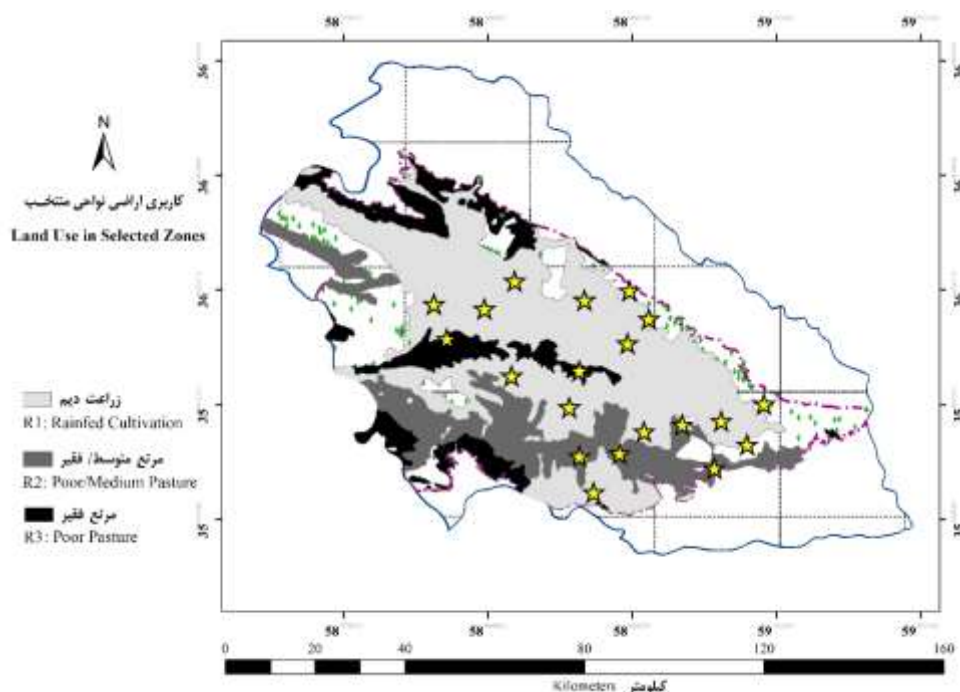
همچنین مشاهده می‌شود تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه منحنی با تاخیر ۱ تا ۸ روزه نسبت به تغییرات بارش منعکس شده است. کمترین تاخیر زمانی در محدوده R3 و بیشترین آن در R1 مشاهده می‌شود. همچنین در فصل زمستان بارش‌های جزئی (کمتر از ۵ تا ۷ میلی متر در روز) نتوانسته تاثیر چشم‌گیری بر تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در دو محدوده R1 و R2 بگذارد درحالی‌که در محدوده R3 تغییرات شاخص خشکی کشاورزی، ارتباط مستقیم تری با وقوع نزولات جوی دارد. عدم بارش یکنواخت و محدودیت اندازه‌گیری روزانه آن در سطح دشت و همچنین اختلاف در پوشش گیاهی می‌تواند دو مورد از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در وقوع این اختلاف باشد.

رفته و استفاده از آن‌ها به‌عنوان ابزار اعتبارسنجی موجب بروز آریبی در نتایج ارزیابی می‌شود.

با این توضیح به‌منظور ارزیابی کیفی نتایج به‌دست آمده از محاسبه شاخص خشکی کشاورزی SMADI، سه مورد از مهم‌ترین و وسیع‌ترین کاربری‌های اراضی موجود در محدوده مطالعاتی که لاقبل دو نقطه نمونه‌گیری رطوبت خاک میدانی در آن وجود داشت انتخاب شد و در هر یک از این مناطق، رابطه تغییرات بین سری زمانی شاخص‌های بارش (۲۴ ساعته)، میانگین رطوبت خاک (In-Situ SM) و میانگین شاخص خشکی کشاورزی (میانگین پیکسل‌ها در هر محدوده) مورد بررسی قرار گرفت.

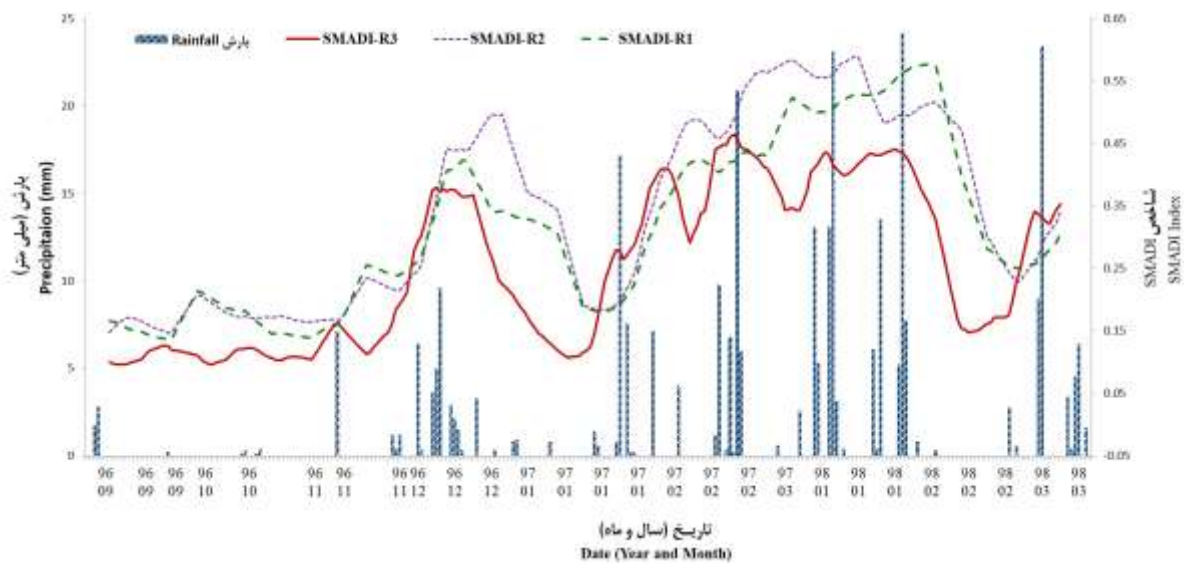
در شکل ۵ محدوده کاربری اراضی منتخب و همچنین مساحت هر یک از محدوده‌ها بر حسب کیلومتر مربع نمایش داده شده است. "زراعت دیم (R1)"، "مرتع متوسط-فقیر (R2)" و "مرتع فقیر (R3)" به‌ترتیب با مساحت ۲۱۷۸، ۷۱۲ و ۵۶۵ کیلومترمربع محدوده‌های انتخابی را شامل می‌شوند.

در شکل ۶ نمودار مقایسه تغییرات زمانی دو متغیر بارش و شاخص خشکی کشاورزی SMADI نمایش داده شده است. باتوجه‌به اینکه استخراج شاخص خشکی کشاورزی مشروط به وجود تصاویر مناسب و فاقد ابرناکی سنجنده مودیس است لذا امکان محاسبه شاخص در برخی روزها وجود نداشته و لذا به‌منظور حفظ یکپارچگی منحنی تغییرات شاخص خشکی کشاورزی، در کلیه نمودارهای ذیل،



شکل ۵- نقشه محدوده‌های مکانی منتخب برای ارزیابی کیفی شاخص SMADI

Figure 5- Location of selected zone for SMADI index assessment



شکل ۶- نمودار سری زمانی تغییرات شاخص SMADI-R1، SMADI-R2 و SMADI-R3 در برابر بارش
(منحنی تغییرات شاخص خشکی کشاورزی میانگین متحرک سه روزه است).

Figure 6- Time series chart of SMADI-R1, SMADI-R2 and SMADI-R3 index against precipitation
(The change curve of agricultural drought index is a three-day moving average).

جدول ۴- جدول خلاصه خصوصیات آماری سری زمانی مقادیر شاخص SMADI در سه محدوده R1 تا R3
Table 4- Summary of statistical characteristics of time series of SMADI index values in three zones R1 to R3

	SMADI-R1	SMADI-R2	SMADI-R3
میانگین (Mean)	0.32	0.34	0.25
میانه (Median)	0.30	0.34	0.22
بیشینه (Maximum)	0.58	0.60	0.49
کمینه (Minimum)	0.13	0.13	0.09
دامنه تغییرات (Variation range)	0.45	0.47	0.40
انحراف معیار (Standard deviation)	0.14	0.15	0.13

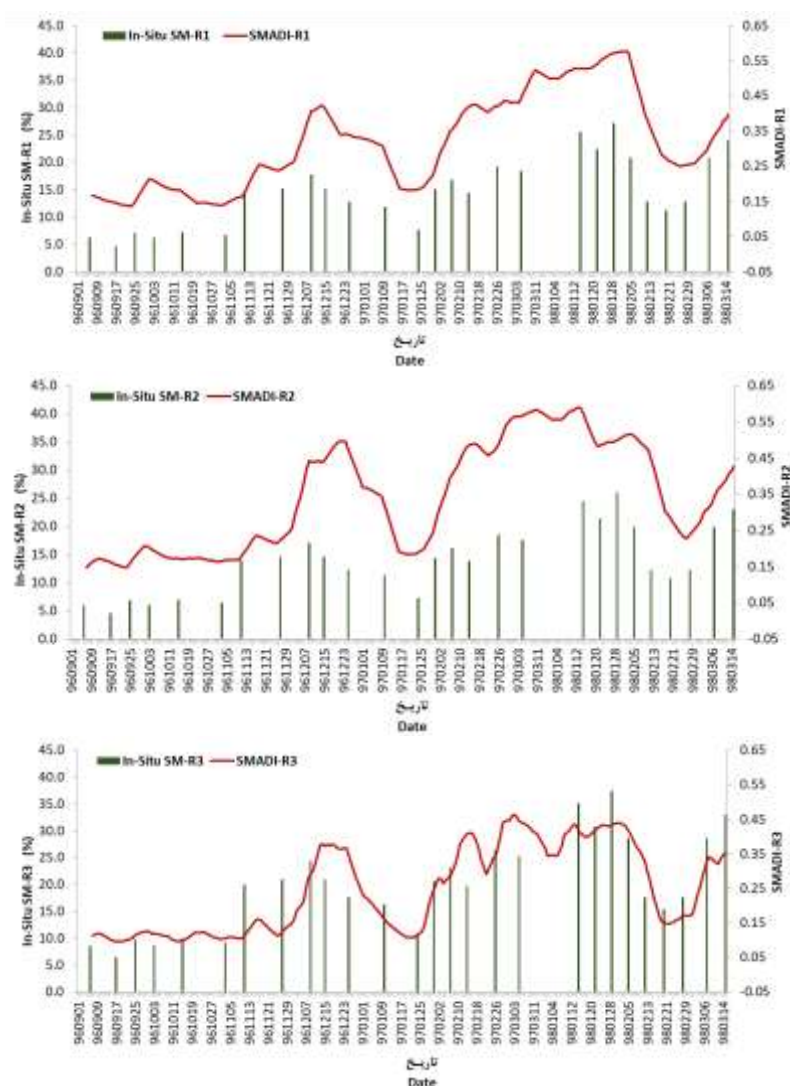
کمترین میزان شاخص‌های آماری برخوردار است. به‌منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده می‌توان عنوان کرد که پوشش مرتعی متوسط موجود در محدوده R2 تا حد زیادی وابسته به تغییرات محیطی بوده و در فصل سبزی‌نگی مرتع چنانچه بارندگی کافی رخ ندهد تنش آبی رخ داده و شاخص خشکی کشاورزی متعاقباً کاهش می‌یابد. با وقوع بارندگی‌های پراکنده بهاری، بخشی از تنش وارده جبران شده و شاخص خشکی کشاورزی افزایش می‌یابد. وجود پوشش گیاهی مرتعی متوسط در سطح زمین و نوسانات بارندگی موجب گسترش دامنه تغییرات شاخص خشکی کشاورزی شده و طیف وسیع‌تری از مقادیر کمینه و بیشینه را رقم می‌زند. از سوی دیگر در محدوده R3 به دلیل وجود پوشش گیاهی ناچیز و فقیر، اساساً شاخص خشکی کشاورزی نقش کم‌رنگ‌تری پیدا کرده و لذا شرایط محیطی از جمله نوسانات بارندگی سهم عمده‌ای در تغییرات شاخص ایفا نمی‌کند، چرا که عامل پوشش گیاهی این نوسانات را تعدیل می‌کند.

از سوی دیگر در فصل بهار در محدوده R1، تغییرات شاخص گرچه با الگوی تجمعی بارش همخوانی دارد، اما به نظر می‌رسد عوامل موثر دیگری همچون آبیاری اراضی، توامان بر تغییرات رطوبتی در محیط تأثیرگذار بوده است. عامل پوشش گیاهی و تغییرات اختلاف دمای کانوپی گیاهان در دوره‌های مختلف رشد نیز می‌تواند با تأثیر مستقیم بر تغییرات دمای سطح زمین، بر برآورد تنش خشکی کشاورزی توسط شاخص SMADI تأثیرگذار باشد. در شکل ۶ تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در دو محدوده R1 و R2 از الگوی مشابهی پیروی کرده‌اند.

در جدول ۴ خلاصه خصوصیات آماری سری زمانی مقادیر شاخص SMADI در سه محدوده R1، R2 و R3، شامل میانگین، میانه، بیشینه، کمینه، دامنه تغییرات و انحراف معیار درج شده است. مطابق جدول ۴، محدوده R2 بیشترین مقادیر کلیه شاخص‌های آماری را به خود اختصاص داده است. همچنین محدوده R3 از

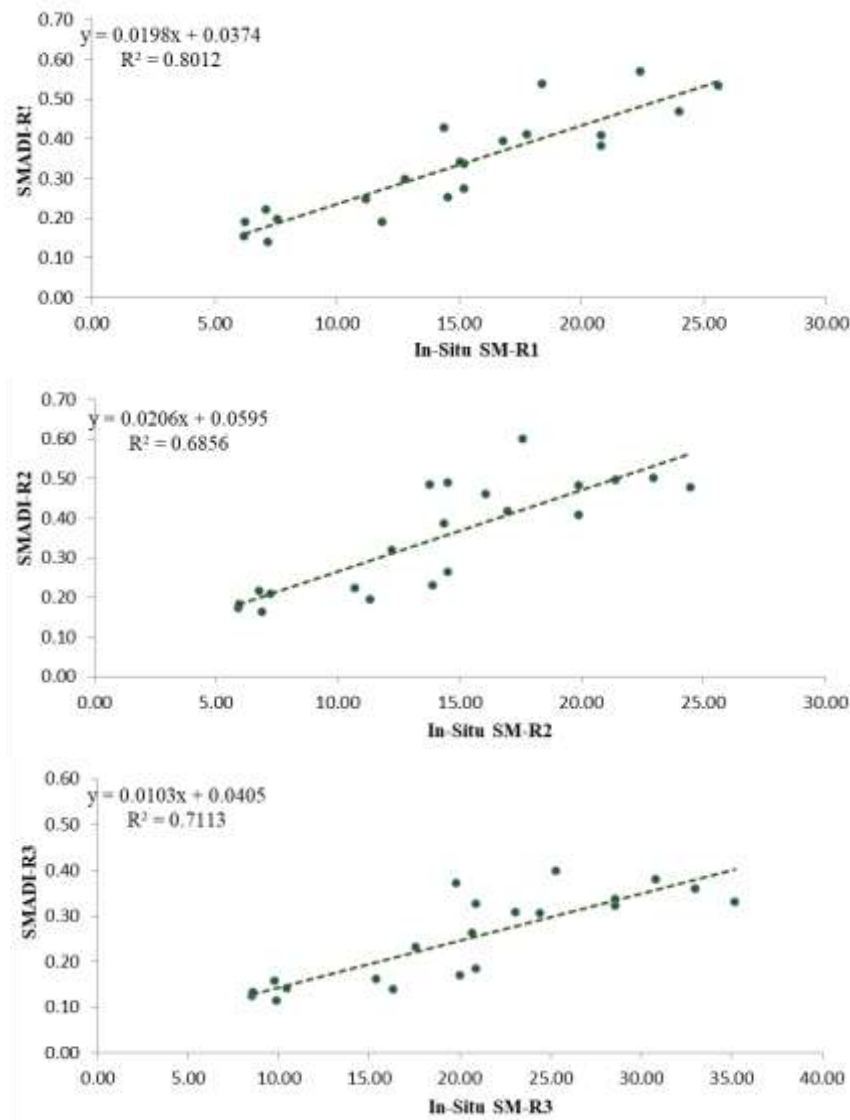
شاخص SMADI در برابر In-Situ-SM در هر یک از محدوده‌های R1، R2 و R3 را نشان می‌دهد. در این نمودار گرچه هر سه منحنی روندی مشابه تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را پیموده‌اند اما همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین تشابه در روند تغییرات شاخص خشکی کشاورزی (دورسنجی) و رطوبت خاک (مشاهدات میدانی)، در محدوده R1 به چشم می‌خورد. پس از آن محدوده R3 و سپس R2 تشابه کمتری را نشان می‌دهند.

از سوی دیگر در محدوده R1 که بیشترین پوشش گیاهی محدوده مطالعاتی با کاربری غالباً زراعی را به خود اختصاص می‌دهد، گرچه نوسانات بارندگی می‌تواند نقش چشم‌گیری در کنترل شرایط بروز تنش آبی داشته باشد، اما اعمال برنامه آبیاری توسط زارعین نقش بارندگی را تضعیف کرده و لذا نسبت به محدوده R2 تغییرات کمتری را در شاخص خشکی کشاورزی بروز می‌دهد. با بررسی رابطه تغییرات شاخص SMADI و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی (In-Situ-SM) می‌توان نتایج به‌دست‌آمده از شکل ۶ را اعتبارسنجی کرد. شکل ۷ نمودار سری زمانی تغییرات



شکل ۷- نمودار سری زمانی تغییرات شاخص SMADI در برابر In-Situ-SM در محدوده‌های R1 (بالا)، R2 (وسط) و R3 (پایین)

Figure 7- SMADI index time series against In-Situ-SM in R1 (top), R2 (middle) and R3 (bottom) zones



شکل ۸- نمودار برازش رابطه خطی بین شاخص SMADI و متغیر In-Situ-SM در محدوده‌های R1 (بالا)، R2 (وسط) و R3 (پایین) ($P < 0.05$)
Figure 8- Linear regression chart between SMADI index and In-Situ-SM for R1 (top), R2 (middle) and R3 (bottom) zones ($P < 0.05$)

نمایش داده شده است. در این شکل روابط خطی محاسبه شده گرچه توانسته‌اند سطح قابل قبولی از ارتباط تغییرات زمانی شاخص خشکی کشاورزی با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را تبیین کنند، اما در بهترین حالت (محدوده R1) ۸۰ درصد (ضریب تعیین ۰.۸) تغییرات شاخص SMADI-R1 وابسته به In-Situ SM-R1 بوده و باقی تغییرات به سایر عوامل محیطی ارتباط داشته است. این عدد در محدوده R3 به ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

باتوجه به مجموعه تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان گفت اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی به خوبی در شاخص خشکی کشاورزی SMADI انعکاس یافته و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های

در محاسبه شاخص SMADI عامل SMCi برگرفته از تصاویر ریزمقیاس شده سنجنده AMSR2 نقش موثری در اعمال تاثیر تغییرات رطوبت خاک سطحی ایفا می‌کند. از سوی دیگر پوشش گیاهی و سلامت محصولات زراعی صرفاً از شرایط سطح زمین تاثیر پذیرفته و تغییرات رطوبت خاک در ناحیه ریشه نیز نقش ویژه‌ای دارد که این امر موجب پیچیده شدن ارتباط بین تغییرات شاخص خشکی کشاورزی و تغییرات رطوبت خاک سطحی می‌شود. بر این اساس نباید انتظار داشت تغییرات رطوبت خاک به تنهایی موجب افزایش یا کاهش شاخص خشکی کشاورزی در کوتاه مدت شود. همین امر نیز ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکی کشاورزی را دشوار می‌سازد.

در شکل ۸ رابطه خطی بین دو متغیر SMADI و In-Situ-SM

هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

اتکای اغلب شاخص‌های هواشناسی یا هواشناسی کشاورزی به بارش یا یکی از شاخص‌های پوشش گیاهی و همچنین عدم امکان کاربرد آن‌ها در پهنه‌های وسیع به دلیل وابسته بودن به داده‌های نقطه‌ای و ایستگاهی از جمله نقاط ضعفی است که در الگوریتم محاسبه شاخص SMADI تا حد زیادی مرتفع شده است. چرا که فیزیک این شاخص بر تلفیقی از پوشش گیاهی، رطوبت خاک و تغییرات دمایی و بهره‌مندی از داده‌های دورسنجی استوار است. بررسی‌های آفاکوچک (AghaKouchak, 2014) نیز موید همین رویکرد است.

نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی رطوبت خاک سطحی سنجنده AMSR2 که با استفاده از الگوریتم LPRM توسط JAXA بازیابی شده است حاکی از آن است که با در نظر گرفتن مقادیر خطاهای برازش رابطه خطی بین داده‌های دورسنجی و اندازه‌گیری شده میدانی، مقدار RMSE و MAE در محدوده ۱۶ تا ۴ درصد محاسبه شد که می‌توان این میزان خطا را در مقایسه با مقادیر میانگین داده‌ها (۱۵ تا ۲۰) قابل قبول دانست. همچنین کمترین ضریب تعیین ۷۳ برای پیکسل A از پیکسل‌های چهارگانه و بیشترین آن ۸۴ درصد برای پیکسل D محاسبه شد و این بیانگر آن است که حداقل ۷۳ درصد تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، در داده‌های دریافت شده از سنجنده AMSR2 منعکس شده است. نتایج پژوهش فرخی و همکاران (Farokhi et al., 2019) نیز موید این ویژگی بوده است. از سوی دیگر روند تغییرات رطوبت خاک دورسنجی، تطبیق خوبی با روند تغییرات سایر متغیرهای محیطی به ویژه بارش داشت. همچنین نتایج این فرضیه را تقویت کرد که دو عامل پوشش گیاهی و تغییرات ارتفاعی سطح زمین از جمله عوامل موثر در اعتبارسنجی و واسنجی داده‌های دورسنجی رطوبت خاک محسوب می‌شوند. در این پژوهش از داده‌های ریزمقیاس شده رطوبت خاک در ابعاد ۱۰۰۰ متر برای محاسبه شاخص خشکی کشاورزی استفاده شد. همچنین پس از تولید سری زمانی شاخص، با استفاده از مقایسه نتایج با سری زمانی بارش و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی، عملکرد شاخص ارزیابی شد.

منابع

فنگ و همکاران (Fang et al., 2013) و فنگ و لاکشمی (Fang and Lakshmi, 2014) نیز نتایج مشابهی را در مطالعات خود مشاهده کردند. بر این اساس با انتخاب سه نوع کاربری زمین غالب در محدوده مطالعاتی، رابطه بین متغیرهای ذکر شده در این سه محدوده به صورت مجزا بررسی شد. نتایج نشان داد تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه محدوده روندی مشابه با تغییرات بارش را تجربه کرده‌اند و این نشان می‌دهد بارش یکی از موثرترین عوامل در بروز تغییرات عمده در نوسان شاخص خشکی کشاورزی SMADI است. همچنین مشاهده شد تغییرات شاخص خشکی کشاورزی در هر سه متحنی با تاخیر ۱ تا ۸ روزه نسبت به تغییرات بارش منعکس شده است. در هر سه محدوده، شاخص SMADI روندی مشابه تغییرات رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را پیموده‌اند. برازش روابط خطی بین رطوبت خاک محاسبه شده نشان داد گرچه توانسته‌اند سطح قابل قبولی از ارتباط تغییرات زمانی شاخص خشکی کشاورزی با رطوبت خاک اندازه‌گیری شده میدانی را تبیین کنند اما در بهترین حالت (۸۰ درصد در محدوده R1 درصد (ضریب تعیین ۰/۸)) تغییرات شاخص SMADI-R1 وابسته به In-Situ SM-R1 بوده و باقی تغییرات به سایر عوامل محیطی ارتباط داشته است. این عدد در محدوده R3 به ۶۸ درصد کاهش می‌یابد.

باید به این نکته توجه داشت که پایش رطوبت خاک می‌تواند با دقت بیشتری نسبت به سایر متغیرها تأثیر عوامل محیطی بر تغییرات شاخص خشکی کشاورزی را منعکس نماید چرا که بارندگی ثبت شده در محل ایستگاه هواشناسی الزاما به صورت یکنواخت در سطح محدوده مطالعاتی رخ نداده و از سوی دیگر هر میزان بارندگی الزاما منجر به تغییر موثر ذخیره رطوبتی خاک نخواهد شد. همین امر نیز ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکی کشاورزی را دشوار می‌سازد. این موضوع در پژوهش مودانسی و همکاران (Modanesi et al., 2019) نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مجموع می‌توان گفت اندرکنش‌های بین بارش، رطوبت خاک، پوشش گیاهی و تغییرات پروفیل دمایی کانوپی به خوبی در شاخص خشکی کشاورزی SMADI که در ابعاد مقیاس مورد بررسی قرار گرفته انعکاس یافته و این ویژگی کاربرد آن را در تحلیل‌های هواشناسی کشاورزی توجیه و تقویت می‌کند.

1. Adegoke J.O., and Carleton A.M. 2002. Relations between Soil Moisture and Satellite Vegetation Indices in the U.S. Corn Belt. Journal of Hydrometeorology 3: 395-405. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003%3c0395:RBSMAS%3e2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003%3c0395:RBSMAS%3e2.0.CO;2).
2. Adnan M., Merwade V., and Yu Z. 2016. Multi-objective calibration of a hydrologic model using spatially distributed remotely sensed / in-situ soil moisture. Journal of Hydrology 536: 192-207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.037>.
3. AghaKouchak A. 2014. A baseline probabilistic drought forecasting framework using Standardized Soil Moisture

- Index: Application to the 2012 United States drought. *Hydrol. Earth Systematic Science* 18(7): 2485–2492. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2485-2014,%202014>.
4. Boken V.K. 2005. Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study. Oxford Univ. Press. New York. 496. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195162349.001.0001>.
5. Brocca L., Ciabatta L., Massari C., Camici S., and Tarpanelli A. 2017. Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. *Water* 9(2): 140. <https://doi.org/10.3390/w9020140>.
6. Carrão H., Russo S., Sepulcre-canto G., and Barbosa P. 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. *International Journal Apply Earth Obs Geoinf* 48:74-84. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.011>.
7. Chen J., Wen J., and Tian H. 2016. Representativeness of the ground observational sites and up-scaling of the point soil moisture measurements. *Journal of Hydrology* 533: 62–73. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.032>.
8. Chen L., and Wang L. 2018. Recent advance in earth observation big data for hydrology. *Big Earth Data*. 1–22. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1435072>.
9. De Jue R.D., and Owe M. 2014. AMSR2/GCOM-W1 surface soil moisture (LPRM) L3 1 day 25 km x 25 km ascending V001, Edited by Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) (Bill Teng). Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). Greenbelt. MD. USA. <https://doi.org/10.5067/CGDEOBASZ178>.
10. Dostálová A., Doubková M., Sabel D., Bauer-Marschallinger B., and Wagner W. 2014. Seven years of advanced synthetic aperture radar (ASAR) global monitoring (GM) of surface soil moisture over Africa. *Remote Sens* 6(8): 7683–7707. <https://doi.org/10.3390/rs6087683>.
11. Entekhabi D., Reichle R.H., Koster R.D., and Crow W.T. 2010. Performance metrics for soil moisture retrievals and application requirements. *Journal Hydrometeorology* 11(3): 832–840. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1223.1>.
12. Fang B., and Lakshmi V. 2014. Soil moisture at watershed scale: Remote sensing techniques. *Journal of Hydrology* 516:2014: 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.008>.
13. Fang B., Lakshmi V., Bindlish R., Jackson T.J., Cash M., and Basara J. 2013. Passive Microwave Soil Moisture Downscaling Using Vegetation Index and Skin Surface Temperature. *Vadose Zone Journal* <https://doi.org/10.2136/vzj2013.05.0089>.
14. Farokhi M., Ansari H., and Faridhosseini A. 2019. Integration of retrievals of the AMSR2 sensor with MODIS products to estimate soil moisture at high resolution. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 13(3): 687-698. (In Persian with English abstract)
15. Fashae M., and Sanaei Nejad S.H. 2021. Downscaling Retrievals of the AMSR2 Passive Microwave Soil Moisture Imagery to Farm Scale. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 14(6): 1973–1983. (In Persian with English abstract). <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087942.2021.14.6.28.9>.
16. Ghafari E., Davari K., and Farid Hosseini A. 2020. Development of Improved Algorithms for Downscaling SMAP-Derived Soil Moisture Using Visible/Inferred satellite observations. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 14(2): 650–660. (In Persian with English abstract)
17. Jagdhuber T., Konings A.G., McColl K.A., Alemohammad S.H., Das N.N., Montzka C., Link M., Akbar R., and Entekhabi D. 2019. Physics-Based Modeling of Active and Passive Microwave Covariations Over Vegetated Surfaces. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 57: 788-802. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2860630>.
18. Kim J., and Hogue T. 2012. Improving spatial soil moisture representation through integration of AMSR-E and MODIS products. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens* 50(2): 446–460. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2161318>.
19. Kim S., Liu Y.Y., Johnson F.M., Parinussa R.M., and Sharma A. 2015. A global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ?. *Remote Sensing of Environment* 161: 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.002>.
20. Martinez-Fernández J., González Zomora A., Sánchez N., and Gumuzzio A. 2016. Remote Sensing of Environment Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water De fi cit Index. *Remote Sensing of Environment* 177: 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.064>.
21. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W., Sazib N., and Reynolds C. 2020. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals Into a Global Soil Water Balance Model. *Frontiers in Big Data* 3: 10. <https://doi.org/10.3389/fdata.2020.00010>
22. Modanesi S., Massari C., Camici S., Brocca L., and Amarnath G. 2019. Do Satellite Surface Soil Moisture Observations Better Retain Information About Crop- Yield Variability in Drought Conditions?. *Water Resources Research* 56(2). <https://doi.org/10.1029/2019WR025855>.
23. Mohanty B.P., Cosh M.H., Lakshmi V., and Montzka C. 2017. Soil moisture remote sensing: state-of-the-science.

- Vadose Zone Journal 16(1): 1–9. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.10.0105>.
24. Montzka C., Bogaen H.R., Zreda M., Monerris A., Morrison R., Muddu S., and Vereecken H. 2017. Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes. *Remote Sens* 9(2): 103–136. <https://doi.org/10.3390/rs9020103>.
 25. Niazi Y., Talebi A., Mokhtari M.H., and Vazifiedoust M. 2018. Presenting a soil moisture-based drought index derived from Global Land Data Assimilation System (GLDAS-SMDI) in central Iran. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)* 27(107): 179–191. <http://doi.org/10.22131/SEPEHR.2018.33574>.
 26. NOAA Office of Satellite and Product Operation (OSPO) website, About AMSR-2, https://www.ospo.noaa.gov/Products/atmosphere/gpds/about_amsr2.html. Date of Visit: 2020-05-13.
 27. Paredes-trejo F., and Barbosa H. 2017. Evaluation of the SMOS-Derived Soil Water Deficit Index as Agricultural Drought Index in Northeast of Brazil. <https://doi.org/10.3390/w9060377>.
 28. Peng J., and Loew A. 2017. Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. *Water* 9(7): 530–534. <https://doi.org/10.3390/w9070530>.
 29. Saha A., Patil M., Goyal V., and Rathore DS. 2018. Evaluation W. Assessment and Impact of Soil Moisture Index in Agricultural Drought Estimation Using Remote Sensing and GIS Techniques. 3rd International Electronic Conference on Water Sciences (ECWS-3), 2018; (November). <https://doi.org/10.3390/ECWS-3-05802>.
 30. Sánchez N., González-zamora Á., Piles M., and Martínez-fernández J. 2016. SMADI Integrating MODIS and SMOS Products: A Case of Study over the Iberian Peninsula. <https://doi.org/10.3390/rs8040287>.
 31. Sur C., Park S., Kim T., and Lee J. 2019. Remote Sensing-based Agricultural Drought Monitoring using Hydrometeorological Variables. *KSCE Journal of Civil Engineering* 23: 5244–5256. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43744-6_7.
 32. Takada M., Mishima Y., and Natsume S. 2009. Estimation of surface soil properties in peatland using ALOS/PALSAR. *Landscape Ecology Engineering* 5(1): 45–58. <http://dx.doi.org/10.1007/s11355-008-0061-4>.
 33. Velayati S. 2000. The most important factors affecting the qualitative changes of Neishabour plain aquifer. *Geographical Researches Journal* 149: 119–134. (In Persian)
 34. Wilhite D.A. 2005. *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*. CRC Press 86: 432. <https://doi.org/10.1201/9781420028386>.
 35. Wang L., and Qu J.J. 2009. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Front. Earth Science Chin* 3(2): 237–247. <https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7>.
 36. Wang J., Ling Z., Wang Y., and Zeng H. 2016. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Improving spatial representation of soil moisture by integration of microwave observations and the temperature–vegetation–drought index derived from MODIS products. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 113: 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.009>.
 37. Zhang D., Li Z.L., Tang R., Tang B.H., and Wu H. 2014. A remote sensing technique to determine the soil moisture saturation index. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research* 978-1-4799-5775-0/14. 3280. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6947180>.
 38. Zhu Q., Luo Y., Xu Y., Tian Y., and Yang T. 2019. Satellite Soil Moisture for Agricultural Drought Monitoring: Assessment of SMAP-Derived Soil Water Deficit Index in Xiang River Basin. *Remote Sensing* 11(3): 362. <https://doi.org/10.3390/rs11030362>.

Contents

Sensitivity and Uncertainty Analysis of SWAT Model in Flow, Sediment and Phosphorus Simulation for a Mountainous Watershed (Case Study of Karaj River Catchment)	167
S. Nourinezhad, M.M. Rajabi, T. Fathi	
Effect of Planting Date on Yield and Water Productivity of Sunflower Using AquaCrop Model	185
B. Sadeghi, B. Farhadi Bansouleh, A. Bafkar, M. Ghobadi	
Assessment of Water Status and Its Critical Stages in Dryland Barley Genotypes (<i>Hordeum vulgare</i>) Using Crop Water Stress Index (CWSI)	197
V. Feiziasl	
Investigation of Soil Washing Infected with Petroleum Compounds Using Sodium Dodecyl Sulfate	215
E. Asrari, H. Talebi	
Assessment of Triple Super Phosphate Fertilizer and Irrigation Salinity Effects on Soil Cadmium Mobility and Absorption	225
A. Moslehi, M. Feizian	
Evaluating TOPSIS Method in Prioritizing Lands for Saffron Cultivation	237
M. Eskandari, A. Zeinadini, M.N. Navidi, A. Salmanpour	
Kinetics and Thermodynamics of Phosphorus Adsorption onto a Clay Soil Influenced by Various Environmental Parameters	251
B. Kamali, A. Sotoodehnia, A. Mahdavi Mazdeh	
Changes in Soil Magnetic Properties and Iron Oxides Following Land Use Change (Case Study: Mokhtar Plain, Kohgilouye Province)	267
H.R. Owliaie, E. Adhami, M. Najafi Ghiri	
Investigating the Efficiency of Visible-Near Infra-Red (NIR) Spectrometry to Estimate Selected Soil Properties in Semirom Area, Isfahan	283
F. Rahmati, S. Hojati, K. Rngzan, A Landi	
Field-Scale Agricultural Drought Monitoring Based on Microwave Imagery of Soil Moisture	301
M. Fashae, S.H. Sanaei-Nejad, M. Quchanian	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36

No. 2

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., Tabriz University
Taghvaeian, S.	Irrigation	Assoc. Prof., Oklahoma University

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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