

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 37 شماره 1 فروردین - اردیبهشت سال 1402

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولیزاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

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

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمائی، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدی، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

نشانی: دانشگاه فردوسی مشهد - دانشکده کشاورزی - ص.پ. 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 (شش شماره در سال) منتشر می‌شود.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مندرجات

- 3 ارزیابی تاثیر روش های مختلف بر آورد ET_0 در شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی و زیست توده گندم با مدل آکو آکراپ
هادی رمضانی اعتدالی - فاطمه صفری
- 17 تعیین حوضه آبرگیر و حریم حفاظتی چشمه چله خانه علیا (صوفیان)
عبدالرضا واعظی هیر - واحده آقایی - مهری تبرمایه
- 33 مقایسه کارایی گیاهان مختلف در حذف هیدروکربن های نفتی کل از خاک های مناطق نفت خیز
نقشینه یاری نیلاوره - علی بهشتی آل آقا - مهین کرمی - مرضیه صادقی
- 47 کاربرد مدل تصمیم گیری چندمعیاره در ارزیابی تناسب اراضی
سحر اخوان - احمد جلالیان - نورایر تومانیان - ناصر هنرجو
- 65 تاثیر کاربرد پسماند بستر کشت قارچ و کود سبز یونجه بر برخی شناسه های حاصلخیزی کیفیت خاک و عناصر مغذی در اسفناج
تهمینه قیطاسی رنجبر - محسن نائل
- 79 تاثیر استخراج سنگ آهن بر غلظت برخی از فلزات سنگین و پهنه بندی آلودگی خاک (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان،
خواف - ایران)
ریحانه خشتابه - مرتضی اکبری - آوا حیدری - علی اصغر نجف پور
- 97 اثر دوره های تر و خشک شدن بر برخی شاخص های فیزیکی بسترهای رشد بر پایه بیوجار و پشم سنگ
شاهرخ شاهمنصوری - محمد رضا مصدقی - حسین شریعتمداری
- 115 انتخاب پذیری و جذب پتاسیم توسط بنتونیت های اشباع شده با کلسیم، منیزیم و سدیم
شبنم جلیلیان - فرانک رنجبر
- 131 مقایسه روش های یادگیری ماشین در انتخاب پیش بینی کننده های مدل های گردش عمومی جو - اقیانوسی برای ریزمقیاس نمائی دمای
بیشینه (مطالعه موردی: بیر جند)
مهدی امیرآبادی زاده - مهدیه فروزان مهر - مصطفی یعقوب زاده - سعیده حسین آبادی
- 147 تحلیل سینوپتیکی - دینامیکی بارش سنگین منجر به سیل استان گلستان در ماه مارس 2019
فیروز عبدالعلی زاده - علی محمد خورشید دوست



Evaluation of the Influence of Different E_{To} Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model

H. Ramezani Etedali^{1*}, F. Safari²

Received: 22-05-2022

Revised: 21-12-2022

Accepted: 24-12-2022

Available Online: 24-12-2022

How to cite this article:

Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the Influence of Different E_{To} Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model. *Journal of Water and Soil* 37(1): 1-14. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171>

Introduction

Evaluation of plant models in agriculture has been done by many researchers. The purpose of this work is to determine the appropriate plant model for planning and predicting the response of crops in different regions. This action is made it possible to study the effect of various factors on the performance and efficiency of plant water consumption by spending less time and money. Since the most important agricultural product in Iran is wheat, so proper management of wheat fields has an important role in food security and sustainable agriculture in the country. The main source of food for the people in Iran is wheat and its products, and any action to increase the yield of wheat is necessary due to limited water and soil resources. Evapotranspiration is a complex and non-linear process and depends on various climatic factors such as temperature, humidity, wind speed, radiation, type and stage of plant growth. Therefore, in the present study, by using daily meteorological data of Urmia, Rasht, Qazvin, Mashhad and Yazd stations, the average daily evapotranspiration values based on the results of the FAO-Penman-Monteith method are modeled and the accuracy of the two methods temperature method (Hargreaves-Samani and Blaney-Criddle) and three radiation methods (Priestley-Taylor, Turc and Makkink) were compared with FAO-56 for wheat.

Materials and Methods

The present study was conducted to evaluate the accuracy and efficiency of the AquaCrop model in simulation of evapotranspiration and biomass, using different methods for estimation reference evapotranspiration in five stations (Urmia, Qazvin, Rasht, Yazd and Mashhad). Four different climates (arid, semi-arid, humid and semi-humid) were considered in Iran for wheat production. The equations used to estimate the reference evapotranspiration in this study are: Hargreaves-Samani (H.S), Blaney-Criddle (B.C), Priestley-Taylor (P.T), Turc (T) and Makkink (Mak). Then, the results were compared with the data of the mentioned stations for wheat by error statistical criteria including: explanation coefficient (R^2), normal root mean square error (NRMSE) and Nash-Sutcliffe index (N.S).

Results and Discussion

The value of the explanation coefficient (R^2) of simulation ET and biomass in the Blaney-Criddle method is close to one, which shows a good correlation between the data. The NRMSE and Nash-Sutcliffe values for both parameters and the five stations are in the range of 0-20 and close to one, respectively, which indicates the AquaCrop model's ability to simulate ET and biomass. On the other hand, the value of R^2 in the Hargreaves-Samani method for biomass close to one, NRMSE in the range of 0-10 and Nash-Sutcliffe index is more than 0.5, which indicates a good simulation. The NRMSE index in the evaluation of ET and biomass wheat is excellent for the Blaney-Criddle method and about Hargreaves-Samani for ET is poor and for the biomass is excellent.

The Turc method with NRMSE in the range of 0-30, explanation coefficient close to or equal to one and a

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

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

Nash-Sutcliffe index of one or close to one can be used to simulate ET and biomass at all five stations. Also, for biomass simulation, Priestley-Taylor and Makkink methods have acceptable statistical values in all five stations.

Based on the value of explanation coefficient (R^2) of estimation ET and biomass wheat for radiation methods, the correlation between the data in all three radiation methods is high. Percentage of NRMSE index of Makkink method for wheat in ET evaluation in Qazvin station is poor category and in Urmia and Rasht is good and in Mashhad and Yazd is moderate and about biomass in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd) is excellent category, the error percentage of Priestley-Taylor method for wheat in ET evaluation in Yazd station is good and the rest of the stations is poor, about biomass is excellent in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd). The error rate of Turc method for wheat in ET evaluation in Urmia, Rasht and Mashhad stations is good and in Qazvin and Yazd is poor and about biomass is excellent in all five stations (Qazvin, Rasht, Mashhad, Urmia and Yazd).

Conclusion

According to the results obtained using Blaney-Criddle method with R^2 value close to one, NRMSE in the range of 0-20% (excellent to good) and Nash-Sutcliffe index close to one and Turc method with R^2 value close to one, NRMSE in the range of 0-10% (excellent) and Nash-Sutcliffe index close to one was showed a good accuracy of AquaCrop model in simulation of evapotranspiration and biomass with these methods of estimation of evapotranspiration compared to other methods.

Keywords: AquaCrop, Blaney-Criddle, Plant model, Reference evapotranspiration, Turc

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۱۴-۱

ارزیابی تاثیر روش های مختلف برآورد ET_o در شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی و زیست توده گندم با مدل آکواکراپ

هادی رمضانی اعتدالی^{۱*} - فاطمه صفری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

ارزیابی مدل های گیاهی در بخش کشاورزی توسط بسیاری از پژوهشگران انجام شده است. تعیین مدل گیاهی مناسب برای برنامه ریزی و پیش بینی واکنش گیاهان زراعی در مناطق مختلف ضروری است. این عمل سبب می شود با صرف هزینه و وقت کمتر بتوان اثر عوامل مختلف را بر عملکرد و کارایی مصرف آب گیاهان بررسی کرد. با توجه به اینکه معادله FAO-56 بعنوان روش مرجع برای برآورد ET در مدل AquaCrop استفاده می شود و به دلیل تعداد ورودی زیاد استفاده از آن دشوار است. روش های دیگری همچون روش های دمایی و تشعشعی وجود دارد که با حداقل داده ورودی می توان ET را با همان میزان دقت برآورد کرد. با توجه به اهمیت این موضوع، تحقیق حاضر به منظور بررسی دقت و کارایی مدل AquaCrop در شبیه سازی تبخیر و تعرق و زیست توده، تحت تاثیر روش های مختلف دمایی (بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی) و تشعشعی (پریستلی-تیلور، مک کینک و تورک) برآورد تبخیر و تعرق مرجع در پنج ایستگاه (ارومیه، قزوین، رشت، یزد و مشهد) و چهار اقلیم (خشک، نیمه خشک، مرطوب و نیمه مرطوب) مختلف در ایران و برای گیاه گندم انجام شد. طبق نتایج، روش بلانی-کریدل با مقدار R^2 بیشتر از ۰/۵، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS نزدیک به یک (۰/۹۹) و روش تورک با مقدار R^2 بیشتر از ۰/۵، NRMSE در محدوده ۵۰-۱۰ درصد و شاخص NS برابر با ۰/۹ روش های مناسب برای شبیه سازی تبخیر و تعرق در تمام ایستگاه ها بودند. در مورد شبیه سازی زیست توده، روش های بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی با مقادیر R^2 برابر با ۰/۹، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS برابر با ۰/۹۹ بعنوان روش های دمایی مناسب و روش های پریستلی-تیلور، مک کینک و تورک با آماره های R^2 برابر با ۰/۹، NRMSE در محدوده ۱۰-۰ درصد (عالی) و شاخص NS برابر با ۰/۹۹ بعنوان روش های تشعشعی مناسب انتخاب شدند. در این پژوهش دقت خوب مدل AquaCrop در شبیه سازی تبخیر و تعرق و زیست توده با این روش های برآورد تبخیر و تعرق نسبت به سایر روش ها نشان داده شد.

واژه های کلیدی: بلانی-کریدل، تبخیر و تعرق مرجع، تورک، مدل گیاهی، AquaCrop

مقدمه

زیرزمینی می شود. ضمن آن که تخمین کمتر از حد مورد نیاز گیاه نیز باعث اعمال تنش رطوبتی کنترل شده به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه خواهد داشت. با توجه به اهمیت تبخیر و تعرق و کاربردهای متنوع آن در علوم مختلف، محاسبه مقدار آن به ویژه تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی از اهمیت بالایی برخوردار است. تبخیر و تعرق در کل جهان حدود ۶۰ درصد از بارندگی زمین را به

تبخیر و تعرق از عمده ترین اجزاء چرخه هیدرولوژیکی است که تخمین درست آن در طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری، مطالعات منابع آب و موارد مشابه دیگر از اهمیت زیادی برخوردار است. تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه ضمن هدر دادن آب آبیاری باعث ماندابی شدن اراضی، شستشوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع آب

۱ و ۲- به ترتیب دانشیار و دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: Ramezani@eng.ikiu.ac.ir)

دلیل مدیریت صحیح مزارع گندم، نقش مهمی در امنیت غذایی و کشاورزی پایدار در کشور دارد. منبع اصلی غذای مردم در ایران، گندم و فرآورده‌های آن است و هر اقدامی برای بالابردن عملکرد محصول گندم با توجه به منابع محدود آب و خاک ضروری است (Ahmadi et al., 2017). مدل‌های گیاهی در جهت بهینه سازی عوامل مدیریتی، اجازه شبیه سازی محصول را می‌دهند و قابلیت کارکرد سناریوهای مختلف را دارند. یکی از مدل‌های گیاهی پرکاربرد، مدل آکواکراپ است که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، محصولات روغنی و غده‌ای می‌تواند به کار گرفته شود (Vanuytrecht, 2014). مدل آکوکراپ در تحقیقات مختلفی در مناطق مختلف، در شبیه سازی محصول گندم به کار رفته است.

اقبال و همکاران (Iqbal et al., 2014) مدل آکوکراپ نسخه ۳/۱ را برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین واسنجی و صحت سنجی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، عملکرد زیست‌توده در شرایط مختلف کم آبیاری با دقت مناسبی توسط مدل برآورد می‌شود. همچنین این مدل توسط مابهودی و همکاران (Mabhaudhi et al., 2014) در منطقه نیمه‌خشک آفریقای جنوبی برای یکی از گیاهان گرمسیری آن بنام تارو مورد ارزیابی قرار گرفت و زیست‌توده با ضریب تعیین ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۱/۲۴ تن در هکتار برآورد شد. مدل آکوکراپ برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل در منطقه کرج برای پیش‌بینی عملکرد گندم و سویا در شرایط کم آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (Alizadeh et al., 2010; Babazadeh and Sarai Tabrizi, 2012).

زندپارسا و همکاران (Zand-Parsa et al., 2016)، در پژوهشی مقادیر رطوبت خاک در عمق‌های مختلف، ماده خشک و عملکرد دانه گندم زمستانه در پنج تیمار آبیاری دیم، ۰/۵، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ برابر آبیاری کامل را طی دو سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰ واقع در اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز توسط مدل‌های آکوکراپ و WSM^۱ شبیه سازی کردند. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول زراعی برای واسنجی مدل‌ها و در سال دوم برای اعتبار سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. صحت برآورد رطوبت خاک توسط مدل‌ها، مبنای مقایسه دقت برآورد مقادیر شبیه سازی شده تبخیر و تعرق واقعی گیاه قرار گرفت. براساس نتایج، در مدل WSM، مقدار رطوبت خاک در لایه‌های مختلف عمق ریشه در سال اعتبار سنجی با مقدار نرمال شده ریشه میانگین مربع خطا (NRMSE) برابر ۰/۱۴ خوب برآورد شده است ولی مدل آکوکراپ در برآورد آن دقت کمتری داشت (NRMSE=0.26). مقادیر برآورد تبخیر و تعرق گیاهی در تیمار آبیاری

جو برمی‌گرداند (Oki and Kanae, 2006). بطور کلی معادلات محاسبه تبخیر و تعرق براساس تابش خالص خورشید (R_n)، حداقل و حداکثر دما، سرعت باد و رطوبت نسبی هستند (Allen et al., 1998). هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی ورودی موجب تغییر در ET می‌شوند (Vicente-Serrano et al., 2014). Wu و همکاران (Wu et al., 2019) تغییرات مکانی و زمانی در نیاز آب آبیاری گندم را با استفاده از بارش موثر و تبخیر و تعرق محصول مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها نیاز آب آبیاری را محاسبه کرده و دریافتند که با نیاز آبی محصول متفاوت است و به شدت به در دسترس بودن داده‌های هواشناسی بستگی دارد. در زمینه محاسبه تبخیر و تعرق و تأثیری که روش‌های مختلف محاسبه آن بر عملکرد، زیست‌توده و نیاز خالص آبیاری محصول دارد، مطالعات زیادی در سطح جهان و ایران انجام گرفته است. براساس نتایج پژوهشی که صفری و همکاران (Safari et al., 2021) به منظور واسنجی و اصلاح ضرایب معادلات برآورد تبخیر و تعرق بر روی چهار ایستگاه سینوپتیک ایران با اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب انجام دادند، روش بلانی-کریدل بعنوان روش برتر برای محاسبه ET در هر چهار اقلیم انتخاب شد. در پژوهشی دیگر، سه روش (بلانی-کریدل، تورنت وایت و هارگریوز-سامانی) برای برآورد ET پتانسیل در شهرستان امیدیه مورد مقایسه قرار گرفتند که براساس نتایج روش بلانی-کریدل نسبت به سایر روش‌ها با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین میزان خطای استاندارد با روش FAO-56 از دقت بیشتری برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل برخوردار بود (Asareh and Davoudi, 2014). نتایج حاصل از مطالعه‌ای که در ایستگاه سینوپتیک زاهدان انجام شد نشان داد روش‌های بر پایه انتقال جرم از نظر آماری ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 نشان دادند؛ اما مدل‌های دمایی و تشعشعی مانند مدل تورک، جنسن-هیز، هارگریوز و بلانی-کریدل می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتاً پیچیده FAO-56، برای اقلیم گرم و خشک شهرستان زاهدان باشند (Kahkhamoghadam, 2017). در پژوهشی که در ترکیه انجام شد، روش هارگریوز-سامانی برای این منطقه اصلاح شد. آنها میزان تبخیر و تعرق را برای ۲۷۵ ایستگاه هواشناسی و هفت منطقه جغرافیایی با استفاده از روش‌های FAO-56 و هارگریوز-سامانی به دست آوردند، سپس ضرایب معادله هارگریوز-سامانی را واسنجی و معادله واسنجی شده سرعت باد را به عنوان یک پارامتر ورودی اضافه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده تخمین خوبی نسبت به داده‌های واقعی لایسیمتر دارد (Cobaner et al., 2017).

مهمترین محصول کشاورزی در ایران گندم است و به همین

پیچیده و غیرخطی است و به عوامل متعدد اقلیمی نظیر دما، رطوبت، سرعت باد، تابش، نوع و مرحله رشد گیاه و غیره وابسته است (Sayyadi et al., 2009). بنابراین، در تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه مربوط به ایستگاه‌های ارومیه، رشت، قزوین، مشهد و یزد، مقادیر تبخیر و تعرق متوسط روزانه بر اساس نتایج حاصل از روش فائو-پنمن-مانتیت مدل‌سازی و دقت دو روش دمایی (هارگریوز-سامانی و بلانی-کریدل) و سه روش تشعشعی (پریستلی-تیلور، تورک و مک‌کینک) با FAO-56 برای گندم مقایسه شد. بنابراین می‌توان نوآوری این تحقیق را ارزیابی این مدل در برآورد زیست توده و تبخیر و تعرق واقعی را با استفاده از سایر روش‌های برآورد تبخیر و تعرق که گاه متغیرهای اقلیمی کمتری نیاز دارند در مقابل روش پایه FAO-56 که در مدل بعنوان روش اصلی و پایه شناخته می‌شود بیان کرد.

مواد و روش‌ها

مناطق مورد مطالعه

ایران با وسعتی حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه ۲۴۱ میلی‌متر در نیمکره شمالی، در قاره آسیا و در قسمت غربی فلات ایران واقع شده است (Ghaffari et al., 2004). این کشور بین دو نصف‌النهار ۴۴° و ۶۴° شرقی و دو مدار ۲۵° و ۴۰° شمالی قرار گرفته است. حدود ۹۴/۸ درصد از سطح آن، در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک با ریزش‌های جوی کم و تبخیر و تعرق زیاد قرار دارد (Ghaffari et al., 2004). برای انجام این پژوهش، ایران را براساس اقلیم نمای کوپن به ۴ اقلیم مختلف (خشک، مرطوب، نیمه‌خشک و نیمه مرطوب) دسته‌بندی و به ترتیب شهرهای یزد، رشت، مشهد، قزوین و ارومیه بعنوان نماینده این اقلیم‌ها انتخاب (شکل ۱) و آمار هواشناسی آنها مورد استفاده قرار گرفت (<https://cgie.org.ir/fa/news/156320>). خصوصیات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

کامل، در هر دو مدل نزدیک به هم ولی با افزایش تنش رطوبتی، از دقت برآورد مدل اکواکراپ کاسته شد. مدل WSM مقدار ماده خشک و عملکرد دانه را با NRMSE به ترتیب برابر ۰/۱۵ و ۰/۱۸ خوب برآورد کرده است و مدل اکواکراپ با NRMSE به ترتیب برابر ۰/۱۹ و ۰/۳۹ در برآورد آنها دقت کمتری داشت.

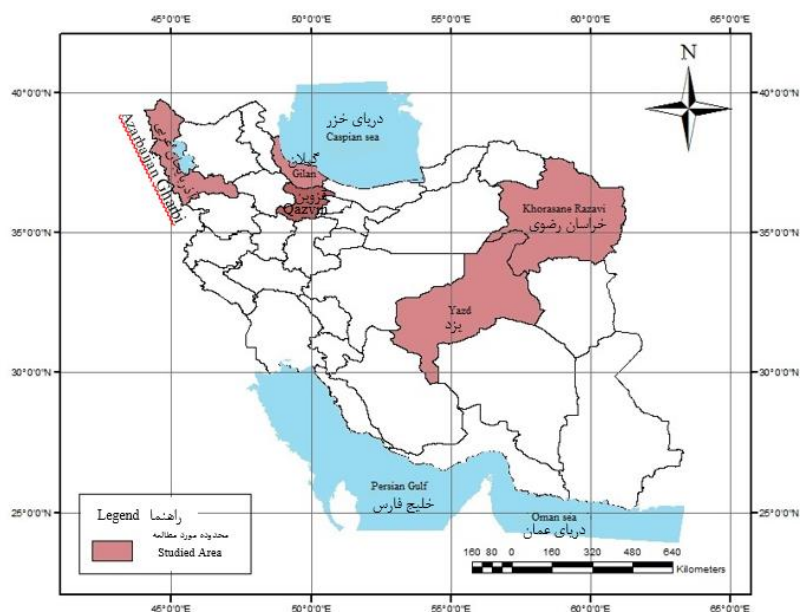
امیری و همکاران (Amiri et al., 2015) توانایی مدل اکواکراپ را برای پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده کل گندم زمستانه تحت تنش آبی، به مدت دو سال بر روی کردند. نتایج نشان داد مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه و زیست‌توده محصول دارای دقت قابل قبولی است. عبدالله‌زاده و همکاران (Abdollahzadeh et al., 2019) میزان تبخیر و تعرق واقعی و نیاز خالص آبیاری محصولات گندم، جو و ذرت دانه‌ای را در دشت مغان با استفاده از مدل اکواکراپ تعیین و نتایج را با مدل کراپ وات و نت وات مقایسه کردند. براساس نتایج، تبخیر و تعرق و نیاز آبی حاصل از مدل اکواکراپ در مقایسه با کراپ وات کمتر و نتایج در مقایسه با نت وات برای گندم و ذرت دانه‌ای مقادیر بیشتر و برای جو کمتر برآورد شده است. در پژوهشی که جرع‌نوش و همکاران (Jorenush et al., 2019) برای شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس توسط اکواکراپ انجام دادند، نتایج نشان داد که مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی پوشش تاجی، زیست‌توده و عملکرد دانه گندم دارد. نتایج مطالعه‌ای در دهلی هندوستان نشان داد که مدل اکواکراپ، دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست‌توده و کارایی مصرف آب در ارقام مقاوم و غیرمقاوم به شوری گندم دارد. در این تحقیق مشخص شد که توانایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد بیش از دو پارامتر دیگر است (Kumar et al., 2014).

پژوهشگران بسیاری در سراسر دنیا روش فائو-پنمن-مانتیت را در مقایسه با لایسمتر به عنوان روشی دقیق، معتبر و استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع معرفی کرده‌اند که در این پژوهش نیز به عنوان روش مبنا مورد استفاده قرار گرفته است (Kumar et al., 1998; Naderi and Alizadeh, 2002).

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Table 1- Details of meteorological stations studied

ایستگاه	اقلیم	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
Station	Climate	Longitude	Latitude	Elevation (m)
ارومیه	نیمه مرطوب	45° 3'	37° 40'	1328
Urmia	Semi-humid			
رشت	مرطوب	49° 37'	37° 19'	-8.6
Rasht	Humid			
مشهد	نیمه خشک	59° 38'	36° 16'	999.2
Mashhad	Semi-arid			
قزوین	نیمه خشک	50° 0'	36° 16'	1279.1
Qazvin	Semi-arid			
یزد	خشک	54° 17'	31° 54'	1237.2
Yazd	Arid			



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محدوده‌های مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location and studied areas

جدول ۲- معادلات مورد استفاده در پژوهش

Table 2- Equations used in research

شماره ردیف Number	نام معادله Name of Eq.s	فرم معادله Equation form	منابع References
1	FAO-56	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{890}{T + 273} \right) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$	FAO-56 (1998)
2	Hargreaves-Samani	$ET_o = 0.0023 R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} (T_{mean} + 17.8)$	Hargreaves and Samani (1985)
3	Blaney-Criddle	$ET_o = a + b(P(0.46 T_{mean} + 8.13))$	Blaney and Criddle (1950)
4	Priestley-Taylor	$ET_o = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda} \right)$	Priestley and Taylor (1972)
5	Makkink	$ET = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta - \gamma} \right) \left(\frac{R_s}{2.45} \right) - 0.12$	Makkink (1957)
6	Turc	$ET = 0.013 \frac{(23.89 R_s + 50) T_{avg}}{(T_{avg} + 15)}$	Turc (1961)

۲۰۲۰/۱۲/۳۱ جمع‌آوری و تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش‌های

مذکور در جدول بالا محاسبه شد.

به دلیل ناکافی بودن داده‌های لایسیمیتری، از روش فائو-پنمن-مانتیت (FAO-56) با توجه به اینکه دارای دقت بالا در برآورد تبخیر و تعرق مرجع است، از برآوردهای این روش بعنوان داده مشاهده‌ای و مرجع برای صحت‌سنجی استفاده شد.

معرفی مدل آکوآکراپ

اساس تخمین عملکرد محصول در مدل آکوآکراپ رابطه Kassam و Doorenbos است که در شماره ۳۳ نشریه آبیاری و زهکشی سازمان خواربار جهانی (فائو) ارائه شده است. با اعمال

روش پژوهش

معادلات مورد استفاده برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در این پژوهش از دو گروه دمایی شامل: هارگریوز-سامانی (H.S) و بلانی-کریدل (B.C) و گروه تشعشعی شامل: پریستلی-تیلور (P.T)، تورک (T) و مک‌کینک (Mak) انتخاب شدند. فرم اصلی معادلات در جدول ۲ ارائه شده است.

داده‌های تبخیر و تعرق مرجع بعنوان ورودی‌های مدل برای اجرای مدل آکوآکراپ مورد نیاز است. به همین منظور، متغیرهای هواشناسی شامل حداکثر و حداقل دمای هوا، حداکثر و حداقل رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری سطح زمین از ایستگاه‌های ارومیه، رشت، قزوین، مشهد و یزد از تاریخ ۱۹۸۰/۱/۱ تا

روش‌های ذکر شده در جدول ۲ محاسبه شد.

شاخص‌های آماری

در این تحقیق نتایج حاصل از سناریوها با داده ایستگاه‌های مذکور برای گندم توسط معیارهای آماری خطا شامل آماره‌های ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و شاخص نش-ساتکلیف (N.S)، مقایسه شدند. ضریب تبیین یکی از مهم‌ترین معیارهای ارزیابی ارتباط میان دو متغیر x و y است که به صورت بی بعد نمایش داده می‌شود. این ضریب ارتباط مستقیمی با ضریب همبستگی دارد. به این ترتیب که با جذر گرفتن از ضریب تبیین می‌توان ضریب همبستگی میان دو سری مورد بررسی را به دست آورد. همانند ضریب همبستگی هر چه مقدار ضریب تبیین به یک نزدیک‌تر باشد، ارتباط قوی‌تری میان دو متغیر وجود دارد. در صورت ضرب ضریب تبیین در عدد ۱۰۰ مقدار به دست آمده بیان‌گر درصد واریانس تغییرات متغیر x است که با متغیر y توصیف می‌شود. طبقه بندی ضریب پیرسون در جدول ۳ آورده شده است (Junior et al., 2017). رابطه ضریب تبیین به شرح زیر است:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - \bar{O})^2} \quad (4)$$

که Pi : مقادیر پیش‌بینی شده، Oi : مقادیر اندازه‌گیری شده و $\bar{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد (Bannayan and Hoogenboom., 2009). برای محاسبه ضریب تبیین از نرم‌افزار اکسل استفاده شد.

شاخص NRMSE سطح تخمین را نشان می‌دهد. تقسیم‌بندی NRMSE توسط جیمسون و همکاران (Jamieson et al., 1991) در جدول ۴ آورده شده است.

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Oi - Pi)^2}{n}} \quad (5)$$

اصلاحاتی در آن از جمله تفکیک تبخیر و تعرق واقعی (ET) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_s)، و نیز عملکرد به بیوماس (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است (Raes et al., 2012):

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (1)$$

که در آن Y_x : حداکثر عملکرد، Y : عملکرد واقعی، ET_x : حداکثر تبخیر و تعرق، ET : تبخیر و تعرق واقعی و K_y فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. با پیشرفت‌های علمی و تجربی در روابط گیاه-آب از سال ۱۹۷۹، همراه با نیاز مبرم به بهبود بهره‌وری آب، فائو، نشریه ۳۳ خود را اصلاح و تکمیل نموده و بصورت مدل آکواکراپ ارائه داد. برای محاسبه عملکرد از زیست‌توده، مدل آکواکراپ از رابطه ۲ استفاده می‌کند (Raes et al., 2012):

$$Y = f_{HI} \times HI_0 \times B \quad (2)$$

که در آن HI_0 : شاخص برداشت مرجع (طی مرحله بلوغ فیزیولوژیک)، Y : عملکرد دانه، f_{HI} : ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند. مقدار زیست‌توده تولیدی بصورت روزانه در مدل آکواکراپ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$B = WP^* \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{0i}} \quad (3)$$

که WP^* : بهره‌وری آب مصرفی گیاه، Tr : تعرق روزانه و ET_0 : تبخیر و تعرق مرجع روزانه می‌باشند (Raes et al., 2022). مهمترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارتند از: حداقل، حداکثر و میانگین دمای روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) و بارندگی. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد به منظور تعدیل عملکرد زیست‌توده بر اثر خسارات ناشی از سرما، استفاده می‌کند. داده‌های دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه و همه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ET_0 از اطلاعات آماری سالهای ۲۰۲۰-۱۹۸۰ ایستگاه‌های قزوین، رشت، ارومیه، مشهد و یزد استفاده و ET_0 با

جدول ۳- تقسیم‌بندی نتایج شبیه‌سازی ضریب پیرسون

R^2	0.1>	0.1-0.2	0.2-0.5	0.5<
نتایج شبیه‌سازی	همبستگی ندارد	ضعیف	متوسط	قوی
Estimation result	Not correlated	Weak	Moderate	Strong

جدول ۴- تقسیم‌بندی نتایج شبیه‌سازی بر اساس NRMSE

NRMSE	0-10	10-20	20-30	>30
نتیجه تخمین	عالی	خوب	متوسط	ضعیف
Estimation result	Excellent	Good	Moderate	Weak

ضریب نش-ساتکلیف (NS) یکی از رایج‌ترین شاخص‌هایی است که برای ارزیابی کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Nash and Sutcliffe, 1970). این شاخص حالتی استاندارد از تابع حداقل مربعات خطاهاست:

$$NS = 1 - \frac{\sum_1^N (ET(\text{Sim}) - ET(\text{Obs}))^2}{\sum_1^N (ET(\text{Obs}) - \overline{ET(\text{Obs})})^2} \quad (6)$$

دامنه تغییرات این شاخص از $-\infty$ تا $+1$ بوده و مقدار بهینه این شاخص یک است. براساس پژوهش‌های مختلف صورت گرفته در این زمینه از جمله مطالعات گاسمن و همکاران (Gassman et al., 2007) اگر مقدار ضریب نش-ساتکلیف بالاتر از $0/5$ باشد مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است.

نتایج و بحث

جداول ۵ و ۶ نتایج مربوط به ارزیابی آماری ET و زیست‌توده را برای هر ۵ ایستگاه هواشناسی در سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ برای گندم به تفکیک روش‌های برآورد ET_0 ارائه می‌دهد.

براساس **جدول ۵**، مقدار ضریب تبیین (R^2) برای شبیه‌سازی ET و زیست‌توده در روش بلانی-کریدل نزدیک به یک بوده که همبستگی مناسبی را بین داده‌ها نشان می‌دهد. مقدار NRMSE و NS نیز در مورد هر دو پارامتر و پنج ایستگاه به ترتیب در محدوده $0-20$ و نزدیک به یک است که نشان دهنده توانا بودن مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی ET و زیست‌توده می‌باشد. از طرفی مقدار R^2 در روش هارگریوز-سامانی برای زیست‌توده نزدیک به یک، NRMSE در محدوده $0-10$ و شاخص NS بیش از $0/5$ بوده که نشان‌دهنده شبیه‌سازی خوب است (**جدول ۵**). پا شاخواه و همکاران (Pashakhah et al., 2014) به بررسی تبخیر و تعرق مرجع با روش های بلانی-کریدل، هارگریوز و ترنت وایت برای اقلیم‌های مختلف ایران براساس اقلیم‌نمای یونسکو در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 پرداختند، نتایج آن‌ها نشان داد روش بلانی-کریدل در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک و مرطوب بهترین برآورد را داراست. نتایج این مطالعه بیان کرد در شرایطی که در اقلیم‌های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های مورد نیاز، برآورد تبخیر و تعرق مرجع از روش FAO-56 ممکن نباشد، با بهره‌گیری از معادلات واسنجی شده می‌توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش FAO-56 دست یافت. همچنین روشن و همکاران (Roshan et al., 2012) در مطالعات خود در زمینه‌ی ارزیابی مدل مناسب تبخیر و تعرق پتانسیل در ایران، از چهار روش تورنت وایت، جنسن-هیز، بلانی-کریدل و هارگریوز-

سامانی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل همخوانی بهتری با شرایط ایران دارد.

طبق جدول نتایج گندم (**جدول ۶**)، روش تورک با NRMSE در محدوده $30-40$ ، ضریب تبیین نزدیک یا برابر با یک و شاخص NS یک یا نزدیک به یک برای شبیه‌سازی ET و زیست‌توده در هر پنج ایستگاه قابل استفاده است. همچنین برای شبیه‌سازی زیست‌توده هر سه روش در هر پنج ایستگاه دارای مقادیر آماری قابل قبول است (**جدول ۶**). طی پژوهشی که توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 2013) در استان خراسان شمالی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک انجام دادند، میزان تبخیر و تعرق را با روش‌های هارگریوز-سامانی، تورک، پریستلی-تیلور، مک‌کینک و تشت تبخیر کلاس A در شرایط کمبود داده، به همراه روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت برای ارزیابی روش‌های مطرح شده (به دلیل عدم وجود داده‌های لایه سیمتری) مقایسه کردند. براساس ارزیابی آن‌ها، این معادلات دقت قابل قبولی در مقایسه با مطالعات انجام شده دارند که با نتایج پژوهش حاضر برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تطابق (قزوین، یزد و مشهد) دارد.

محققان با استفاده از ۷ روش، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل را در چهار منطقه اقلیمی متفاوت (خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب) هند تعیین کرده و نتایج حاصل را با روش FAO-56 مقایسه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در میان روش‌های مورد مطالعه، روش هارگریوز در دوره‌های زمانی روزانه و ماهانه نتایج نزدیک به روش FAO-56 ارائه می‌کند و در همه اقلیم‌ها به استثنای اقلیم مرطوب روش تورک (روش تشعشی) مناسب‌تر است. نتایج حاصل از تحلیل عاملی نشان می‌دهد که سرعت باد مهم‌ترین عامل در مناطق خشک و ساعات آفتابی مهم‌ترین عامل در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب است (Nandagiri and Koovor, 2005). در این پژوهش نیز برای اقلیم مرطوب (ایستگاه رشت) روش تورک اولویت دارد.

شکل ۲ و ۳ مقایسه مقادیر زیست‌توده و تبخیر و تعرق واقعی شبیه‌سازی شده گندم در روش‌های مختلف برآورد ET_0 با استفاده از مدل آکواکراپ در ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند. با توجه به نمودارها اختلاف زیاد بین مقادیر شبیه‌سازی در روش‌های مختلف با روش پایه FAO-56 وجود ندارد. همچنین براساس آماره ضریب تبیین، همبستگی بین داده‌ها در تمامی روش‌ها اعم از دمایی و تشعشی برای گندم وجود دارد.

جدول ۵- ارزیابی آماری معادلات دمایی در گیاه گندم

Table 5- Results of statistical evaluation of temperature equations for wheat

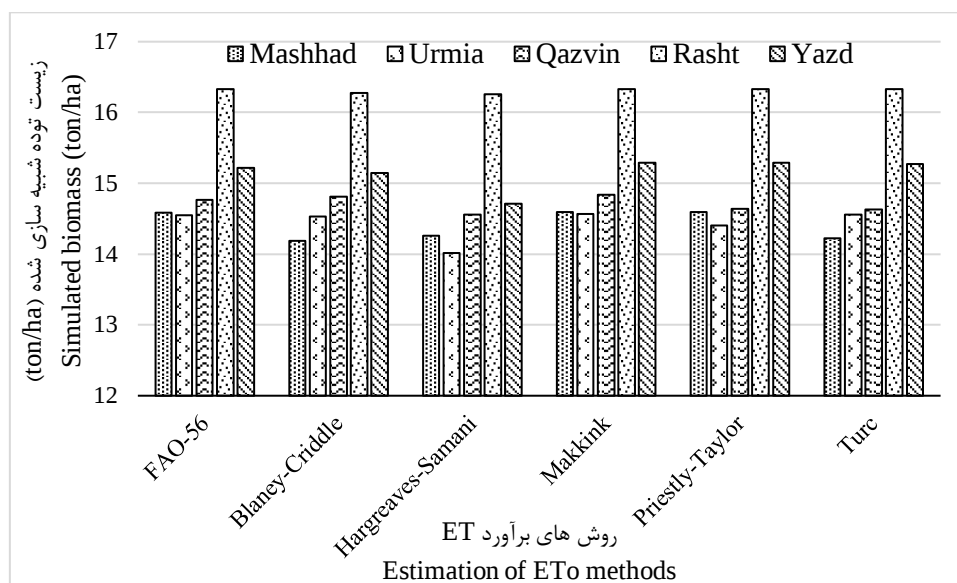
معادله Equation	ایستگاه Station	اقلیم Climate	NRMSE	نش-ساتکلیف Nash-Sutcliffe	R ²	معادله رگرسیونی Regression equation
(mm) ET						
H.S	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	144.239	0.642	0.338	y= 0.31x+138.17
	رشت Rasht	مرطوب Humid	210.269	0.531	0.518	y= 0.27 x+39.51
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	162.564	0.606	0.224	y= 0.21 x+195.45
	یزد Yazd	خشک Arid	118.008	0.697	0.021	y= 0.09 x+363.28
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	92.13	0.762	0.125	y= 0.25 x+349.48
B.C	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	5.126	0.997	0.837	y= 0.83 x+74.17
	رشت Rasht	مرطوب Humid	7.201	0.994	0.887	y= 0.75 x+67.12
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	7.768	0.994	0.829	y= 0.86 x+36.02
	یزد Yazd	خشک Arid	7.859	0.994	0.81	y= 1.12 x-83.002
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	16.707	0.961	0.876	y= 0.75 x+247.93
(ton/ha) Biomass						
H.S	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	4.134	0.998	0.929	y= 0.93 x+1.54
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.749	0.999	0.995	y= 1.01 x-0.13
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	2.304	0.999	0.993	y= 0.99 x+0.37
	یزد Yazd	خشک Arid	3.39	0.998	0.992	y= 0.97 x+0.86
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	1.709	0.999	0.983	y= 0.95 x+0.96
B.C	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	0.303	0.999	0.998	y= 1.001 x+0.02
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.519	0.999	0.998	y= 0.97 x+0.51
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	3.083	0.998	0.966	y= 0.97 x+0.83
	یزد Yazd	خشک Arid	0.523	0.999	0.997	y= 0.99x+0.07
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	0.455	0.999	0.998	y= 0.99 x+0.03

جدول ۶- ارزیابی آماری معادلات تشعشعی در گیاه گندم

Table 6- Results of statistical evaluation of radiation equations for maize

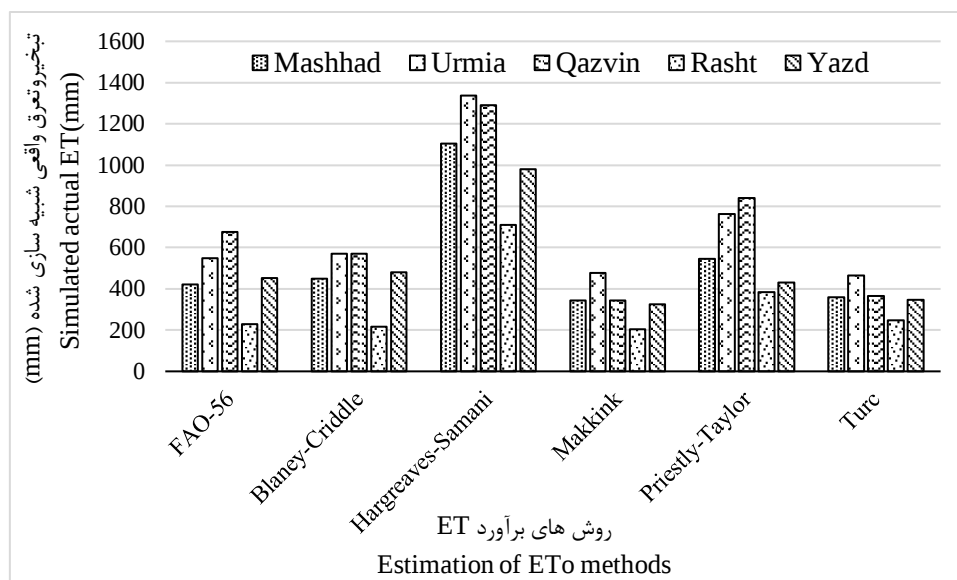
معادله Equation	ایستگاه Station	اقلیم Climate	NRMSE (mm) ET	نش-ساتکلیف Nash-Sutcliffe	R ²	معادله رگرسیونی Regression equation
P.T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	40.92	0.911	0.047	y= 0.15 x+431.75
	رشت Rasht	مرطوب Humid	68.83	0.83	0.346	y= 0.36 x+89.17
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	32.708	0.934	0.091	y= 0.22 x+299.3
	یزد Yazd	خشک Arid	13.274	0.98	0.014	y= 0.13 x+394.7
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	35.226	0.925	0.681	y= 0.28 x+440.04
T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	16.354	0.961	0.337	y= 0.85 x+152.84
	رشت Rasht	مرطوب Humid	10.208	0.991	0.664	y= 0.87 x+12.04
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	17.777	0.955	0.341	y= 0.84 x+118.43
	یزد Yazd	خشک Arid	24.339	0.897	0.548	y= 2.06 x-265.94
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	46.77	0.294	0.68	y= 0.68 x+428.31
MAK	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	14.63	0.971	0.247	y= 0.56 x+281.28
	رشت Rasht	مرطوب Humid	12.748	0.979	0.63	y= 0.82 x+60.66
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	20.821	0.933	0.335	y= 0.81 x+144.28
	یزد Yazd	خشک Arid	29.242	0.829	0.477	y= 1.79 x-129.13
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	50.156	0.098	0.688	y= 0.63 x+457.92
(ton/ha) Biomass						
P.T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	1.423	0.999	0.981	y= 0.94 x+1.01
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.073	0.999	0.999	y= 0.99 x+0.006
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	0.262	0.999	0.999	y= 0.98 x+0.26
	یزد Yazd	خشک Arid	0.726	0.999	0.994	y= 0.95 x+0.56
	قزوین Qazvin	نیمه خشک Semi-arid	1.224	0.999	0.986	y= 1.04 x-0.51
T	ارومیه Urmia	نیمه مرطوب Semi-humid	0.237	0.999	0.998	y= 1.01 x-0.15
	رشت Rasht	مرطوب Humid	0.076	0.999	0.999	y= 0.99 x+0.008
	مشهد Mashhad	نیمه خشک Semi-arid	2.883	0.999	0.966	y= 0.94 x+1.21
	یزد Yazd	خشک Arid	0.512	0.999	0.997	y= 0.98 x+0.26

MAK	قزوین	نیمه خشک	1.701	0.999	0.965	$y = 1.07x - 0.90$
	Qazvin	Semi-arid				
	ارومیه	نیمه مرطوب	0.207	0.999	0.999	$y = 0.99x - 0.02$
	Urmia	Semi-humid				
	رشت	مرطوب	0.071	0.999	0.999	$y = 0.99x + 0.02$
	Rasht	Humid				
MAK	مشهد	نیمه خشک	0.199	0.999	0.999	$y = 0.98x + 0.18$
	Mashhad	Semi-arid				
	یزد	خشک	0.629	0.999	0.996	$y = 0.97x + 0.29$
	Yazd	Arid				
MAK	قزوین	نیمه خشک	0.667	0.999	0.996	$y = 0.98x + 0.09$
	Qazvin	Semi-arid				



شکل ۲- مقایسه مقدار زیست توده شبیه سازی شده گندم با روش‌های مختلف برآورد ET_o

Figure 2- Comparison of simulated biomass of wheat with different estimation of ET_o methods



شکل ۳- مقایسه مقدار تبخیر و تعرق واقعی شبیه سازی شده گندم با روش‌های مختلف برآورد ET_o

Figure 3- Comparison of the actual simulated evapotranspiration of wheat with different estimation of ET_o methods

نتیجه گیری

محدوده (۰-۲۰) و R^2 و NS نزدیک به یک برای شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی و استفاده از هر دو روش بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی برای زیست توده قابل قبول است. همچنین در مورد روش های تشعشعی، روش تورک برای شبیه سازی تبخیر و تعرق واقعی و تمامی روش های تشعشعی مورد بررسی برای شبیه سازی زیست توده مطلوب اند. پس با توجه به پهناور بودن کشور ایران و اقلیم های متفاوت آن، پیشنهاد می شود تبخیر و تعرق در همه اقلیم ها و شهرها با روش های ارائه شده و یا سایر روش های اندازه گیری تبخیر و تعرق محاسبه شود و روش های برتر در هر اقلیم مشخص و برای کارهای تحقیقاتی معرفی گردند.

ارزیابی مدل AquaCrop برای گیاهان رایج در یک منطقه نقش مهمی در مقایسه عملکرد محصول در شرایط مختلف دارد. گندم یکی از محصولات استراتژیک در کشور است. از طرفی، با توجه به اهمیت دقت در برآورد تبخیر و تعرق مرجع و استفاده از آن برای شبیه سازی میزان عملکرد و زیست توده با نرم افزار AquaCrop، دقت داده ها در برابر داده های مشاهده ای بدست آمده برای هر پنج ایستگاه ارزیابی و طبق نتایج حاصله، از بین دو روش دمایی (بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی) برای گندم روش بلانی-کریدل با میزان NRMSE در

منابع

1. Abdollahzadeh, M., Ramezani etedali, H., Ababaei, B., & Nazari, B. (2019). Estimation of actual evapotranspiration and net irrigation water requirement for strategic agricultural crop in Moghan plain using AquaCrop model. *Nivar* 43(104-105): 113-122. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.30467/nivar.2019.141476.1101>.
2. Ahmadi, K., Gholizadeh, H., Ebadzadeh, H., Hosseinpour, R., Abdshah, H., Kazemian, A., & Rafiei, M. (2017). Agricultural statistics (crops). *Ministry of Agriculture* 1: 5-20. (In Persian)
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.
4. Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, H., Eetedali, H.R., & Janbaz, H.R. (2010). Evaluation of AquaCrop Model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 4(2): 273-283. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.267026.668022>.
5. Amiri, E., Bahrani, A., Khorsand, A., & Haghjoo, M. (2015). Evaluating Aquacrop model performance to predict grain yield and wheat biomass, under water stress. *Water and Soil Science (Agricultural Science)*, 25(4/2): 217-229. (In Persian with English abstract)
6. Asareh, A., & Davoudi, H. (2014). Evaluating the methods of estimating potential evapotranspiration in Omidiyeh Town. *Journal of Water Science and Engineering* 10(4): 63-74. (In Persian)
7. Babazadeh, H., & Sarai Tabrizi, M. (2012). Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Water and Soil* 26(2): 329-339. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14156>.
8. Bannayan, M., & Hoogenboom, G. (2009). Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research* 111: 290-302.
9. Blaney, H.F., & Criddle, W.D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data*. Washington Soil Conservation Service (SCS). (Vol. 96).
10. Cobaner, M., Citakoglu, H., Haktanir, T., & Kisi, O. (2017). Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference evapotranspiration in Turkey. *Hydrology Research* 48(2): 480-497. <https://doi.org/10.2166/nh.2016.217>.
11. FAO. (1998). *Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)*. Irrigation and Drainage Paper No.56.
12. Ghaffari, A., Ghasemi, V., & De Pauw, V. (2004). Agricultural climate zone classification with UNESCO method. *Drought and Drought* 12: 30-35.
13. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., & Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *Trans. ASABE* 50(4): 1211-1250.
14. Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2): 96-99.
15. Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A., & Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management* 135: 61-72.
16. Jamieson, P.D., Porter, J.R., & Wilson, D.R. (1991). A test of computer simulation model ARG-WHEAT1 on wheat crops in New Zealand. *Field Crops Research* 27: 337-350.
17. Joinior, W., Loireau, M., Fargette, M., Filho, B., & Wele, A. (2017). Correlation between soil erodibility and satellite

- data on areas of current desertification: a case study in Senegal. *Ci Trop Recife* 42(2): 51-66.
18. Jorenush, M., Boroomand nasab, S., Naseri, A., Pakparvar, M., & Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and plantig date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management* 9(1): 95-107. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/JWIM.2019.287266.701>.
19. Kahkhamoghadam, P. (2017). Evaluation of reference evapotranspiration models for warm arid climate (Case study: Zahedan station). *Journal of Water and Soil Conservation* 25(1): 309-317. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.11565.2603>.
20. Kumar, M., Raghuwanshi, N.S., Singh, R., Wallender, W.W., & Pruitt, W.O. (2002). Estimating evapotranspiration using artificial neural network. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 128(4): 224-233.
21. Kumar, P., Sarangi, A., Singh, DK., & Parihar, SS. (2014). Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage* 63: 474-487. <https://doi.org/10.1002/ird.1841>.
22. Mabhaudhi, T., Modi, A.T. and Beletse, Y.G. 2014. Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology* 192-193: 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.03.013>.
23. Makkink, G.F. (1957). Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers* 11(3): 277-288.
24. Naderi, N., & Alizadeh, A. (1998). *Determining reference crop evapotranspiration in Mashad and comparing with empirical methods*. MSc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad. 110 pp. (In Persian)
25. Nandagiri, L., & Kovoov, G.M. (2005). Sensitivity of the food and agriculture organization Penman-Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 131(3): 238-248.
26. Nash, J.E., & Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
27. Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science* 313(5790): 1068-1072.
28. Pashakhah, P., Pirmoradian, N., Khazdouz, N., & Moshfegh, M. (2014). Calibration and evaluation of three empirical methods for estimating reference evapotranspiration in deferent climates of Iran. *Nivar*. 38(87-86): 39-50. (In Persian with English abstract)
29. Priestley, C.H.B., & Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat Flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review* 100(2): 81-92.
30. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC., & Freres, E. (2012). *Refrence manual AquaCrop*, FAo, land and water division. rome Italy.
31. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, TC., & Freres, E. (2022). *Refrence manual AquaCrop*, FAo, land and water division. rome Italy.
32. Roshan, G., Khoshakhlagh, F., & Karampur, M. (2012). Assessing, modifying and synthesizing a suitable model for estimation of potential evapotranspiration in Iran. *Physical Geography Research Quarterly* 43(78): 49-68. (In Persian with English abstract)
33. Safari, F., Kaviani, A., Azizian Ghatar, A., & Ramezani Etedali, H. (2021). Modified the coefficients of Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Priestley-Taylor, Makkink and Turk equations to estimate the evapotranspiration of the reference plant. *Environment and Water Engineering*. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22034/jewe.2021.293310.1593>.
34. Sayyadi, H., Oladghaffari, A., Faalian, A., & Sadraddini, A. (2009). Comparison of RBF and MLP neural networks performance for estimation of reference crop evapotranspiration. *Water and Soil Science* 19(1): 1-12. (In Persian with English abstract)
35. Tavakoli, E., Ghahraman, B., Davari, K., & Ansari, H. (2013). Estimation of reference evapotranspiration with incomplete data (a case study: North Khorasan Province). *Journal of Water and Soil Science (JWSS)* 17(65): 211-221. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/20.1001.1.24763594.1392.17.65.12.4>.
36. Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climate formula evolved up to date. *Annales Agronomiques* 12: 13-49.
37. Vanuytrecht, E. (2014). AQUACROP: FAO crop water productivity yield response model. *Environmental Modelling and Software* 62: 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.08.005>.
38. Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., & Sanchez-Lorenzo, A. (2014). Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain (1961-2011). *Water Resources Research* 50(11): 8458-8480. <https://doi.org/10.1002/2014WR015427>.
39. Wu, D., Fang, S., & Li, X. (2019). Spatial-temporal variation in irrigation water requirement for the winter wheat summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain. *Agricultural Water Management* 214: 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.004>.
40. Zand-Parsa, S., Parvizi, S., Sepaskhah, A.R., & Mahbod, M. (2016). Evaluation of simulated soil water content, dry matter and grain yield of winter wheat (cv. Shiraz) using WSM and AquaCrop models. *Journal of Water and Soil*



Determination of the Catchment Area and the Capture Zone of Chelleh Khanehe Olya Spring (Soufiyan)

A. Vaezihir^{1*}, V. Aghaie², M. Tabarmayeh³

Received: 11-11-2022

Revised: 31-12-2022

Accepted: 17-01-2023

Available Online: 17-01-2023

How to cite this article:

Vaezihir, A., Aghaie, V., & Tabarmayeh, M. (2023). Determination of the Catchment Area and the Capture Zone of Chelleh Khanehe Olya Spring (Soufiyan). *Journal of Water and Soil* 37(1): 15-29. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79544.1225>

Introduction

Determining the capture zone of water resources is a strategic approach proposed at the national level of water resources management in Iran. One of the important actions for this purpose is protection of karst water resources, which are considered one of the vital sources for supplying water due to the widespread karst formations in this country and the limitation of groundwater resources in alluvial aquifers. Generally, water flows out through the springs in the karst system. The land area where the water contributes to the spring is called the spring's capture zone. The study and analysis of the recession curve of the springs, the area extending from a discharge peak to the base of the next rise, along with the other physical characteristics of springs such as electrical conductivity is a useful indicator for getting knowledge about the condition of the catchment area and other properties of the heterogeneous karst terrain. In estimating the water budget, unlike the non-karst areas where the surface runoff or the outflow is considered the main factor in the estimated water budget, the recharge component is an important factor in the karst domain. The difference between hydrogeological and hydrological (topographic) catchments is one of the obvious features in karst landscapes. The identification of these basins or their boundaries is possible by combining geology and topography information. Soufiyan Cement Company in the vicinity of Chelleh Khanehe Olya Spring located in Moro Mountain is associated with the creating social problems due to the expansion of mining activities and the negative impact on spring water in this area. Therefore, this study aims to determine the catchment area and the capture zone of the Chelleh Khanehe Olya Spring by determining the protective boundary for the extraction of limes by the Soufiyan cement factory to prevent the negative impact of this factory on the spring.

Materials and Methods

In this research, the hydrograph of the recession curve related to a rainfall event has been analyzed by taking into account the mean monthly discharge rate of spring to determine the sub-regimes of diffuse and conduit flow by employing the following equation:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

Where Q_t is the discharge rate at time t , Q_0 reveals the discharge at the initial time, and α is a recession coefficient.

In addition, The $Q_{\max}/Q_{\min}$ ratio has been calculated to estimate the flow type and the degree of karstification in the catchment area.

In the next step, to determine the Chelleh Khanehe Olya Spring catchment area and its capture zone, spring hydrogeological boundaries were determined and investigated using the SCS method and estimating the area's water budget. Due to the lack of sufficient rainfall and groundwater discharge information in this region, the water budget for a given period (2019-2020) has been computed indirectly by measuring the monthly discharge rate from the selected stations. After collecting the required data, the following equation developed by Milanovich (1989) has been used to estimate the water budget as follows:

1, 2 and 3- Professor, M.Sc Graduated and Ph.D, Department of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: r.vaezi@tabrizu.ac.ir)

$$P=E+R+I \quad (2)$$

Where P, E, R, and I denote precipitation (P), evaporation at the basin level (E), runoff (R), and recharge to the aquifers (I). All the parameters are in mm units.

Results and Discussion

Analyzing the variation of electrical conductivity along with the discharge rate indicates that by decreasing the discharge rate from 2.5 l/s to 8.1 l/s, the electrical conductivity increase from 463 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, reflecting an increase in the volume of the reservoir, the dilution of the aquifer. The hydrograph recession curve during 2019-2020 indicated two laminar and turbulent sub-regimes. Micro regimes α_1 (0.002) and α_2 (0.013) represented that the dominant system of karst development in the region is diffuse. The high density of fractures and the lack of purity of lime are the main reasons for the weak development of the karst fracture in the region, which the Chele khaneh Olya Spring recession curve analysis, maximum to minimum ratio of discharge, and karstification coefficient confirmed this issue. Determining the catchment basin using geological, hydrogeological information, and water budget showed that the hydrological and hydrogeological boundary of the Spring is different. The protected zone of Chele khaneh Olya Spring, which includes the total hydrogeological basin and the Cretaceous limestone area below the level of the Spring, was estimated to be about 184,000 square meters (18 hectares). According to the findings of this research, Soufiyan Cement Company does not have the right to enter the hydrogeological boundary to extract limes, and on the other hand, to prevent the water level from decreasing due to the excessive extraction of lime as a result of the excavation depth reaching the level of the water table, it suggests to extract from the unsaturated part of the aquifer (unsaturated limes) to prevent the flow rate of Chele Khana Spring from decreasing and even drying it up.

Conclusion

Analyzing the discharge rate, electrical conductivity, hydrograph recession curve, and its recession coefficient ($\alpha=0.002$), revealed that the dominant flow in the system is diffuse, which results from the high density of fractures and region lithology consisting of impure cretaceous limestone. Since the result revealed the inconsistency between hydrological and hydrogeological boundaries, the geological profile of the site was prepared and the spring of the catchment was estimated. Based on the findings of this research, the Chelle Khanehe Olya capture zone consists of the hydrogeological area, obtained from the groundwater budget estimation, and the protective boundary for the limestone below Cheleh Khaneh Olya Spring (the unsaturated zone of the area's limestones), which covers an area of about 18 hectares.

Keywords: Ardabil, Cave, Electrical conductivity, Karst, Karst Spring

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۱، فروردین- اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۲۹-۱۵

تعیین حوضه آبرگیر و حریم حفاظتی چشمه چله خانه علیا (صوفیان)

عبدالرضا واعظی هیر^{۱*} - واحده آقایی^۲ - مهری تبرمایه^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده

شناسایی حریم کمی یا محدوده آبرگیری چشمه‌ها جهت اعمال برنامه‌های مدیریتی برای جلوگیری از افزایش بهره‌وری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی یکی از اقدامات بسیار مهم و حائز اهمیت محسوب می‌شود. ارتفاعات روستای چله خانه علیا و کارخانه سیمان صوفیان واقع در کوه مورو با داشتن پوشش قابل توجهی از واحدهای آهکی کرتاسه تامین کننده‌ی بخش عمده‌ای از آب شرب روستاهای منطقه می‌باشد. کارخانه سیمان صوفیان به عنوان یکی از قطب‌های صنعتی شمال غرب کشور می‌تواند بر کمیت و کیفیت آب چشمه واقع در این منطقه موثر باشد. با تعیین حریم حفاظتی چشمه چله خانه علیا به عنوان اصلی‌ترین چشمه موجود در منطقه، می‌توان از اثرات منفی این کارخانه بر روی منابع آب جلوگیری کرد. نتایج اندازه‌گیری ماهانه دبی و مقادیر هدایت الکتریکی چشمه چله خانه علیا، تجزیه و تحلیل هیدروگراف چشمه در سال آبی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ و مقدار ضریب فرود بدست آمده در دراز مدت ($\alpha=0.002$) بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان می‌باشد که از عدم خلوص آهک و تراکم بالای درز و شکستگی منطقه ناشی می‌گردد. جهت تعیین محدوده حوضه آبرگیر و حریم حفاظتی چشمه مذکور، مرزهای هیدروژئولوژیکی تعیین و با استفاده از روش SCS و محاسبات بیلان، مرز مزبور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از محاسبات عدم تطابق مرز هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی را نشان داد. از این رو اقدام به تهیه نیمرخ زمین‌شناسی و محاسبه مساحت حوضه آبرگیر گردید. بر اساس یافته‌های این پژوهش و محدوده‌های محاسبه شده، حریم حفاظتی چشمه چله خانه علیا شامل محدوده هیدروژئولوژیکی بدست آمده از محاسبات بیلان در اطراف چشمه چله خانه علیا و مرز حفاظتی تعیین شده برای آهک‌های موجود در پایین‌تر از تراز چشمه چله خانه علیا (بخش غیر اشباع آهک‌های منطقه) می‌باشد که مساحت آن تقریباً ۱۸ هکتار برآورد شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان افشان، حریم حفاظتی، ضریب فرود، مرز هیدروژئولوژیکی

مقدمه

آب کارستیک می‌باشد که به دلیل محدودیت منابع آبرفتی از نظر کمی و کیفی و گسترش وسیع سازندهای کارستی در سطح کشور، به عنوان یکی از منابع مهم آب زیرزمینی به شمار می‌رود (Maleki et al., 2016).

در مناطق کارستی، چشمه‌ها نقش مهمی در شناسایی خصوصیات هیدروژئولوژیکی لایه‌های آبدار کارستی دارند (Gadimi et al., 2012). حریم چشمه محدوده‌ای است که چشمه از آن آبرگیری می‌کند. بطور کلی ضریب فرود هیدروگراف چشمه یک پارامتر مشخص از واکنش کلی سیستم کارستی است. بنابراین بررسی و

تعیین حریم حفاظتی منابع آب نگرشی ساختاری و راهبردی محسوب می‌گردد که در سطح کلان مدیریت منابع آب کشور مطرح است. بر اساس قانون توزیع عادلانه آب، تعیین حریم کمی و کیفی بر اساس معیارهای علمی و کاربردی جهت اعمال مدیریت صحیح بر استقرار بهینه کاربری‌ها و به منظور حفاظت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد (Ministry of Energy, 2017).

یکی از اقدامات مهم در چرخه مدیریت منابع آب، حفاظت از منابع

۱، ۲ و ۳- به ترتیب استاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد و دکتری هیدروژئولوژی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: r.vaezi@tabrizu.ac.ir)

معدن آهک کنار کارخانه صوفیان از نوع روباز و پله‌ای بوده و با روش انفجار (توسط ماده انفوز) استخراج می‌شود از این روش گسترش معدن کاری تا نزدیکی روستای چله‌خانه علیا می‌تواند بر کمیت آب چشمه واقع در این منطقه موثر باشد که این امر به دلیل استفاده شرب روستاهای پایین دست، می‌تواند با اعتراض عمومی و تنش‌های اجتماعی همراه باشد، لذا حساسیت و لزوم انجام مطالعات دقیق‌تر در منطقه احساس می‌شود. بنابراین در این مطالعه سعی شده است با استفاده از تکنیک‌های زمین‌شناسی هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمی بدون استفاده از روش‌های پرهزینه نظیر ردیابی رنگی محدوده حوضه آبگیر و حریم حفاظتی چشمه چله‌خانه علیا و مرز حفاظتی برای آهک‌های موجود در پایین‌تر از تراز چشمه چله‌خانه علیا هیدروژئولوژیکی جهت برداشت حساب شده آهک توسط کارخانه سیمان صوفیان تعیین شود تا از تاثیر منفی این کارخانه بر کمیت آب چشمه مذکور جلوگیری گردد.

مواد و روش‌ها

موقعیت منطقه: محدوده مطالعاتی کوه مورو با وسعتی بیش از ۱۸۰ کیلومتر مربع، با روند تقریبی شرقی-غربی در ۲۵ کیلومتری شمال غرب شهر تبریز و شمال شرقی دریاچه ارومیه، بعنوان یکی از پیچیده‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی آذربایجان شرقی می‌باشد. اقلیم منطقه بر اساس روش آمبرژه نیمه مرطوب و سرد است و میانگین بارش سالانه آن حدود ۳۰۴ میلی‌متر می‌باشد به‌شینه و کمینه ارتفاع حوزه به‌ترتیب ۲۲۰۰ و ۱۳۰۰ متر از سطح دریا است.

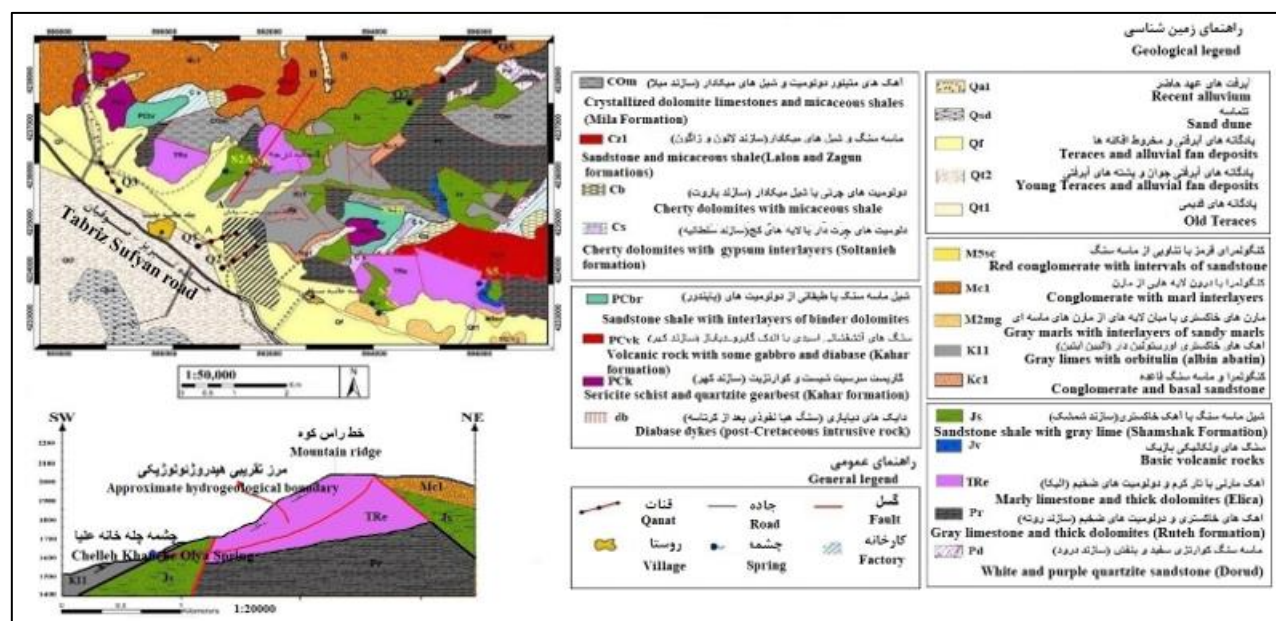
کوه مورو براساس آخرین مرزبندی تکتونیکی در زون ساختمانی البرز غربی-آذربایجان با روند تقریباً شرقی-غربی توسط گسل‌های بزرگی چون گسل تبریز (در دامنه‌ی جنوبی) و گسل مورو-دیزج (در دامنه شمالی) محصور گردیده است. در این کوه سازندهای قدیمی از پراکمرین تا کرتاسه رخنمون یافته است. سازندهای مربوط به الیگوسن و میوسن در مرز دشت و کوه با واریزه‌های کواترنری پوشیده شده‌اند که دو گسل مذکور، آن‌ها را از واحدهای قدیمی پرمین و تریاس جدا کرده و موجب راندگی سازندهای قدیمی بر روی این واحدها شده است. آهک‌های کارستی شده کرتاسه عامل تغذیه‌کننده بسیاری از چشمه‌های منطقه می‌باشد که مهم‌ترین آن چشمه چله‌خانه علیا با دبی ۳ لیتر بر ثانیه می‌باشد. در محل کنتاکت سازند الیکا با مارن‌های خاکستری میوسن تحت تاثیر شکستگی‌ها و گسل، با ایجاد تخلخل ثانویه چشمه‌های متعددی ایجاد شده است (شکل ۱).

تحلیل منحنی فرود چشمه‌ها روشی برای دستیابی به وضعیت سیستم کارستی می‌باشد (Milanovic, 1981). یکی از اصلی‌ترین خصوصیات سیمای کارستی تفاوت بین حوضه‌های آبریز هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی (توپوگرافی) است. طرح و ترسیم این حوضه‌ها یا مرزهای آن‌ها از مسائل پیچیده در کارست می‌باشد که با ترکیب اطلاعات زمین‌شناسی و توپوگرافی قابل برآورد می‌باشد.

در چند دهه گذشته، مطالعات وسیعی بر روی چشمه‌های کارستی انجام شده است که از جمله آن می‌توان به مطالعات زیر اشاره نمود. بوناسی و همکاران (Bonacci et al., 2015) در مطالعه‌ای تحت عنوان حوضه آبگیر چشمه‌های کارستی، نشان دادند که اختلاف معنی‌دار در اندازه حوضه‌های هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی از ویژگی‌های بسیار متداول برای چشمه‌های واقع در مناطق کارست است. راشد (Rashed, 2012) در مطالعه‌ای درجه کارست‌زایی آبخوان‌های کارستی مناطق مختلف را با استفاده از آنالیز هیدروگراف چشمه مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس درجه کارستی، آبخوان‌ها را به چهار گروه داری یا دیفیوژ، کارستی جزئی، کارستی و خیلی کارستی تقسیم کردند. زروش و همکاران (Zarvash et al., 2014) در مطالعه هیدروژئولوژی و مدل توسعه کارست در چشمه‌های سراب و سیاه‌گاو آبدان (ایلام) با بررسی تغییرات زمانی پارامترها و داده‌های هیدروشیمیایی و همچنین تحلیل منحنی فرود به این نتیجه رسیدند که جریان غالب در چشمه‌های سراب و سیاه‌گاو به ترتیب از نوع مجرای و افشان می‌باشد. به منظور تعیین حوضه آبگیر چشمه‌های فوق‌الذکر پس از بررسی‌های به عمل آمده و تهیه مقاطع زمین‌شناسی، ارتباط هیدرولیکی بین سازندها مشخص و سازند سروک به عنوان تأمین‌کننده بخشی از آب چشمه سیاه‌گاو معرفی گردید.

توکلی و کرمی (Tavakkoli and Karami, 2021) در مطالعه‌ای با استفاده از تلفیق روش‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و هیدروژئولوژی، مساحت حوضه آبگیر را برای چشمه‌های کارستی غرب مجن برآورد کرده‌اند. پایدار و همکاران (Paydar et al., 2015) در مطالعه‌ای با استفاده از روش بیلان تخمینی و MIF، مساحت حوضه آبگیر چشمه گورگور در استان اردبیل را ۱۰۰ کیلومتر مربع تعیین کردند.

کارخانه سیمان صوفیان واقع در شمال غرب شهر تبریز با تولید روزانه ۷۰۰۰ تن سیمان یکی از قطب‌های صنعتی شمال غرب محسوب می‌شود. با توجه به اینکه ۷۰ تا ۷۵ درصد ماده مصرفی در تولید سیمان، سنگ آهک می‌باشد به همین دلیل کارخانه سیمان صوفیان درصدد برداشت از سنگ‌های آهکی کرتاسه در مجاورت چشمه چله‌خانه واقع در کوه مورو و روستای چله‌خانه علیا می‌باشد.



شکل ۱- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه و نیمرخ زمین شناسی چشمه چله خانه علیا

(بر گرفته شده از نقشه ۱:۵۰۰۰۰ تهیه شده توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران (Asadian 1991)).

Figure 1- Geological map of the studied area and geologic profile of the Chelleh Khanehe Olya Spring

(Modified after maps of Geological Survey and Mineral Exploration of Iran (Asadian 1991))

داخل ظرفی با حجم معین است که تحت عنوان روش حجمی شناخته می شود. در این تحقیق، برای اندازه گیری دبی چشمه ها و قنات ها از روش حجمی استفاده گردید و جهت به حداقل رساندن خطای اندازه گیری، متوسط زمان اندازه گیری های تکراری در نظر گرفته شد. همچنین به دلیل لوله کشی برخی منابع و عدم دسترسی به مظهر چشمه ها، صعب العبور بودن و مسافت زیاد، تنها ایستگاه های S_{mb} و S_7 برای اندازه گیری ماهانه دبی انتخاب شدند (جدول ۱).

بررسی دوره ای دبی و هدایت هیدرولیکی

بررسی و پیش بینی آینده چشمه های کارستی، مقدار آب خروجی از دهانه چشمه در واحد زمان، یکی از پارامترهای بسیار مهم جهت تعیین خصوصیات هیدروژئولوژی در سازندهای کارستی می باشد. یکی از ساده ترین روش اندازه گیری دبی در جریان های کم، اندازه گیری مستقیم آب خروجی از چشمه، در زمان مشخص، از راه هدایت آن به

جدول ۱- تغییرات ماهانه پارامترهای اندازه گیری شده در ایستگاه های مورد مطالعه در سال آبی ۹۸-۹۹

 (هدایت الکتریکی بر حسب $(\mu S/cm)$ و دبی بر حسب (لیتر بر ثانیه))

 Table 1- Monthly variation of measured parameters in the selected stations from 2019-2020
(Electrical conductivity in $(\mu S/cm)$ and flow rate in (l/s))

سال Year	ماه Month	چشمه S_{mb} Spring S_{mb}		چشمه S_7 Spring S_7		قنات Q_1 Qanat Q_1	
		دبی Discharge	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	دبی Discharge	هدایت الکتریکی Electrical conductivity	دبی Discharge	هدایت الکتریکی Electrical conductivity
2019	آذر (Nov)	2.5	489	1.14	314	3.3	3090
2019	دی (Dec)	3.5	463	1	314	5.7	3240
2020	اسفند (Feb)	1.81	500	1.07	337	6.6	3550
2020	فروردین (Mar)	2.68	493	1.05	336	6.1	3570
2020	خرداد (May)	3.5	474	1.17	333	5	3550
2020	مرداد (Jul)	3.33	486	1.15	333	3.8	3170
2020	مهر (Sep)	2	478	1.07	333	3.5	3030
2020	آبان (Oct)	2.68	485	1.1	333	3.6	3290

تجزیه و تحلیل منحنی فرود

شکل و خصوصیات منحنی فرود اطلاعات مهم و مفیدی در مورد شناخت سیستم درونی آبخوان‌های کارستی بویژه نوع تخلخل آبخوان فراهم می‌نماید. در این مطالعه تحلیل هیدروگراف جریان مربوط به یک رویداد بارندگی مورد بحث قرار گرفته است. این منحنی در واقع یال نزولی هیدروگراف چشمه‌ها است که برای این منظور، آمار آبدی چشمه‌ها برای یک سال آبی گردآوری و پس از محاسبه دبی متوسط ماهیانه با در نظر گرفتن دبی حداکثر و روند نزول آن تا زمان حداقل که آبدی چشمه مجدداً سیر صعودی پیدا می‌کند بر روی نمودار نیمه لگاریتمی پیاده می‌شود. در این نمودار دبی بر روی محور عمودی با مقیاس لگاریتمی در مقابل زمان بر روی محور افقی با مقیاس عددی ترسیم می‌شود. از آنجا که خطوط مذکور در سیستم نیمه لگاریتمی به صورت خطی رسم می‌شوند و نیز با توجه به روند کاهشی خطوط، تابعی که به آن‌ها برازش داده می‌شود از نوع نمایی معکوس خواهد بود. رابطه کلی تابع مذکور بصورت معادله زیر است (Maillet, 1905):

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-at} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه: Q_t ، آبدی چشمه در زمان t بر حسب متر مکعب در ثانیه؛ Q_0 ، آبدی قبلی چشمه در زمان صفر؛ و t زمان بر حسب روز بین Q_t و Q_0 می‌باشد. پارامتر بدون بعد α نشان دهنده ضریب تخلیه (ضریب فرود) بوده که به قابلیت انتقال و آبدی ویژه آبخوان بستگی دارد.

یکی دیگر از موارد کاربرد هیدروگراف چشمه‌های کارستی، استفاده از نسبت آبدی بیشینه، Q_{max} ، به آبدی کمینه، Q_{min} (Q_{max}/Q_{min}) و تعیین درجه کارستی شدگی (D_k) چشمه‌ها است که به ترتیب در تشخیص ویژگی‌های مربوط به حجم مخزن کارستی و تعیین نوع جریان و درجه کارستی شدگی استفاده می‌شود (Rashed, 2012).

$$D_k = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \times \frac{t_{event}}{t_{peak}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$t_{event} = t_C - t_A \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$t_{peak} = t_B - t_A \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در این رابطه: t_A ، زمان شروع یال صعودی هیدروگراف؛ t_B ، زمانی که حداکثر دبی رخ می‌دهد؛ و t_C ، زمانی که جریان به حالت پایه بر می‌گردد.

محاسبه بیلان آب زیرزمینی

در دشت‌هایی که فاقد یک یا چند پارامتر بیلان بوده و بعلا کمبود اطلاعات، امکان تهیه بیلان در آن وجود ندارد و فقط

آماربرداری از منابع آب (چشمه، چاه و قنات) در آن صورت گرفته باشد، روش‌های غیر مستقیم برآورد بیلان پیشنهاد می‌گردد. بنابراین با توجه به عدم وجود اطلاعات کافی از وضعیت بارندگی منطقه و فقدان آماربرداری از منابع تخلیه‌کننده‌ی آب زیرزمینی سفره کارستی موجود در منطقه، در این مطالعه به منظور محاسبه بیلان اقدام به برداشت دبی از ایستگاه‌های انتخابی بصورت مرتب و ماهیانه گردید و آمار و داده‌های سال آبی ۹۹-۱۳۹۸ بعنوان دوره انتخابی برای محاسبه بیلان آب در این منطقه کارستی استفاده شد، طبق رابطه ۵ (Milanovic, 1989)، که در ادامه ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

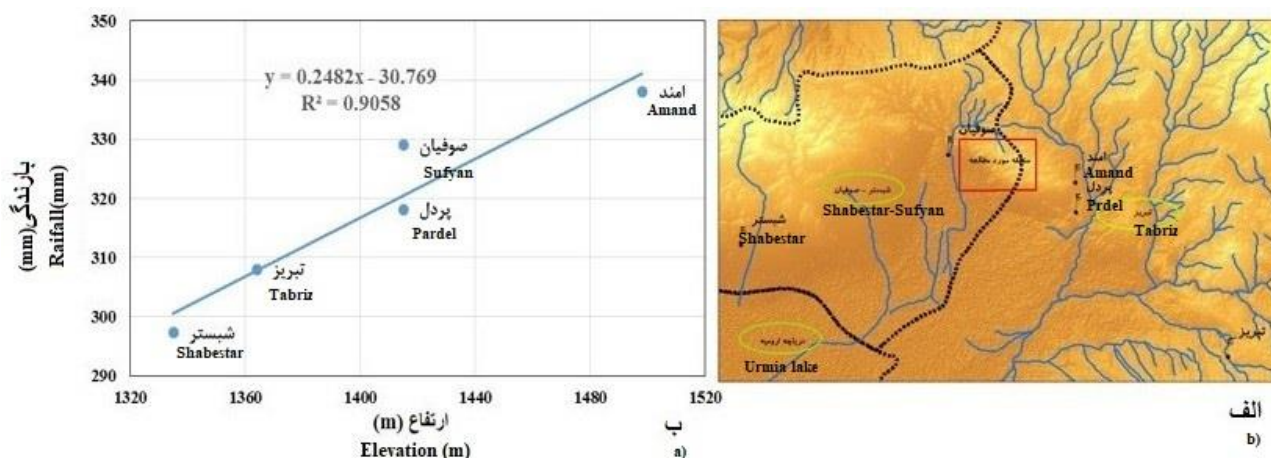
$$P = E + R + I \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در این رابطه P ، بارندگی کل حوضه؛ E ، تبخیر در سطح حوضه؛ R ، روان آب؛ و I ، نفوذ بر حسب واحد میلی‌متر می‌باشد. با کسر تبخیر و روان آب محاسبه شده به روش $SCS-CN^2$ مقدار نفوذ موثر بدست آمده و با مقایسه میزان برداشت بوسله چاه و غیره، برآوردی از بیلان منطقه بدست خواهد آمد.

مولفه‌های ورودی بیلان

بارش: جهت بدست آوردن مقادیر بارش در محدوده به دلیل کمبود تراکم ایستگاه‌های ثابت در حوضه مطالعاتی با برقراری رابطه ارتفاع-بارش، از داده‌های ایستگاه‌های مجاور استفاده شد و معادله بارش برای تخمین مقادیر بارندگی برای حوضه مورد مطالعه بدست آمد. لازم به ذکر است که مجموعاً بالغ بر ۱۵ ایستگاه هواشناسی موثر در داخل و اطراف محدوده مورد مطالعه وجود دارد که از این تعداد تنها ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز و شبستر و باران سنجی تبریز، صوفیان، امند و پردل مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۲-الف). با توجه به نقشه DEM منطقه بلندترین ارتفاع منطقه ۲۱۵۰ متر و کم‌ترین ارتفاع ۱۳۵۰ متر که مربوط به دشت‌های جنوبی کوه مورو می‌باشد. بر اساس رابطه بارش-ارتفاع مقدار بارندگی در حوضه مطالعاتی ۴۰۳ میلی‌متر در سال محاسبه گردید (شکل ۲-ب).

رواناب و نفوذ: با توجه به اینکه مطالعات تفصیلی کارستی در این منطقه گسترش چندانی نداشته است، به منظور برآورد در صد نفوذ در سازندهای آهکی منطقه مورد مطالعه با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی حاکم بر حوضه، نوع پوشش گیاهی و خاک منطقه، مقادیر رواناب استفاده از روش SCS و پارامتر شماره منحنی (CN) که یک معیار توصیفی می‌باشد.



شکل ۲- الف) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی و ب) نمودار ارتفاع در مقابل بارش برای ایستگاه‌های انتخابی
Figure 2- a) The graph of elevation versus precipitation for the selected stations and b) The location of the climate stations

وضعیت هیدروژئولوژیکی (گسترش آبخوان، سازندهای تراوا، نیمه تراوا و ناتراوا، ارتباط بین زون مورد نظر با زون‌های مجاور و ...) در هر زون و سپس محاسبه دقیق تر بیلان آب و تعیین حریم کمی زون مورد نظر مفید باشد. هر چند که این روش نمی‌تواند بصورت دقیق حوضه آبرگیر را تعیین کند، اما می‌تواند مساحت را با تخمین مناسبی طبق رابطه زیر بدست آورد.

$$V = C * I * A \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن: V ، میزان تخلیه سالانه $(m^3/year)$ ؛ A ، مساحت حوضه آبرگیر چشمه (m^2) ؛ I ، متوسط بارندگی منطقه (m) که با استفاده از رابطه ارتفاع-بارندگی بدست می‌آید؛ و C ، درصد نفوذ بارندگی است.

تعیین حدود منطقه حفاظتی

برای تعیین حدود منطقه حفاظتی یا به عبارت دیگر حداکثر فاصله افقی محل تغذیه چشمه از مظهر از رابطه (۷) استفاده می‌شود.

$$D = \frac{H-h}{\tan \alpha} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه بازه طولی (D) بر حسب متر، H حداکثر ارتفاع محل تغذیه چشمه از سطح دریا، ارتفاع چشمه از سطح دریا (h) نیز و $\tan \alpha$ دالالت بر مقدار شیب سنگ بستر دارد. همچنین جهت بدست آوردن بازه عرضی محدوده حفاظتی، مساحت تعیین شده بر مقدار بازه طولی تقسیم می‌شود (رابطه ۸).

$$\text{مساحت تعیین شده} = \text{بازه عرضی} \times D \quad \text{رابطه (۸)}$$

تعیین شد و با کسر این مقدار از کل بارش موجود در منطقه، مقدار نفوذ برای حوضه آبرگیر کارستی مورد مطالعه محاسبه گردید. لازم به ذکر است در این روش در صورتی که حوضه از نظر زمین شناسی، پوشش گیاهی و نوع خاک ناهمگن باشد، بایستی میانگین وزنی مقادیر CN محاسبه گردد (Alizadeh, 2013).

تبخیر و تعرق: تبخیر می‌تواند از سطوح مختلف مانند سطح آزاد آب، سطح خاک و گیاهان و از سفره‌های آب زیرزمینی صورت گیرد. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه از لحاظ پوشش گیاهی دارای مراتع متوسط می‌باشد و اکثر پوشش منطقه مربوط به بوته‌های گون است، لذا تبخیر از پوشش گیاهی ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی می‌باشد (Allen, 1998; Kand Chini, 2015). از طرف دیگر با توجه به کارستی بودن منطقه و وجود درز و شکاف فراوان در واحدهای زمین شناسی آهکی، بارش رخ داده از میان شکستگی‌ها عبور کرده و به سفره کارستی منتقل می‌شود. با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی در منطقه مورد نظر در عمق بیش از ده متر قرار دارد، و همچنین به دلیل اینکه عمق آب زیرزمینی در سازندهای کارستی بیشتر است، لذا تبخیر کمتر بوده و مولفه‌ی خروجی تبخیر از معادله بیلان حذف می‌گردد.

محاسبه مساحت لازم برای تامین آبدهی چشمه

جهت ارزیابی و مطالعه بیلان در سازندهای کارستی زون‌های بسته‌ای بنام زون‌های کارستی انتخاب می‌شوند. هدف از تقسیم‌بندی یک حوضه آبریز کارستی به زون‌های هیدروژئولوژیکی کارستی، در واقع جمع‌آوری کلیه آمار و اطلاعات مربوط به هر زون و تجزیه و تحلیل و تفسیر آن‌ها می‌باشد. این امر می‌تواند جهت دستیابی بهتر به

نتایج و بحث

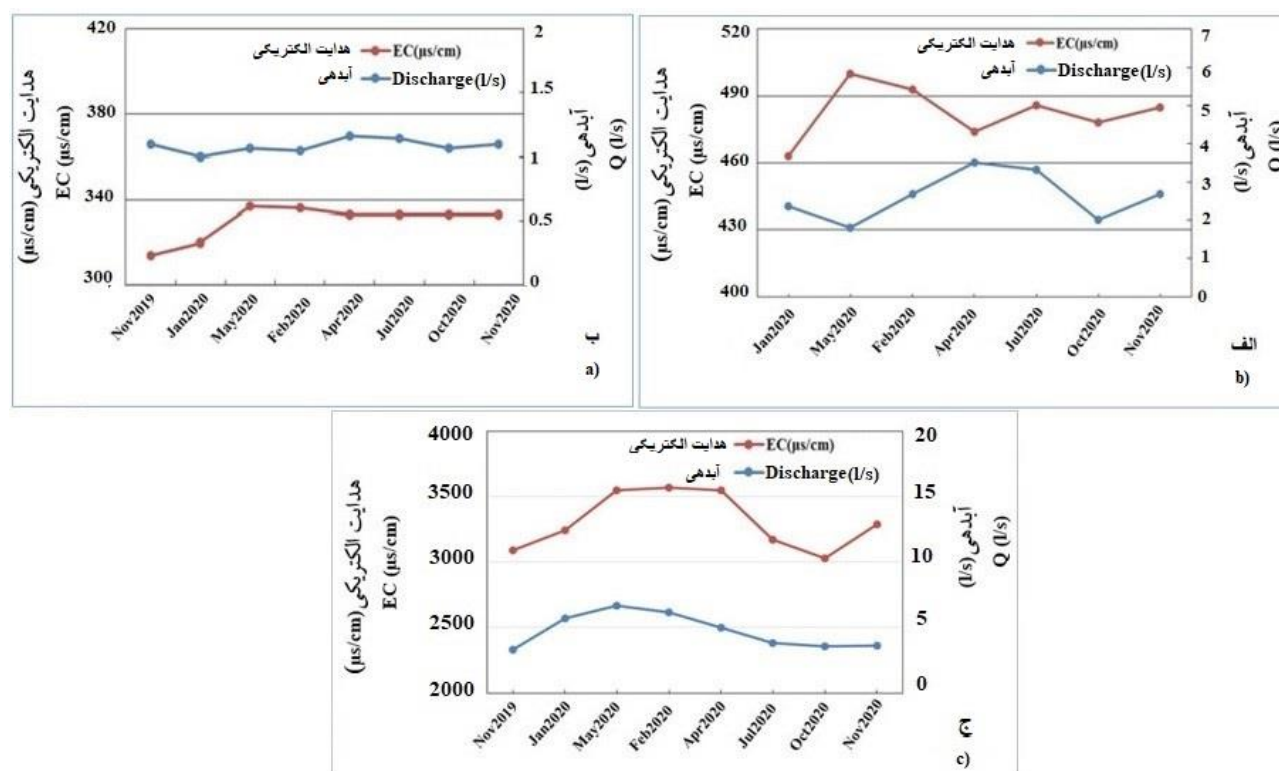
بررسی دوره‌ای دبی و هدایت هیدرولیکی

با توجه به تغییرات ماهانه دبی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه، آبدی چشمه‌های منطقه کم بوده و این از مشخصات آبخوان‌های سازند سخت و کارست‌های نابالغ می‌باشد که در آن‌ها تعداد چشمه‌ها زیاد و آبدی آن‌ها کم است. اندازه‌گیری دبی در ماه‌های مختلف نو سانات زیادی نشان نمی‌دهد و تخلیه آبخوان‌ها در مدت زمان زیادی انجام می‌گیرد (جدول ۱).

به منظور بررسی تغییرات هدایت الکتریکی به عنوان یکی از مهم‌ترین خصوصیات شیمیایی آب زیرزمینی، در جریان‌های مختلف، مقادیر این پارامتر در برابر زمان برای قنات و چشمه‌های انتخابی منطقه با استفاده از داده‌های جدول ۱ ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (شکل ۳). بررسی تغییرات (EC) در دوره‌های مشابه با دبی‌های اندازه‌گیری شده ایستگاه انتخابی نشان دهنده رابطه عکس این دو پارامتر می‌باشد. تغییرات EC در چشمه چله خانه علیا (شکل ۳-الف) نشان می‌دهد که با کاهش مقادیر دبی همزمان با پایان

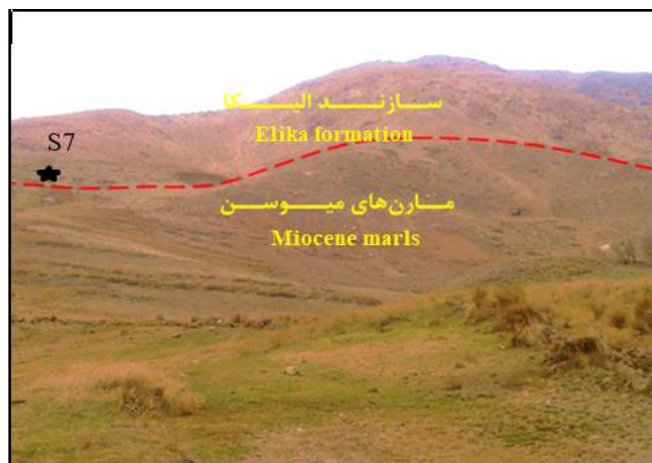
بارش‌های زمستانه، مقادیر هدایت الکتریکی افزایش یافته است، به طوری که با کاهش دبی از ۲/۵ l/s به ۱/۸ l/s، مقدار EC از ۴۶۳ به ۵۰۰ $\mu\text{S/cm}$ افزایش پیدا کرده است. با ذوب برف حجم زیادی از آب با هدایت الکتریکی پایین به آبخوان اضافه می‌شود و باعث کاهش هدایت الکتریکی آب مخزن می‌شود، بطوری که هدایت الکتریکی آب به مقدار ۴۷۴ $\mu\text{S/cm}$ کاهش می‌یابد. این مطلب منعکس کننده افزایش حجم مخزن، رقیق شدگی آبخوان و در نتیجه خروج آب‌های تازه از سیستم کارستی می‌باشد. در ادامه که دبی جریان خروجی از چشمه کاهش می‌یابد تمام موارد فوق‌الذکر بر عکس می‌شوند و در نتیجه هدایت الکتریکی آب چشمه افزایش پیدا می‌کند.

اندازه‌گیری تغییرات دبی در چشمه‌ی S₇ طبق نمودار مربوط به تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و دبی (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد بجز برداشته‌های مربوط به زمستان، تغییرات خاصی مشاهده نشده است. با توجه به خروج این چشمه از کنتاکت واحد آهکی الیکا و واحد مارنی میوسن (شکل ۴)، به نظر می‌رسد سیستم توسعه کارست در آبخوان مربوط به این چشمه از نوع افشان باشد که در ادامه مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.



شکل ۳- نمودار تغییرات دبی و هدایت الکتریکی در الف) چشمه چله خانه علیا، و ب) در چشمه S₇، ج) قنات

Figure 3- The discharge and electrical conductivity of the a) Chelleh Khanehe Olya Spring, b) Spring S₇, and c) Qanat (Q1)



شکل ۴- کنتاکت واحد آهکی الیکا و مارن های میوسن در محل خروج چشمه S7
Figure 4- The contact of Elika limestone unit and Miocene marls at the outlet of the S7 Spring

مقدار ضریب فرود بدست آمده ($\alpha_1=0/002$) و مقایسه آن با مقادیر جدول ۱ و همچنین تغییرات کم دبی بیانگر غالب بودن سیستم جریان افشان در این چشمه می باشد که بصورت تاخیری آب باران را از طریق مجاری ریزتر کارستی تخلیه می کند.

در میکرو رژیم α_2 نیز که از خرداد ماه تا اواخر تابستان رخ داده و طی آن دبی جریان از $3/33$ لیتر در ثانیه به 2 لیتر در ثانیه کاهش یافته است مقدار ضریب فرود باز هم در محدوده جریان افشان می باشد ($\alpha_2=0/013$). رفتار منحنی فرود برای چشمه چله خانه علیا متفاوت از چشمه های مناطق غیر کوهستانی می باشد. بطوری که در این مناطق انتظار می رود مقدار α_1 که منعکس کننده تخلیه کاندیوت ها^۲ است بیشتر از α_2 باشد. در چشمه های مناطق کوهستانی نظیر چله خانه علیا ممکن است برعکس باشد که علت آن ذوب برف در زمان فروکش هیدروگراف است بطوری که در زمانی که سیستم مجرای در حال تخلیه آبخوان می باشد ذوب برف اثر آن را جبران کرده و از افزایش شیب منحنی فرود و در نتیجه افزایش مقدار α جلوگیری می کند.

بررسی هیدروگراف و زمان تاخیر آبدی چشمه ها

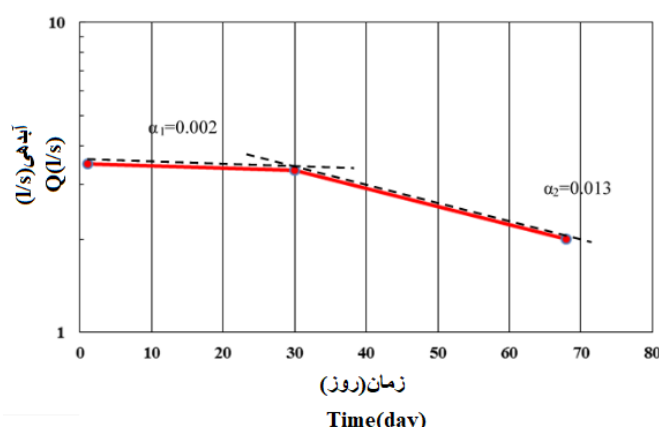
به منظور ارزیابی تغییرات دبی، هیدروگراف جریان چشمه ها و قنات هفت چشمه در سال آبی ۹۸-۹۹ ترسیم گردید (شکل ۶). مقادیر دبی رابطه مستقیمی با نزولات جوی، و سعت حوضه آبریز و وضعیت هدایت هیدرولیکی سفره دارد. شکلی کلی هیدروگراف چشمه چله خانه علیا نشانگر این مطلب است که نوسانات دبی در طول دوره مطالعاتی زیاد نبوده است.

نمودار تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و دبی برای قنات Q_1 (هفت چشمه) در شکل (۳-ج) نشان داده شده است. هدایت الکتریکی این قنات به علت تاثیر مخرب سازندهای زمین شناسی، بالا می باشد. با افزایش دبی، مقدار EC افزایش می یابد که این برخلاف روند مشاهده شده در آبخوان های آبرفتی است. این خصوصیات عمدتاً در آبخوان های کارستی دیده می شود و به دلیل اینکه بخش عمده ای از حوضه آبرگیر قنات مذکور در آبخوان های کارستی منطقه قرار دارد، بنابراین رفتار دبی و EC به نظر می رسد تحت تاثیر پدیده جریان پیستونی^۱ قرار گرفته است. بر اساس این پدیده با رخداد بارش و افزایش سطح ایستابی، سطح اساس کارستیفیکاسیون^۲ عمیق تر شده و منجر به خروج آب های زیرزمینی عمیق و راکد می شود که به طور طبیعی مقدار املاح محلول و EC بالایی دارند.

تجزیه و تحلیل هیدروگراف و تعیین مدل توسعه کارست (تعیین نوع جریان و مدل توسعه کارست)

منحنی فرود و محاسبه ضرایب هیدرو دینامیکی چشمه چله خانه علیا

منحنی فرود چشمه چله خانه علیا که بر اساس رابطه ۱ محاسبه و ترسیم گردیده است (شکل ۵)، دارای دو میکرو رژیم می باشد. همانطور که مشاهده می شود در طی میکرو رژیم α_1 مقدار دبی چشمه از $3/5$ لیتر در ثانیه به $3/33$ لیتر در ثانیه در مدت 30 روز کاهش یافته است. این میکرو رژیم با استفاده از نقطه پیک ایجاد شده در طی بارش های زمستانه و ذوب برف ها رخ داده و تعیین کننده روند تقریباً یکنواخت نزولی در هیدروگراف از فروردین تا اواخر اردیبهشت است.



شکل ۵- منحنی فرود چشمه چله خانه علیا (اردیبهشت ۹۹ تا مرداد ۹۹)

Figure 5- Recession curve of Chelleh Khanehe Olya Spring (May-Aug 2020)

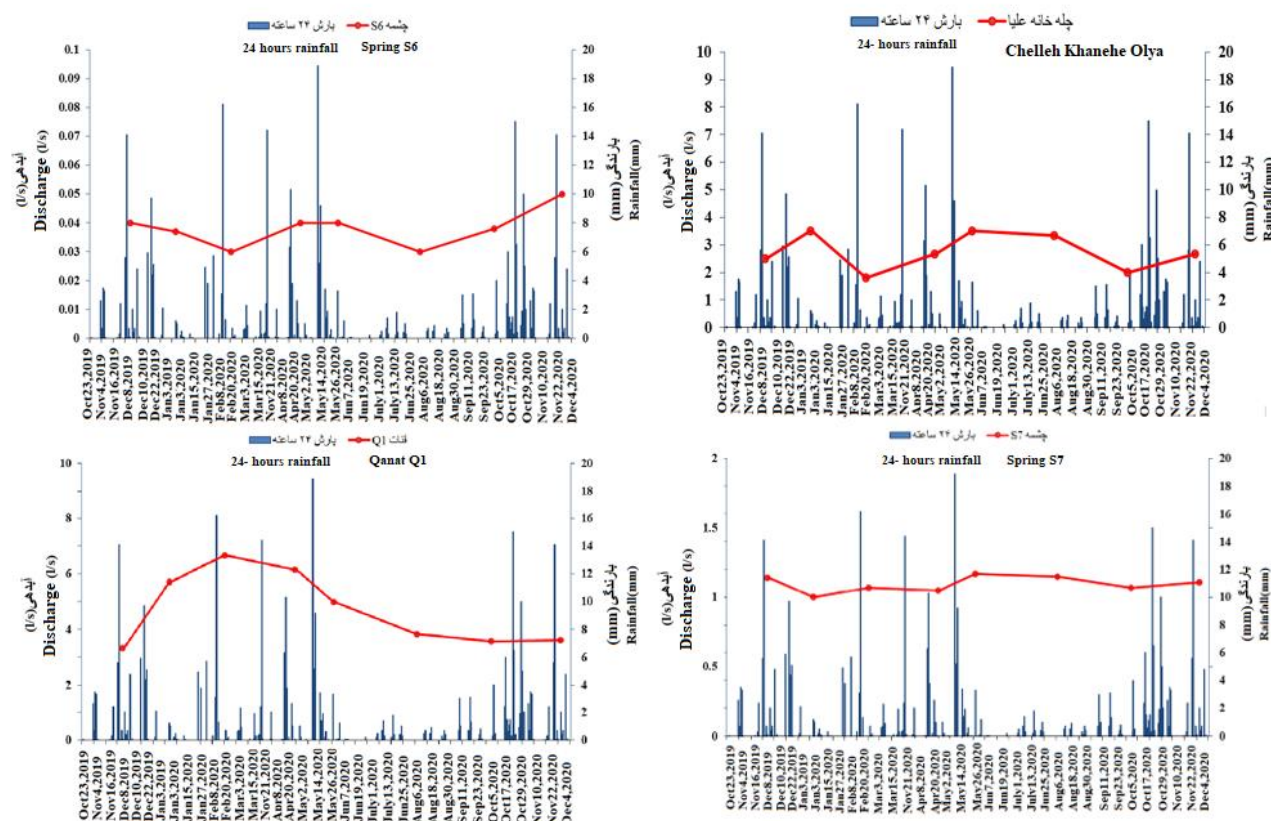
جریان به بارش‌های رخ داده نشان‌دهنده توسعه احتمالی جریان افشان در محدوده حوضه آبرگیر چشمه‌هاست. بطوری که که میزان تخلخل و کار ست شدگی در منطقه بسیار ضعیف بوده و سنگ‌های آهکی در نتیجه فعالیت‌های تکتونیکی و هوازدگی بعدی دارای درز و شکاف‌های بسیار ریزی شده‌اند که آب از طریق آن‌ها به داخل سنگ نفوذ و باعث زهکشی آهسته چشمه‌ها می‌گردد (شکل ۶ ب و ج).

هیدروگراف قنات Q_1 (شکل ۶ د)، نشان می‌دهد با شروع فصل تر و افزایش بارش مقدار دبی جریان روند صعودی داشته و تا ۲ برابر افزایش می‌یابد، بطوری که بیش‌ترین دبی مربوط به اوایل اسفند ماه می‌باشد. از این رو پا سخ قنات به بارش‌های رخ داده شدید بوده و با وقوع بارش‌های زمستانی و کاهش مقادیر آن تا پایان فصل خشک دبی جریان کاهش یکنواختی داشته تا به جریان پایه برسد. از آنجایی که مسیر قنات مذکور به طرف ارتفاعات آهکی کرتاسه می‌باشد می‌توان ادعا کرد که بخشی از قنات در قسمت مادر چاه از واحد کارستی تغذیه می‌شود. لذا بارش‌های بخشی از بارش‌های رخ داده از طریق سیستم کارستی با سرعت نسبتاً بالا ۴ تخلیه شده و بخش دوم ناشی از تخلیه تاخیری از طریق بخش آبرفتی قنات می‌باشد.

درجه کارستی شدن^۱ و نسبت دبی بیشینه به کمینه

به منظور بررسی سیستم جریان آب زیرزمینی و درجه توسعه کارست، مقادیر دبی بیشینه، دبی کمینه و همچنین پارامترهای مورد نیاز جهت تعیین درجه کارست شدگی بر اساس هیدروگراف چشمه چله خانه علیا تعیین گردید. نتایج جدول ۲ و مقایسه آن با جدول ارائه شده برای دسته‌بندی چشمه‌های کارستی بر اساس درجه کارست شدگی توسط راشد (Rashed, 2012) نشان می‌دهد که چشمه مورد مطالعه از نظر درجه کارست شدگی در رده آبخوان‌های دارسی قرار می‌گیرد.

با شروع بارش در آبان ماه ۱۳۹۸، دبی چشمه شروع به افزایش کرده و با ادامه بارش‌ها بزرگترین پیک دبی در دی ماه ۱۳۹۸ با میزان ۳/۵ لیتر بر ثانیه و اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ ظاهر شده است. نکته قابل توجه در این هیدروگراف، زمان تاخیر پاسخ چشمه به هر دوره بارندگی می‌باشد. بطور کلی تاثیر بارش در این چشمه در مدت طولانی تری (۴۰-۵۰ روز بعد) در روی هیدروگراف ظاهر شده است. با افزایش بارندگی‌ها و شروع فصل تر هیدروگراف سیر صعودی نشان می‌دهد به گونه‌ای که نقطه پیک هیدروگراف در دی ماه ۹۸ اتفاق افتاده است. قابل ذکر است با توجه به اینکه بیشترین مقدار بارش در طول دوره مطالعاتی از آبان ماه (فصل تر) شروع شده و تا اوایل بهار (شروع فصل خشک) ادامه می‌یابد، ولی نقطه پیک برای چشمه در این دوره رخ نداده و مربوط به دی ماه و اواخر اردیبهشت ماه می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد بارش‌های اتفاق افتاده از آبان ماه و کاهش این بارندگی‌ها تا آذرماه باعث افزایش سطح آب آبخوان در دی‌ماه شده به گونه‌ای که بیشترین دبی خروجی مربوط به این ماه از سال است و سپس کاهش یافته است. با افزایش بارش‌های زمستانی و ذوب برف از ارتفاعات میزان دبی خروجی رفته رفته افزایش یافته و پس از رسیدن به بیشترین حجم تخلیه و وقوع آخرین بارش بهاره، با سرعت تقریباً یکنواختی به جریان پایه نزدیک شده است. بر اساس این داده‌ها و نمودار مورد اشاره می‌توان به این نتیجه رسید که آبدی چشمه در فصل بهار بیش‌ترین مقدار را دارد (شکل ۶ الف). هیدروگراف چشمه‌های S6 و S7 نیز نشان می‌دهد که آبدی چشمه‌ها روند ثابتی دارند و افزایش و کاهش مقادیر بارش میزان آبدی چشمه‌ها را بطور یکنواختی تحت تاثیر قرار داده است. چشمه‌های مذکور در ارتفاعات شهرک صنعتی از سازند آهکی الیکا خارج می‌شوند. پاسخ ضعیف دبی



شکل ۶- هیدروگراف چشمه‌های چله خانه علیا (الف)، S6 (ب)، S7 (ج) و قنات Q (د)

Figure 6- Hydrograph of a) Chelleh Khanehe Olya Spring, b) S6 c), S7 (g) and Qanat Q (d)

جدول ۲- پارامترهای محاسبه شده جهت تعیین درجه کارست‌شدگی و تعیین نوع جریان در چشمه چله خانه علیا

Table 2- Estimated parameters to determine the degree of karstification and the type of flow in Chelleh Khanehe Olya Spring

پارامتر Parameter	Q_{max}	Q_{min}	Q_{max}/Q_{min}	t_A	t_B	t_C	D_k
چشمه Spring							
چله خانه علیا Chelleh Khanehe Olya	3.5	2	1.75	46	92	218	6.5

تعیین حریم حفاظتی چشمه نمود. مساحت حوضه آبرگیر و وضع هندسی آبخوان‌های کارستی عواملی هستند که در زمان و مکان تغییر می‌کنند و به شرایط هیدرولوژیکی بستگی دارند. در این پژوهش به منظور محاسبه کمی مساحت حوضه آبرگیر چشمه چله خانه علیا ابتدا مرز هیدرولوژیکی (توپوگرافی) برای چشمه مورد نظر توسط نرم افزارهای Global Mapper و Google Earth مشخص گردید. پلی گون قرمز رنگ روی شکل ۷، با مساحت حدود ۶۴۵۱۸۰ متر مربع، نشان دهنده مرزهای هیدرولوژیکی برای چشمه مورد نظر می‌باشد.

همچنین مقادیر دبی بیشینه به دبی کمینه نیز نشان‌دهنده آبخوان با عکس‌العمل آهسته می‌باشد. این موضوع نشان می‌دهد که نوع سیستم جریان در چشمه مذکور از نوع افشان است که وجود درز و شکستگی فراوان در سازند تغذیه‌کننده شاهدهی بر این ادعا می‌باشد.

تعیین مساحت حوضه آبرگیر و مرز هیدروژئولوژیک چشمه چله خانه علیا

هر چند تعیین مرزهای هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی حوضه آبریز یک چشمه آسان نمی‌باشد ولی می‌توان با استفاده از آمار و اطلاعات موجود و معادله بیلان اقدام به محاسبه مساحت حوضه و



شکل ۷- موقعیت مرز هیدرولوژیکی چشمه چله خانه علیا ارائه شده با پلیگون قرمز رنگ (برگرفته از Google Earth)

Figure 7- The location of the hydrological border of Chelleh Khanehe Olya Spring represented by red polygon (taken from Google Earth)

محاسبه مساحت لازم برای تامین آبدهی چشمه

با توجه به این که در ارتفاعات مورو آب فروچاله چندانی یافت نمی شود و عمده نفوذ آب از طریق درز و شکستگی صورت می گیرد و همچنین با توجه به وجود درزه و شکاف های فراوان ناشی از فعالیت های شدید تکنیکی به دلیل مجاورت با روراندگی اصلی تبریز و زمین شناسی و مورفولوژی منطقه و نیز مقادیر بدست آمده از روش SCS مقدار درصد نفوذ منطقه مطالعاتی ۲۷/۴۴٪ برآورد شد. بر اساس مقادیر بدست آمده برای بارش و نفوذ که به ترتیب ۴۰۳ میلی متر در سال و ۲۷/۴۴ درصد می باشد، مساحت لازم برای تامین آبدهی چشمه چله خانه علیا با استفاده از رابطه ۶ برابر با ۷۴۱۴۶۵ متر مربع محاسبه گردید. با توجه به اینکه میزان تخلیه سالانه از چشمه چله خانه علیا ۸۱۹۹۰ متر مکعب بر سال می باشد، اختلاف ۱۰۰۰۰ متر مکعب حجم آب خروجی از چشمه مورد مطالعه با مقدار بدست آمده از مرزهای هیدرولوژیکی نشان دهنده تامین بخشی از آب چشمه خارج از مرزهای هیدرولوژیکی می باشد که ممکن هست از طریق لایه بندی، گسل و یا شکستگی های موجود در محدوده انتقال یابد. با در نظر گرفتن این عوامل مرز بدست آمده، مرز هیدروژئولوژیک خوانده می شود.

تهیه مقطع زمین شناسی

از آنجا که استفاده از مقاطع زمین شناسی به عنوان یکی از ابزارهای مفید جهت تعیین مرز هیدروژئولوژیک می باشد. در این پژوهش یک نیمرخ زمین شناسی در امتداد شمال غرب- جنوب شرق (راستای AB در شکل ۱ که از موقعیت چشمه چله خانه عبور می کند تهیه گردید. همچنین در امتداد AB، پیمایش صورت گرفت که طی

ارزیابی مرز هیدرولوژی بر اساس بیلان

بر خلاف پهنه های متشکل از سازندهای زمین شناسی غیرکربناته که در معرض کارستی شدن قرار نمی گیرند، به کمیت درآوردن بعضی از عوامل همچون خصوصیات هیدروژئولوژیکی محیط، شکل هندسی آبخوان و حوضه آگیری که آبخوان را تغذیه می کند، در پهنه های کارستی بسیار مشکل می باشد. به منظور بررسی تطابق مرز هیدرولوژیکی بر مرز هیدروژئولوژیک از معادله ارائه شده توسط میلانویچ برای محاسبه بیلان و اطلاعات زمین شناسی استفاده گردید. به این ترتیب که ابتدا بارش متوسط برای حوضه مورد مطالعه محاسبه شد، سپس از روش درصد نفوذ در آهک های کارستی و میزان آبدهی سالانه چشمه کارستی اقدام به محاسبه مساحت حوضه آگیر چشمه گردید. نتایج نشان داد که از میزان ۴۰۳ میلی متر بارش رخ داده در حوضه، ۲۹۲ میلی متر بصورت رواناب از منطقه خارج می شود. میزان نفوذ ناشی از بارش نیز پس از کسر رواناب مقدار ۱۱۰ میلی متر برآورد شد. بر اساس مساحت بدست آمده از مرزهای هیدرولوژیکی حجم رواناب و نفوذ برای یک سال برای محدوده مرز هیدرولوژی به ترتیب برابر با ۱۸۸۶۵۷ و ۷۱۳۵۰ مکعب در سال محاسبه گردید. از طرف دیگر بر اساس مقادیر دبی اندازه گیری شده حجم تخلیه سالانه چشمه در حدود ۸۱۹۹۰ متر مکعب می باشد. از این رو به نظر می رسد بخشی از آب چشمه چله خانه علیا از خارج از مرزهای هیدرولوژی تامین می گردد. بنابراین بایستی مرز هیدروژئولوژیک آبخوان مشخص گردید که برای تعیین آن، مساحت لازم برای تامین آب چشمه تعیین گردید.

چله خانه علیا از سطح دریا ۱۹۵۸ متر می‌باشد ارتفاع چشمه از سطح دریا نیز به همین ترتیب برابر با ۱۳۵۳ متر است. جهت تعیین مقدار شیب سنگ بستر آهکی (α) پس از پیمایش‌های انجام گرفته و همچنین تهیه نیمرخ زمین‌شناسی این شیب ۶۵ درجه مشخص گردید. بنابراین بازه طولی برای چشمه چله خانه علیا ۱۲۷۰ متر محاسبه گردید. و در نهایت بازه عرضی محدوده حفاظتی با استفاده از رابطه ۷ برای محدوده مورد مطالعه ۵۸۰ متر برآورد شد.

با توجه به محدوده حوضه آبرگیر چشمه که بر اساس مطالعات بیان محاسبه شد، فاصله چشمه تا دورترین نقطه تغذیه ۱۲۳۰ متر می‌باشد که با بازه طولی بدست آمده انطباق قابل قبولی نشان می‌دهد. همچنین عرض متوسط حوضه که توسط بیان تعیین شده است ۶۰۵ متر می‌باشد که با بازه عرضی حوضه آبرگیر که از رابطه فوق بدست آمد همخوانی نشان می‌دهد.

بر اساس یافته‌های این پژوهش محدوده حفاظتی چشمه چله خانه علیا به دو قسمت زیر تقسیم شد. الف) محدوده هیدروژئولوژیکی بدست آمده از محاسبات بیان در اطراف چشمه چله خانه علیا که تامین کننده آب این چشمه می‌باشد و هر گونه برداشت از تراز بالای چشمه باعث کاهش دبی چشمه و یا ورود به این حریم باعث ورود آلودگی‌های صنعتی شده و باعث افت کیفیت آب زیرزمینی می‌شود. ب) مرز حفاظتی تعیین شده برای آهک‌های موجود در پایین‌تر از تراز چشمه چله خانه علیا (بخش غیر اشباع آهک‌های منطقه) که برداشت از این آهک‌ها تا عمق رسیدن به سطح ایستابی مجاز است. در غیر این صورت با برداشت بیش از اندازه و برخورد عمق برداشت به سطح ایستابی، سطح آب افت پیدا کرده و باعث کاهش دبی چشمه و خشک شدن آن خواهد شد (شکل ۸). مساحت حریم حفاظتی چشمه چله خانه ۱۸۴ هکتار برآورد گردید.

نتیجه‌گیری

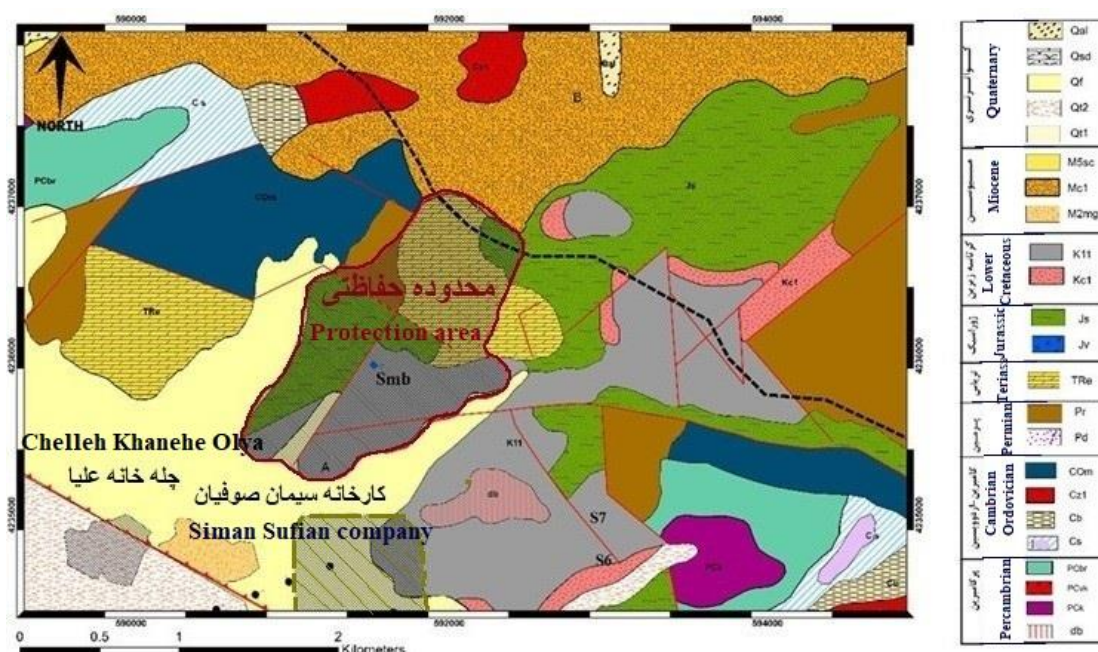
بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی و دبی نشان دهنده رابطه عکس این دو پارامتر در چشمه چله خانه علیا می‌باشد. لذا با افزایش مقادیر دبی، هدایت الکتریکی کاهش یافته و نشان از افزایش حجم مخزن، رقیق شدگی آبخوان و در نتیجه خروج آب‌های تازه از سیستم کارستی می‌باشد. بررسی هیدروگراف ایستگاه‌های مورد مطالعه در سال آبی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ نشان داد که سیستم غالب توسعه کارست در منطقه افشان می‌باشد زیرا آبدهی چشمه‌های منطقه کم بوده و پاسخ چشمه‌ها به بارش‌های رخ داده در طولانی مدت انجام شده است. تراکم بالای درز و شکستگی و عدم خلوص آهک از دلایل توسعه مجاری کارستی ضعیف در منطقه می‌باشد.

آن امتداد و شیب لایه‌ها، جنس واحدهای زمین‌شناسی و موقعیت گسل‌ها تعیین گردید. با استفاده از نیمرخ رسم شده بر روی چشمه چله خانه علیا (شکل ۱) وضعیت لایه‌ها نسبت به هم برای چشمه مورد نظر نمایش داده شد. این نیمرخ نشان داد که حوضه آبرگیر چشمه چله خانه علیا عمدتاً در سازند الیکا و شمشک واقع شده است. ارتفاع کلیه نقاط محدوده هیدروژئولوژیکی تعیین شده برای چشمه بالاتر از ارتفاع محل رخنمون چشمه تا محل خط الرأس است. پیمایش انجام شده و نیمرخ تهیه شده نشان می‌دهد که جهت لایه بندی آهک‌های الیکا در مرکز و جنوب کوه مورو به سمت جنوب می‌باشد. از طرف دیگر موقعیت واحد میوسن (Mc1) در مجاورت خط الرأس به گونه‌ای است که بخشی از سازند الیکا که در شمال خط الرأس قرار دارد می‌تواند جز حوضه آبرگیر چشمه چله خانه بوده و تامین کننده بخشی از آب چشمه باشد. بنابراین به احتمال زیاد مرز هیدروژئولوژیک حوضه آبرگیر چشمه چله خانه در آن سوی خط الرأس قرار گرفته است. در نتیجه در صورتی که مرز هیدروژئولوژیک مبنای تعیین حوضه آبرگیر چشمه قرار گیرد مساحت حوضه آبرگیر چشمه ۷۵۰۰۶۷ متر مربع خواهد بود که مقدار آن بعد از تعیین مرز و محاسبه آن در نرم‌افزار GIS، بسیار نزدیک به عدد محاسبه شده (۷۴۱۴۶۵ متر مربع) می‌باشد.

تعیین حریم حفاظتی کارخانه سیمان صوفیان

در محدوده مورد مطالعه با توجه به اینکه کارخانه سیمان صوفیان بخش اعظم مواد اولیه مصرفی را از آهک‌های کوه مورو برداشت می‌کند، لذا رعایت حریم منابع آب (سطحی و زیرزمینی) در این بخش از کوه مورو ضروری می‌باشد. بنابراین در این پژوهش اصول یک برنامه حفاظت از چشمه مورد بررسی قرار گرفت که طی آن حریم حفاظتی برای چشمه چله خانه جهت جلوگیری از کاهش سطح آب در اثر برداشت بیش از اندازه از آهک در نتیجه رسیدن عمق حفاری به تراز سطح ایستابی که می‌تواند منجر به کاهش دبی چشمه چله خانه و حتی خشک شدن آن شود. بدین منظور اطلاعات مربوط به دبی جریان خروجی از چشمه جهت تعیین بیان آبی آبخوان در طول مدت آبدهی (آبدهی سالیانه)، زمین‌شناسی و توپوگرافی منطقه نظیر شیب و عمق سنگ بستر و همچنین عکس هوایی جهت تعیین حریم چشمه‌ها و تخمین منابع و عوامل مؤثر در تغذیه منبع آبی چشمه مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر آن جهت تعیین و برآورد صحت اطلاعات موجود در روی نقشه‌ها و کسب اطلاعات دقیق‌تر مطالعات میدانی انجام گرفت. حدود منطقه حفاظتی یا حداکثر فاصله افقی محل تغذیه چشمه از مظهر از رابطه (۷) بدست آمد.

با استفاده از Google Earth حداکثر ارتفاع محل تغذیه چشمه



شکل ۸- محدوده حفاظتی تعیین شده برای کارخانه سیمان صوفیان
Figure 8- The designated protection area for Soufian Cement Company

از آهک در نتیجه رسیدن عمق حفاری به تراز سطح ایستابی، بایستی برداشت از بخش غیر اشباع آبخوان (آهک‌های غیر اشباع) صورت گیرد تا مانع کاهش دبی چشمه چله خانه و حتی خشک شدن آن شود. جهت بررسی دقیق تر خصوصیات آبخوان‌های منطقه پیشنهاد می‌گردد اندازه‌گیری‌های ماهانه دبی و هدایت الکتریکی به صورت مرتب و در موارد بارندگی بصورت روزانه از چشمه تامین کننده آب روستای چله خانه علیا صورت گیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد کارخانه سیمان صوفیان برای کنترل حریم حفاظتی و بررسی تغییرات سطح ایستابی در اثر برداشت آهک، چند پیژومتر در حداقل معدن و چشمه حفر و به صورت هفتگی پایش نماید و همچنین روش‌های غیر انفجاری برای برداشت آهک استفاده شود تا تکان‌های لرزه‌ای منجر به جابجایی شکستگی‌ها و گسل‌ها و در نتیجه کاهش آبدی چشمه چله خانه نشود.

بررسی منحنی فرود چشمه چله خانه علیا و همچنین ضریب تغییرات پارامترهای درجه کارست شدگی و نسبت دبی بیشینه به کمینه این موضوع را تایید نمود. تعیین حوضه آبرگیر چشمه چله علیا با استفاده از مطالعات زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، بیلان و روابط موجود نشان داد که مرز هیدروژئولوژیکی آبرگیر چشمه با مرز هیدروژئولوژیکی متفاوت است. مساحت حوضه آبرگیر چشمه چله خانه در حدود ۷۴ هکتار می‌باشد و بخشی از آب چشمه از شمال خط الرأس کوه مورو تامین می‌گردد. محدوده حریم حفاظتی چشمه چله خانه علیا که مجموع حوضه هیدروژئولوژیک و محدوده آهک‌های کرتا سه پایین‌تر از تراز مظهر چشمه می‌باشند، حدود ۱۸ هکتار برآورد گردید. بر اساس یافته‌های این پژوهش، کارخانه سیمان صوفیان برای برداشت آهک‌ها حق ورود به مرز هیدروژئولوژیک را نداشته و از طرف دیگر جهت جلوگیری از کاهش سطح آب در اثر برداشت بیش از اندازه

منابع

1. Alizadeh, A. (2013). *The principles of applied hydrology*. 36th Edition, Imam Reza (AS) University, Mashhad. (In Persian with English abstract)
2. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, Rome, Italy, 3
3. Asadian, A. (1991). Geological map of Tabriz (1:100000). Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran.
4. Bonacci O., & Andrić, I. (2015). Karst spring catchment: an example from Dinaric karst. *Environmental earth Sciences* 74(7): 6211-6223. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4644-8>.

5. Gadimi, M., Ahmadi, H., Moghimi, A., & Jafar Biglu, M. (2012). Hydrogeochemical investigation of Ashtrankuh karst springs related to the geological formations of the region, *Journal of Natural Resources of Iran* 67(2): 263-278. (In Persian)
6. Kand Chini, M. (2015). *Investigating actual evaporation and transpiration in Gilan province using Sabal algorithm and Landsat satellite images*, Master thieses in Hydrology and Meteorology, Faculty of Geography, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. (In Persian with English abstract)
7. Maillet, E. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Paris. 218 pp.
8. Maleki, A., Ovaisi, M., & Bagheri, A. (2016). Investigating the potential of ground water resources in the karst formation of Koh Khorin, Kermanshah, using GIS and geophysical methods. *Geography and Environmental Planning* 28(1): 135-150. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/GEP.2017.98020.0>.
9. Milanovic, P.T. (1981). *Karst Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton Co.
10. Ministry of Energy, guidelines for determining the quantitative boundaries (capture zone) of wells and Qanats, 2017, Number 747. (In Persian)
11. Paydar, R., Rezaei, M., Ashjari, J., & Afshar, S. (2015). *Determination of the water catchment area of Gurgor spring located in Ardabil province using estimated water budget method and MIF*, International Specialized Congress of Science and Earth, Tehran, Iran. (In Persian)
12. Rashed, K.A. (2012). *Assessing degree of karstification: A new method of classifying karst aquifers*, Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC 16 2012, Istanbul, Turkey.
13. Tavakkoli, S., & Kerami, G. (2021). The evaluation of dominant flow system and discharge mechanism of karst springs in West Mojen. *Iranian Water Research Journal* 15(1): 13-21. (In Persian with English abstract)
14. Zarvash, N., Vaezihir, A., Karimi, H., & Asghari Moghadam, A. (2014). *Comparison of underground water flow system for Sarab and Siah cow springs in Abdanan (Ilam province)*, 13th hydraulic conference. Tabriz, Iran. (In Persian)



Comparison of the Efficiency of Different Plants to Remove Total Petroleum Hydrocarbons from Oilfield Soils

N. Yari Nilavareh¹, A. Beheshti Ale Agha^{1*}, M. Karami³, M. Sadeghi⁴

Received: 31-05-2022

Revised: 30-09-2022

Accepted: 30-11-2022

Available Online: 30-11-2022

How to cite this article:

Yari Nilavareh, N., Beheshti Ale Agha, A., Karami, M., & Sadeghi, M. (2023). Comparison of the Efficiency of different Plants to Remove Total Petroleum Hydrocarbons from Oilfield Soils. *Journal of Water and Soil* 37(1): 31-43. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76982.1172>

Introduction

Crude oil is a complex combination of many hydrocarbon and non-hydrocarbon compounds, including heavy metals, which affect the physical and chemical properties of the soil, cause the soil particles to stick and connect and then cause the soil to become stiff and impenetrable. Contamination of soil with petroleum hydrocarbons is a significant environmental problem, which has received remarkable attention in recent decades. Petroleum hydrocarbons are resistant and hazardous pollutants. Some petroleum hydrocarbons such as benzene are mutagenic and carcinogenic materials for humans. There are many physical and chemical methods to remediate oil-contaminated soils. Phytoremediation is a relatively new technology for refining contaminated soils in which resistant plants are used to remove or reduce the concentration of inorganic, radioactive, and organic pollutants, especially petroleum compounds, from the environment.

Materials and Methods

Sufficient amounts of about 50 kg of soil contaminated with petroleum hydrocarbons were collected from regions (0-30 cm soil depth) adjacent to the oil wells west of Kermanshah province. Uncontaminated soil samples were also taken from sites at the lowest distance to the contaminated sites. The aim of this study was to compare the efficiency of different plants to remove total petroleum hydrocarbons from oilfield soils. In this study, after determining the total amount of petroleum hydrocarbons, the contaminated and uncontaminated soils were mixed in 4 treatments with different weight ratios (0, 10, 25, and 35%). This experiment was established as completely randomized design with 3 replications for 6 different plants (Barley, Grass, Alfalfa, Hemp, Camelina, and Vicia ervilia). One treatment without plant was considered to remove soil matrix effects on petroleum hydrocarbon concentrations. Plants were harvested at the end of their growing season (90-120 days). Soils and plant samples from the experimental pots were analyzed for their important properties (including some physiological characteristics of the plants, as well as the percentage of reduced petroleum hydrocarbons in the soils). The gravimetric method was used to determine the concentration of petroleum hydrocarbons in the soil. After measuring the properties of the soil and plant, the normality of the data was checked by the Anderson-Darling test, and the homogeneity of the variance of the treatments was checked by using Levene's test. Analysis of data variance was done using ANOVA and average data comparison was done using LSD test at 5 and 1 percent probability levels (SAS 9.4 and SPSS 26).

Results and Discussion

In general, the growth of most plants showed a decreasing trend in proportion to the increase in soil pollution levels. However, the growth decline rates of different plants were not similar. Camelina was very sensitive to oil pollution and the plant could not tolerate pollution even at 10% level. After camelina, alfalfa was highly sensitive

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

(*- Corresponding Author Email: beheshtiali97@gmail.com)

3- Ph.D. in Soil Sciences, Department of Soil Science, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

4- Assistant Professor, Department of Analytical Chemistry, Razi University, Kermanshah, Iran

to oil pollution. The highest dry weight of the aerial parts of the hemp plant in the soil without oil contamination was observed at the rate of 111.22 grams in the pot. The leaf area of all studied plants in contaminated soils decreased compared to the control treatment (without contamination) so with the increase in the percentage of contamination, the leaf area of the plants was significantly reduced. The highest amount of leaf surface was observed in unpolluted soil and in the hemp plant. Except for the Camelina plant, which was completely destroyed at different levels of pollution, the rest of the plants showed a noticeable decrease in growth. The total petroleum hydrocarbons in soil were measured again 120 days after the start of cultivation, and its difference with the total amount of petroleum hydrocarbons at the beginning of cultivation was determined as the reduction of petroleum hydrocarbons and reported as a percentage. According to the mean comparison results, the percentage of reduced petroleum hydrocarbons was not significantly different among cultivated and non-cultivated treatments, although, it was significantly affected by soil pollution levels. Since all the studied soils contained natural bacteria and were not sterilized, the eliminated part of petroleum hydrocarbons is probably decomposed and removed by native bacteria in the soils. Therefore, the strengthening of native bacteria in these soils may increase the decomposition and degradation of petroleum hydrocarbons.

Conclusion

The results of this research show that the presence of petroleum hydrocarbons in the soil caused a decrease in growth and other physiological characteristics in all studied plants. Although the Camelina was able to germinate in soils contaminated with petroleum hydrocarbons, the presence of these pollutants in the soil prevented the optimum growth of the plant, so its use in subsequent studies of phytoremediation of oil-contaminated soils, was not recommended. The results showed that there is no statistically significant difference between cultivated and non-cultivated treatments at different pollution levels, and the reduction of the total petroleum hydrocarbons in the soil was probably done by native microorganisms in the soil. It is recommended to take into consideration the efficiency of the plant species used, the type of polluting hydrocarbons, and the duration of contamination in future research to obtain better results.

Keywords: Alfalfa, Bioremediation, Grass, Oil, Phytoremediation, Pollutants

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۲، ص ۴۳-۳۱

مقایسه کارایی گیاهان مختلف در حذف هیدروکربن‌های نفتی کل از خاک‌های مناطق نفت‌خیز

نقشه‌ی یاری نیلاوره^۱ - علی بهشتی آل آقا^{۲*} - مهین کرمی^۳ - مرضیه صادقی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۰

تاریخ بارنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

چکیده

آلودگی خاک با هیدروکربن‌های نفتی یک مشکل زیست‌محیطی مهم است. روش‌های فیزیکی و شیمیایی متعددی برای مقابله با آلودگی‌های نفتی در خاک وجود دارد. گیاه‌پالایی یک فناوری نسبتاً نوین پالایش خاک‌های آلوده است که در آن از گیاهان مقاوم و مناسب جهت حذف یا کاهش غلظت آلاینده‌ها از محیط زیست استفاده می‌شود. در این پژوهش، خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی از اطراف چاه‌های استخراج نفت غرب استان کرمانشاه برداشت شد. محل نمونه‌برداری خاک غیر آلوده کم‌ترین فاصله را با محل نمونه‌برداری خاک آلوده داشت. پس از تعیین مقدار کل هیدروکربن‌های نفتی در خاک‌های آلوده، خاک‌های آلوده با خاک غیر آلوده در ۴ نسبت وزنی مختلف (صفر، ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصد آلودگی) با یکدیگر مخلوط شدند. سپس بذر ۶ گیاه مختلف (جو، چمن، یونجه، شاهدانه، گاوآینه و کاملینا) در ۳ تکرار در گلدان‌ها کشت شدند. پس از اتمام دوره کشت، گیاهان برداشت و برخی ویژگی‌های فیزیولوژیک گیاهان و همچنین درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی در خاک اندازه‌گیری شدند. به‌طور کلی رشد اکثر گیاهان روند کاهشی متناسب با افزایش میزان آلودگی خاک از خود نشان داد، اما این کاهش رشد در گیاهان مختلف متفاوت بود. گیاه کاملینا اگرچه قادر به جوانه‌زنی در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی بود اما وجود این آلاینده‌ها در خاک مانع از رشد و عملکرد مناسب گیاه شد، بنابراین استفاده از آن در مطالعات بعدی گیاه‌پالایی خاک‌های آلوده به نفت، توصیه نمی‌شود. طبق نتایج مقایسه میانگین‌ها، درصد هیدروکربن‌های نفتی در تیمارهای کشت شده، تفاوت آماری معنی‌داری با تیمار بدون کشت نداشت و از آنجایی که کل خاک‌های مورد بررسی استریل نشده و دارای باکتری‌های بومی بودند پس احتمالاً تجزیه و حذف هیدروکربن‌ها توسط باکتری‌های بومی موجود در خاک صورت گرفته است. از این رو احتمال می‌رود که تقویت باکتری‌های بومی در این گونه خاک‌ها باعث افزایش تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی شود.

واژه‌های کلیدی: آلاینده، چمن، زیست‌پالایی، گیاه‌پالایی، نفت، یونجه

مقدمه

هیدروکربن‌های نفتی مخلوطی از مواد شیمیایی هستند که در اثر فعالیت‌های انسانی در طی فرایندهای نفتی در صنعت و حمل و نقل ایجاد می‌شوند که تعدادی از آن‌ها از دو یا بیش از دو حلقه بنزنی تشکیل شده‌اند. هیدروکربن‌های نفتی یکی از آلودگی‌های عمده در محیط زیست مناطق نفتی بوده هستند و بر زندگی بسیاری از موجودات زنده تاثیرگذار است (Huang et al., 2005)، وجود این نوع آلاینده‌ها در طبیعت به دلیل سمی بودن، سرطان‌زایی و ایجاد تغییرات جهش‌زایی در ژن، نگرانی‌های بسیاری را سبب شده است (Cupers

آلودگی خاک با مجموعه هیدروکربن‌های نفتی (TPHs) یک مسئله زیست‌محیطی بسیار مهم به‌ویژه در اطراف پالایشگاه‌ها و ایستگاه‌های بهره‌برداری از نفت می‌باشد که در چند دهه اخیر به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است (Kamath et al., 2004). آلودگی خاک به نفت به دلایل مختلف مانند استخراج، حمل و نقل، قطع و شکستگی خطوط لوله نفت، پالایش و مصرف رخ می‌دهد (Scott, 2003; Peng et al., 2009; Budhadev et al., 2012).

۱ و ۲- به‌ترتیب کارشناسی ارشد مدیریت منابع خاک و دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(*)- نویسنده مسئول: (Email: beheshtiali97@gmail.com)

۳- دکتری علوم خاک، گروه علوم خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران

۴- استادیار گروه شیمی تجزیه، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

ریز جانداران، جذب ترکیبات نفتی، ترشح آنزیمهای تجزیه کننده میتوانند باعث کاهش نفت از خاک شوند (Martin et al., 2014).

نی و همکاران (Nie et al., 2009) مشاهده کردند که ریشه گیاهان با افزایش تعداد و تنوع جمعیت میکروبی تجزیه کننده هیدروکربن های نفتی در ناحیه ریزوسفر، باعث افزایش تجزیه آلاینده ها می شوند. علاوه بر این، جمعیت های میکروبی از طریق چرخه عناصر و انحلال برخی عناصر و همچنین تأمین ویتامین ها، اسیدهای آمینه و برخی هورمون های محرک رشد، رشد گیاه را تحریک می نمایند. این برهم کنش متقابل و مثبت بین گیاه و میکروب ها پدیده ای کاملاً شناخته شده در روابط خاک-گیاه است (Rajaei et al., 2012). شیم و همکاران (Shim et al., 2000) نیز با مطالعات خود این نتایج را تأیید و دلیل این امر را ترشحات ریشه گیاهان دانستند که حاوی ترکیبات آلی مانند گلوکز، آنزیم و کربوهیدرات های پیچیده و منبعی مناسب از کربن و انرژی برای میکروارگانیسم های ناحیه ریشه است و بدین طریق تجزیه ترکیبات نفتی افزایش می یابد.

زو و همکاران (Xu et al., 2005) در مطالعات خود به نقش مؤثر حضور پوشش گیاهی ذرت و رای گراس در کاهش ۹۸ و ۹۵ درصدی غلظت فناترن و پابرن در خاک آلوده طی یک دوره ۶۰ روزه اشاره کردند. در مطالعه دی اورازیو و همکاران (Dorazio et al., 2013) بر روی گیاه پالایای خاک آلوده به پیرن با استفاده از ۳ گونه گیاهی مختلف، مشخص شد میزان حذف پیرن در خاک کشت شده با گیاهان ۳۰ درصد و در خاک شاهد (بدون گیاه) فقط ۱۸ درصد بود. نتایج مطالعات شهریاری و همکاران (Shahriari et al., 2006) نشان داد که حضور گیاه توانسته است در تجزیه زیستی نفت مؤثر باشد. این تأثیر در نمونه هایی که غلظت نفت در آن ها کمتر بود با بازدهی بهتری انجام شد و با توجه به کاهش بیش تر نفت در نمونه ها در ۳۰ روز اول نسبت به ۶۰ و ۱۲۰ روز چنین پیشنهاد کردند که عامل تبخیر ترکیبات فرار موجود در نفت و تجزیه زیستی دو عاملی هستند که سبب کاهش نفت در ۳۰ روز اول شدند، ولی عامل تبخیر در روزهای ۶۰ و ۱۲۰ آن چنان مؤثر نبود و تجزیه زیستی عامل اصلی کاهش نفت از خاک گردید. کشت گیاه *Bassia scoparia* L. موجب کاهش ۵۷/۷ درصدی نفت خام در خاک هایی با آلودگی ۱ درصد نفت خام شد (Moubasher et al., 2015).

هاتچینسون و همکاران (Hutchinson et al., 2000) میزان حذف TPHs در تیمارهای کشت شده با گیاه و بدون گیاه تال فستوکا (خانواده گیاهان چمنی) را به ترتیب ۳۵ و ۱۸ درصد گزارش کردند. در مطالعه سدريک و همکاران (Cedric et al., 2007) مشخص شد که چمن بیش ترین و وسیع ترین بیوماس ریشه و بیش ترین مقدار سطح تماس ریشه در واحد حجم را دارد. گونه های گیاهی مثل یونجه،

(et al., 2002). این دسته از آلاینده های آلی دوام بالایی در خاک دارند و وجود آن ها در خاک، خطر انتقال به منابع آب، مسمومیت و بیماری انسان و سایر موجودات زنده را به در پی خواهد داشت (Besalatpour et al., 2008).

نفت خام ترکیبی پیچیده از هزاران ترکیب هیدروکربنی (Peng et al., 2009) و غیر هیدروکربنی از جمله فلزات سنگین (Akaninwor et al., 2007) است که بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک به ویژه آب خاک تأثیر گذاشته (Chupakhina and Maslennikov, 2004; Gaskin and Benthams, 2010) و سبب چسبندگی و اتصال ذرات خاک می شود و به دنبال آن موجب سخت و غیرقابل نفوذ شدن خاک، کاهش زهکشی آب و انتشار اکسیژن می گردد (Luepromchai et al., 2007; Anigboro and Tonukari, 2008; Baek et al., 2004). از جمله اختلالات خاک به دلیل تهویه ناقص (Victor and Sadiq, 2004) ناشی از جایگزینی هوای خاک با نفت، فعالیت ریز جانداران غیر هوازی، اختلال در توازن آب در سیستم خاک-گیاه، سمیت ناشی از سولفیدها و زیادی منگنز آزاد شده در تجزیه هیدروکربن ها می باشد. این اختلالات منجر به تغییر ویژگی های فیزیکی، مورفولوژیک و شیمیایی خاک می شود که در نتیجه آن نیترات، فسفر قابل دسترس و کلسیم کاهش می یابد (Chupakhina and Maslennikov, 2004).

به طور معمول فناوری هایی که برای اصلاح خاک استفاده میشوند شامل موارد زیر هستند: روش های فیزیکی (سوزاندن، ابزارهای جمع کننده و غیره) و شیمیایی (استخراج از طریق حلال ها و غیره) که جهت حذف سریع آلاینده ها به کار برده می شود به دلیل گران قیمت بودن و تجزیه ناقص آلاینده ها، کارایی محدود دارند. و بیشتر توجهات به روش زیستی (تهویه زیستی، افزایش زیست توده میکروبی و غیره) برای حذف آلاینده های آلی در خاک معطوف است (Shekoohiyan et al., 2016; García-Sánchez et al., 2018).

اگرچه گیاهان و ریز جانداران می توانند هیدروکربن های نفتی را مستقل از یکدیگر تجزیه کنند ولی تحقیقات نشان می دهد که تعامل بین گیاهان و ریز جانداران (ریزوسفر) همواره به عنوان مکانیسم اولیه تجزیه در فرآیند گیاه پالایی مطرح است (Hutchinson et al., 2001). مطالعات نشان می دهند که تخریب هیدروکربن های نفتی در ناحیه ریزوسفر نسبت به سایر قسمت های خاک بیش تر است و گیاهان با سیستم ریشه ای گسترده برای تجزیه زیستی این ترکیبات مفید می باشند. وجود پوشش گیاهی به علت بهبود ویژگی های خاک به وسیله ریشه گیاه و افزایش فعالیت میکروبی خاک، ممکن است باعث افزایش فرآیند پالایش گردد (Jussila, 2006; Smits, 2005). گیاهان نه تنها سوبسترا و ساختار خاک را تحت تأثیر قرار میدهند بلکه میتوانند ترکیبات نفتی را در خاک تجزیه کنند (Caudle and Maricle, 2014). گیاهان با مکانیسم های مختلف مانند تحریک

این تیمارها به ترتیب شامل، تیمار صفر ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصد (به ترتیب C1، C2، C3 و C4) مخلوط وزنی خاک آلوده (با ۲۱/۰۵ درصد آلودگی نفتی) به علاوه خاک بدون آلودگی بودند. توده خاک مورد نظر به‌خوبی به هم زده شد تا آلودگی نقاط مختلف آن تا حد ممکن همگن گردد. بعد از مخلوط کردن کامل خاک‌های بدون آلودگی و آلوده با نسبت‌های مختلف، اجازه داده شد تا این تیمارها به مدت ۴ هفته در هوای آزاد باقی بمانند و میزان رطوبت نیز ۶۰ درصد ظرفیت مزرعه نگهداشته شد تا خاک‌ها به‌طور کامل با یکدیگر برهمکنش داده و به تعادل برسند.

در نمونه‌های خاک، بافت به روش پیپت (Dewis and Freitas, 1984)، قابلیت هدایت الکتریکی و واکنش خاک در عصاره گل اشباع (Rhoades, 1982)، درصد کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Walkley and Black, 1974)، فسفر قابل جذب به روش اولسن (Olsen and Sommers, 1982)، پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم و قرائت با فلیم فتومتر (Oster and Garrison, 1980)، نیتروژن کل به روش کلدال (Bremner and Mulvaney, 1982) و آهک به روش تیتراسیون با سود (Black et al., 1965) تعیین شدند. اندازه‌گیری غلظت قابل جذب عناصر آهن، روی، مس و منگنز به روش عصاره‌گیری با DTPA (Lindsay and Norvell, 1978) و تعیین کل هیدروکربن‌های نفتی در خاک به روش گراویمتری (Villalobos et al., 2008) قبل از کاشت انجام گردید. مقدار کربن آلی خاک پس از کسر کردن هیدروکربن‌های نفتی از مقدار کربن آلی به‌صورت درصد گزارش گردید.

این آزمایش در گلدان به صوت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با داشتن ۴ تیمار آلودگی نفتی (سطوح صفر، ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصد) و برای ۶ گیاه (جو، چمن، یونجه، شاهدانه، گاودانه و کاملینا) و ۱ تیمار بدون گیاه و در ۳ تکرار انجام شد. خاک آماده شده تیمارها در گلدان ریخته شده و سپس بذر گیاهان در عمق ۱ تا ۳ سانتی‌متری بسته به نوع گیاه کشت شدند. آبیاری به‌طور مرتب ۲ بار در هفته به‌طوری‌که آب از ته گلدان‌ها خارج نشود و با حجم یکسان انجام شد. برای هریک از سطوح آلودگی خاک مورد مطالعه، خاک بدون کشت گیاه نیز جهت حذف اثرات محیطی بر غلظت آلاینده‌های نفتی در نظر گرفته شد.

شبدر و فستوکا نیز به دلیل داشتن همین ویژگی‌ها نقش زیادی در فرآیند تجزیه آلاینده‌های نفتی دارند. نتایج حاصل از کشت دو گیاه لگومی باقلا و لوپین سفید و گیاه غیر لگومی بادمجان در خاک بیابان‌های آلوده به نفت در کویت نشان داد که دو گیاه لگومی باقلا و لوپین سفید کارایی بیشتری در حذف آلودگی نفتی نسبت به گیاه غیر لگوم داشتند. در خاک‌های کشت شده با باقلا، لوپین سفید و بادمجان به ترتیب ۷۷، ۸۵ و ۵۵ درصد از آلودگی نفتی کاسته شد. همچنین حذف و برداشت نفت در آب اطراف ریشه‌های گره‌دار نسبت به ریشه‌های بدون گره بیشتر است. به‌علاوه باکتری‌های ریزوبیوم که باکتری هم‌زیست با لگوم‌ها می‌باشد مقدار وسیعی از هیدروکربن‌های آروماتیک و آلفاتیک نفت خام را به‌عنوان منبع کربن و انرژی مصرف می‌کنند (Dashti et al., 2009).

با توجه به این که ایران یکی از کشورهای نفت‌خیز جهان است. هر سال مقدار زیادی نفت از مخازن نفتی استخراج و در مناطق دیگر پالایش می‌گردد که معمولاً در نزدیکی زمین‌های کشاورزی است. ورود هیدروکربن‌های نفتی به خاک یک محرک منفی برای رشد و نمو گیاهان و جانوران بوده و بر سلامت انسان تأثیر نامطلوبی دارد. با توجه به فعالیت‌های گسترده صنایع نفت در استان کرمانشاه ضرورت انجام مطالعات زیست‌محیطی جهت پالایش خاک‌های آلوده در این منطقه احساس شده و استفاده از فناوری‌های جدید مانند گیاه‌پالایی می‌تواند در کاهش یا حذف این ترکیبات از خاک مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

خاک آلوده به هیدروکربن‌های نفتی (با توجه به عمق معمول مؤثر در فرآیند گیاه‌پالایی) از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک اطراف چاه‌های استخراج نفت منطقه نفت‌خیز غرب استان کرمانشاه با سابقه طولانی مدت آلودگی با مختصات جغرافیایی ۳۳/۹۸ درجه شمالی و ۴۵/۵۰ درجه شرقی برداشت گردید. محل نمونه‌برداری خاک غیر آلوده به نحوی انتخاب شد که کم‌ترین فاصله را تا محل نمونه‌برداری خاک آلوده داشته باشد تا بافت و سایر ویژگی‌های دو نمونه بیش‌ترین شباهت را با یکدیگر دارا باشند (جدول ۱). خاک آلوده دارای ۲۱/۰۵ درصد آلودگی و خاک غیر آلوده فاقد آلودگی نفتی بود. نمونه خاک‌ها پس از هوا خشک شدن به‌منظور تعیین سطوح آلودگی مختلف در ۴ تیمار با ۴ نسبت وزنی مختلف با هم مخلوط گردیدند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک قبل از کشت

Table 1- Physical and chemical properties of the soil before cultivation

خاک	Sand	Silt	Clay	Texture	P	K	N	EC	pH	OC	CaCO ₃	Zn	Cu	Fe	Mn
Soil	%	%	%	-	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	%	dS m ⁻¹	-	%	%	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg kg ⁻¹
غیر آلوده Non-contaminated	62.2	33.9	3.9	sandy loam	14	80	0.17	2.5	7.3	0.17	26.5	0.52	0.36	20.4	22.6
آلوده Contaminated	61.5	34	4.5	sandy loam	28	60	0.18	5	6.65	0.18	14.5	0.34	0.28	23.16	8.6

کود کامل (۲۰-۲۰-۲۰)، ۳ مرتبه در طول دوره با غلظت ۳ گرم در لیتر همراه با آب آبیاری برای همه گلدان‌ها (کشت شده و کشت نشده) مورد استفاده قرار گرفت. دوره کشت گیاهان ۳ الی ۴ ماه به طول انجامید و پس از پایان این دوره به منظور اندازه‌گیری وزن خشک گیاه، اندام هوایی و ریشه، گیاهان از خاک خارج و ریشه‌ها با آب شستشو داده شدند تا خاک از ریشه جدا گردد. سپس شستشوی مجدد با آب مقطر انجام شد. اندام هوایی و ریشه به‌طور جداگانه به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۵۵ درجه سانتی‌گراد در آون فن دار خشک و توزین شدند. صفات فیزیولوژیک، سطح برگ و محتوای نسی آب برگ به روش دیازپرز و همکاران (Diaz-Perez et al., 2006) تعیین شدند. برای تعیین غلظت هیدروکربن‌های نفتی خاک به روش گراویمتری (Villalobos et al., 2008) عمل شد. مقدار نفت استخراج شده از هر نمونه با مقدار نفت اولیه خاک قبل از کاشت مقایسه شده و کاهش آن به‌صورت درصد تعیین شد. پس از تجزیه‌های آزمایشگاهی، داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و SPSS 26 پس از احراز و تأمین پیش‌شرط‌های تجزیه واریانس (توزیع نرمال داده‌ها با استفاده از آزمون اندرسون-دارلینگ^۱ و همگن بودن واریانس تیمارها با استفاده از آزمون له وون^۲ بررسی شد) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. میانگین‌ها با استفاده از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد مقایسه شدند.

نتایج و بحث

تأثیر آلاینده‌های نفتی بر صفات فیزیولوژیک گیاهان مورد مطالعه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد که تأثیر نوع گیاه و سطح آلودگی و اثرات متقابل تیمارها بر صفات فیزیولوژیک گیاه شامل محتوای نسبی آب برگ، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، سطح برگ، ارتفاع گیاه و قطر ساقه در سطح احتمال پنج و یک درصد معنی‌دار بودند (جدول ۲).

نتایج نشان داد که بیشترین محتوای آب برگ در گیاه چمن و کمترین محتوای آب برگ در گیاه کاملینا مشاهده شد. گیاه کاملینا به سطوح آلودگی مقاوم نبوده و در طی دوره کشت از بین رفت. پس از آن گیاه گاودانه کمترین محتوای آب برگ را در سطوح مختلف آلودگی نشان داد (جدول ۳). در اغلب گیاهان با افزایش سطح آلودگی محتوای آب برگ گیاهان مختلف کاهش یافت ولی گیاه گاودانه نسبت به بقیه گیاهان مقاوم تر بوده و تا سطح ۲۵ درصد توانایی تحمل آلودگی را دارد (جدول ۳).

با افزایش سطح آلودگی نفتی در خاک میزان وزن خشک اندام هوایی و ریشه کاهش یافت و این کاهش در سطوح ۲۵ و ۳۵ درصد سطح آلودگی در همه گیاهان بیشتر بود همچنین گیاه کاملینا به‌سیار حساس به آلودگی نفتی بود و گیاه توانایی تحمل آلودگی حتی در سطح ۱۰ درصد را نداشت. پس از کاملینا گیاه یونجه به شدت به آلودگی نفتی حساسیت نشان داد. بیشترین وزن خشک اندام هوایی در گیاه شاهدانه در خاک بدون آلودگی نفتی به میزان ۱۱۱/۲۲ گرم در گلدان مشاهده گردید (جدول ۳). نتایج تحقیقات ادوای (Adavi, 2011) در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به ضایعات نفتی اطراف پالایشگاه نفت اصفهان توسط ده رقم چمن برموداگراس نشان داد که کاهش وزن خشک اندام هوایی در همه ارقام چمن برموداگراس مورد مطالعه در تیمارهای آلوده نسبت به تیمار شاهد وجود داشت و با افزایش غلظت آلودگی روند کاهش وزن خشک اندام هوایی مشاهده شد. همچنین بینت و پورتال (Bint and Portal, 2000) با بررسی وزن خشک اندام هوایی گیاه و ریشه گیاه علف چاودار در خاک آغشته به ترکیبات نفتی دریافتند که وجود این ترکیبات در خاک باعث کاهش وزن خشک اندام هوایی گیاه و ریشه می‌شود.

چمن گیاهی با ریشه افشان بوده و بیشترین میزان خشک ریشه در گیاه چمن در سطوح صفر و ۱۰ درصد آلودگی مشاهده شد. با افزایش آلودگی میزان وزن خشک ریشه کاهش یافت (جدول ۳). در سطح آلودگی کم برای گیاهان چمن و گاودانه تفاوت معنی‌دار در مقایسه با تیمار فاقد آلودگی مشاهده نشد اما در سطوح بالاتر آلودگی همانند مابقی گیاهان روند کاهش وزن خشک ریشه به‌طور چشم‌گیری مشهود بود (جدول ۳). به نظر می‌رسد که مسمومیت ناشی از وجود ترکیبات نفتی در خاک از یک سو و اثر این آلاینده‌ها بر قابلیت جذب آب و عناصر غذایی از سوی دیگر، مانع از رشد مناسب و تفاوت رشد ریشه و اندام هوایی گیاهان مورد مطالعه شده است (Chaineau et al., 1997). فرزامی سپهر و همکاران (Farzami Spehr et al., 2013) در مطالعه گیاه پالایی گیاه علف داسه در پالایش‌خاک‌های آلوده به نفت نشان دادند که وزن خشک ریشه در تیمارهای ۱۰ و ۲۰ درصد خاک آلوده تفاوت آماری معنی‌دار با تیمار شاهد نداشته اما در سطوح بالاتر آلودگی این تفاوت معنی‌دار بود. همچنین تحقیقات مرکل و همکاران (Merkel et al., 2005) در ارزیابی گیاه پالایی گیاهان چمنی و لگومی برای پالایش خاک‌های آلوده به نفت بعد از گذشت ۱۸۰ روز نشان داد که تولید ماده خشک ریشه گیاهان به‌طور چشم‌گیری در خاک‌های آلوده به نفت نسبت به خاک شاهد کاهش یافت.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر صفات فیزیولوژیک گیاهان
Table 2- The analysis of variance of data on physiological traits of plants

منابع تغییرات Sources of variance	df	میانگین مربعات (MS)				
		محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of aerial parts	وزن خشک ریشه Dry weight of roots	سطح برگ Leaf surface	ارتفاع گیاه Plant height
سطوح آلودگی Pollution levels	3	780.68 *	2623.92 **	45.27 **	254084.786 **	1232.57 **
نوع گیاه Plant type	5	9878.03 *	1478.58 **	92.87 **	193897.689 **	2439.57 **
سطوح آلودگی × نوع گیاه Pollution levels × plant type	15	640.98 *	1377.98 **	16.31 **	187973.358 **	202.53 **
خطای آزمایشی Error	47	9.64	0.73	0.10	92.978	0.96

*** و * به ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار و ns اختلاف معنی‌دار نیست.
***and * significant at 1% and 5% and ns, not significant respectively.

جدول ۳- اثرات متقابل تیمارهای آزمایش بر صفات مروفولوژیک گیاهان
Table 3- Interaction of treatments on physiological traits of plants

اثرات متقابل تیمارها Interaction of treatments		محتوای نسبی آب برگ Leaf relative water content	وزن خشک اندام هوایی Dry weight of aerial parts	وزن خشک ریشه Dry weight of roots	سطح برگ Leaf surface	ارتفاع گیاه Plant height	قطر ساقه Stem diameter
		%	g/pot		cm ²	cm	mm
جو Barley	0	93.04 a	28.52 a	4.93 a	206.67 a	53.77 a	14.15 a
	10	92.15 ab	17.31 b	3.93 b	159 b	43.88 b	10.32 b
	25	90.54 b	14.20 c	3.82 b	157.67 b	42.11 bc	6.07 c
	35	90.16 b	12.43 d	3.51 b	131.33 c	40.11 c	5.25 c
چمن Grass	0	94.34 ab	18.73 a	11.96 a	99.67 a	35 a	17.80 a
	10	95.70 a	13.51 b	11.14 a	73.50 b	33.5 a	15.45 b
	25	94.24 ab	4.96 c	3.64 b	21.33 c	21.83 b	4.41 c
	35	93.15 b	3.60 d	1.85 c	18 c	12.02 c	3.57 c
یونجه Alfalfa	0	88.62 a	0.87 a	0.83 a	15 a	7.66 a	2.47 a
	10	86.91 a	0.55 b	0.45 b	10.73 b	7.41 a	1.85 b
	25	88.33 a	0.14 c	0.26 c	6.93 c	6.07 b	1.59 c
	35	86.92 a	0.08 d	0.13 c	4.5 d	4.65 c	1.14 d
شاهدانه Hemp	0	87.09 a	11.22 a	7.93 a	1272 a	43 a	9.64 a
	10	82.85 ab	0.69 b	0.19 b	19.33 b	8.61 b	1.80 b
	25	79.06 ab	0.58 b	0.16 b	14.43 b	6.13 c	1.71 b
	35	74.93 b	0.69 b	0.15 b	11.17 b	7.5 bc	1.30 b
گاودانه Vicia evilia	0	80.75 b	3.80 a	0.25 a	28 a	15.61 a	1.69 a
	10	82.99 ab	2.99 b	0.21 ab	26.17 ab	15.08 a	1.65 ab
	25	84.17 a	2.22 c	0.17 bc	24.83 b	13.99 b	1.40 ab
	35	80.33 b	1.54 d	0.15 c	24 b	13.40 b	1.42 b
کاملینا Camellina	0	72.78 a	6.29 a	1 a	36.31 a	33.2 a	2.57 a
	10	0 b	0 b	0 b	0 b	0 a	0 b
	25	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b
	35	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b	0 b

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

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the LSD tests.
Pollution levels (C1 = 0, C2 = 10, C3 = 25 and C4 = 35%)

درصد آلودگی سطح برگ گیاهان کاهش محسوسی داشت. بیشترین مقدار سطح برگ در خاک بدون آلودگی و در گیاه شاهدانه مشاهده

سطح برگ در همه گیاهان مورد مطالعه در خاک‌های آلوده نسبت به تیمار شاهد (بدون آلودگی) کاهش یافت به طوری که با افزایش

آلوده به هیدروکربن‌های نفتی اطراف دریاچه پسماند و ضایعات پالایشگاه نفت تهران نشان داد که در تیمارهای ۱۰ الی ۳۰ درصد خاک آلوده، این گیاه از لحاظ ارتفاع اندام هوایی دارای افزایش نسبت به تیمار شاهد (فاقد آلودگی) بود. این امر نشان می‌دهد که ریزجاندانان ریزوسفری در این تیمارها باعث تجزیه هیدروکربن‌های نفتی شده و از آن‌ها به عنوان منبع کربن و انرژی سود می‌برند و در نتیجه باعث افزایش ارتفاع اندام هوایی گردیده‌اند اما در غلظت‌های ۴۰ و ۵۰ درصد خاک آلوده، کاهش رشد گیاه احتمالاً به علت سمیت هیدروکربن‌های نفتی برای گیاه و ریزجاندانان ریزوسفری می‌باشد.

هیدروکربن‌های نفتی خاک

نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقدار نفت خام کل خاک کاملاً آلوده نشان داد که خاک برداشته شده از منطقه آلوده به ترکیبات نفتی، به طور میانگین حاوی ۲۱/۰۵ درصد TPHs بر اساس وزن خاک خشک می‌باشد. میزان کل هیدروکربن‌های نفتی موجود در خاک، ۱۲۰ روز پس از شروع کشت مجدداً اندازه‌گیری شد و تفاوت آن با مقدار کل هیدروکربن‌های نفتی در شروع کشت به عنوان مقدار کاهش هیدروکربن‌های نفتی مشخص و به صورت درصد گزارش شد. نتایج حاصل از مقایسه میانگین درصد آلودگی نفتی حذف شده در تیمارهای تحت کشت و بدون کشت در جدول ۴ نشان داده شده است. به دلیل آن که گیاه کاملاً فاقد عملکرد زیست توده گیاهی بود از بررسی اثر کشت این گیاه بر کاهش غلظت TPHs در تیمارهای آلوده صرف نظر شد. نتایج تجزیه واریانس درصد تجزیه و تخریب TPHs در تیمارهای خاک‌های آلوده بیان‌گر نقش مؤثر سطح آلودگی بر افزایش میزان تجزیه و تخریب TPHs و عدم تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش این آلاینده‌ها در خاک بوده است.

اثر متقابل سطح آلودگی و نوع گیاهان بر افزایش تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی در خاک نیز معنی‌دار نشد. مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که میانگین درصد TPHs کاهش یافته خاک در ناحیه ریشه در تیمارهای تحت کشت با گیاهان، در مقایسه با تیمارهای بدون کشت بعد از دوره ۱۲۰ روزه کشت تفاوت آماری معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد نداشته است. نتایج نشان می‌دهد که تیمارهای با آلودگی کمتر در مقایسه با تیمارهای با آلودگی شدیدتر، درصد نفت حذف شده بیش‌تری داشته است.

همچنین کم‌ترین درصد حذف نفت در تیمارهایی با آلودگی شدید بود. به عبارتی با افزایش غلظت آلودگی نفتی، میزان تجزیه آن نیز کاهش می‌یابد. بیش‌ترین درصد کاهش هیدروکربن‌های نفتی در تیمار با آلودگی کم و تحت کشت جو و کم‌ترین درصد کاهش آلودگی در تیمار با آلودگی شدید و تحت کشت یونجه بوده است (جدول ۵).

شد. به جز گیاه کاملینا که در سطوح مختلف آلودگی به طور کامل از بین رفت بقیه گیاهان کاهش محسوسی در رشد نشان دادند. کمترین سطح برگ برای گیاه چمن و در آلودگی ۳۵ درصد اندازه‌گیری گردید (جدول ۳). اومسون و همکاران (Omosun et al., 2008) گزارش کردند که آلودگی نفت خام باعث کاهش شاخص‌های رشد گیاه مثل ارتفاع، تعداد برگ، سطح برگ، وزن خشک و تر گیاه و بیومس ریشه شده است.

با افزایش سطح آلودگی نفتی ارتفاع همه گیاهان به طور معنی‌داری کاهش یافت. در گیاهان چمن، یونجه و گاودانه در سطح آلودگی کم (۱۰ درصد) تفاوت آماری معنی‌داری با تیمار شاهد (فاقد آلودگی) مشاهده نشد اما در سطوح بالاتر آلودگی (۳۵ درصد) این تفاوت نمایان بود. کاملینا توانایی مقاومت در برابر آلودگی را نداشت. ارتفاع گیاه شاهدانه بیش‌ترین تأثیر را نسبت به سطوح آلودگی نشان داد و بین تیمارهای آلودگی و شاهد اختلاف معنی‌داری وجود داشت (جدول ۳). پنگ و همکاران (Peng et al., 2009) در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به نفت با کشت گیاه لاله عباسی شاهد روند کاهش رشد گیاه با افزایش درصد آلودگی نفتی خاک بودند. مطالعات بودهاو و همکاران (Budhadev et al., 2012) نیز نشان داد بین ارتفاع گیاه و همچنین زیست توده گیاهی در خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی و خاک غیر آلوده در سراسر طول دوره ۳۶۰ روزه کشت، اختلاف چشم‌گیری وجود دارد.

نتایج نشان می‌دهد که تیمار شاهد از لحاظ قطر ساقه در همه گیاهان (به جز گاودانه) تفاوت آماری معنی‌داری با تیمارهای آلوده داشته و نسبت به آن‌ها قطر بیش‌تری دارند. اندازه قطر ساقه گیاه گاودانه در تیمارهای آلودگی نسبت به تیمار شاهد تفاوت آماری معنی‌داری نداشت اما در سایر گیاهان روند کاهشی مشاهده شد. این نتایج با نتایج حاصل از مطالعات بسالت‌پور و همکاران (Besalatpour et al., 2008) در گیاه پالایی خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی اطراف پالایشگاه تهران مطابقت داشته و کاهش رشد گیاهان کشت شده (پوک‌سنلیا) در سطوح آلودگی نفتی خاک مشاهده شد. مرکل و همکاران (Merkel et al., 2005) نیز به تأخیر افتادن رشد گیاهان در خاک‌های آلوده به ترکیبات نفتی و همچنین زمان گل‌دهی و رسیدن میوه‌ها را مشاهده کردند. به‌طور کلی رشد اکثر گیاهان روند کاهشی متناسب با افزایش میزان آلودگی از خود نشان داده که این به دلیل تنش ناشی از آلودگی نفت قابل پیش‌بینی است؛ اما برای برخی از گیاهان در غلظت کم آلودگی، تفاوت آماری معنی‌داری در رشد گیاهان در مقایسه با تیمار شاهد مشاهده نشد که به نظر می‌رسد که در غلظت کم TPHs به سبب اثرات سمیتی کم‌تر، امکان رشد و نمو و استقرار گیاه فراهم می‌باشد. مطالعات فرزای سپهر و همکاران (Farzami Spehr et al., 2013) در گیاه پالایی علف داسه در پالایش خاک‌های

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس داده‌ها بر درصد هیدروکربن‌های کاهش یافته

Table 4- The analysis of variance of data on the percentage of reduced hydrocarbons

منابع تغییرات Sources of variance	df	میانگین مربعات (MS) Reduced TPHs
سطوح آلودگی Pollution levels	2	513.09 **
نوع گیاه Plant type	5	49.80 ns
سطوح آلودگی × نوع گیاه Pollution levels × plant type	10	24.20 ns
خطای آزمایشی Error	35	36.44

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

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

دلیل داشتن ریشه‌های افشان و با ایجاد تهویه بیش‌تر در خاک، موجب تحریک فعالیت میکروبی شده و زمینه را برای تجزیه بیش‌تر هیدروکربن‌های نفتی فراهم می‌آورند.

ریشه‌های افشان نسبت به سایر ریشه‌ها، محیط مناسب‌تر و با سطح ویژه بالاتری را برای فعالیت و توسعه جمعیت میکروبی فراهم می‌کنند و جمعیت میکروبی بزرگ‌تری در محیط ریزوسفری آن‌ها به وجود می‌آید (Aprill and Sims, 1990). به نظر می‌رسد که زیست توده تولیدی ریشه کمتر، نوع و میزان ترشحات ریشه گیاهان شاهدانه، گاوآنه و یونجه در تشدید فعالیت میکروبی و در نتیجه تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی موجود در خاک، نقش مؤثری نداشته است.

با توجه به این که تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی در تیمارهای کشت شده تفاوت آماری معنی‌دار با تیمارهای بدون کشت نداشته و همچنین کل خاک‌های مورد بررسی دارای باکتری‌های بومی بوده و استریل نشده بودند پس احتمالاً تجزیه و حذف هیدروکربن‌ها عمدتاً توسط باکتری‌های بومی موجود در خاک صورت گرفته است. از این رو احتمال می‌رود تقویت باکتری‌های بومی در این گونه خاک‌ها باعث افزایش تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی شود. در سطح بالاتر غلظت آلاینده‌های نفتی خاک (سطح ۳۵ درصد) جو و چمن نسبت به سایر گیاهان توانایی بیش‌تری در تجزیه و تخریب آلاینده‌های نفتی داشتند. به نظر می‌رسد که این گیاهان به

جدول ۵- اثرات متقابل تیمارهای آزمایش بر درصد هیدروکربن‌های کاهش یافته

Table 5- Interaction of treatments on the percentage of reduced hydrocarbons

نوع گیاه Plant type	درصد سطوح آلودگی Pollution levels percentage		
	10	25	35
جو Barley	59.63 a	52.85 abcd	52.09 abcd
چمن Grass	59.09 a	52.58 abcd	56.49 abc
یونجه Alfalfa	58.64 ab	45.93 d	44.04 d
شاهدانه Hemp	58.48 ab	48.38 cd	50.44 bcd
گاوآنه Vicia evilia	53.28 abcd	48.92 bcd	47.38 def
بدون کشت Non- cultivated	58.33 ab	47.67 cd	47.77 cd

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

In each column, means with similar letters don't have significantly different in probability level of 5%, from the LSD tests.

Pollution levels (C1 = 0, C2 = 10, C3 = 25 and C4 = 35%)

هیدروکربن‌های نفتی بیان کردند که بیش‌ترین میزان کاهش غلظت TPHs مربوط به سطح ریزو سفری اگروپایرون و تال فسکیو به ویژه در سطح پایین‌تر غلظت آلودگی است.

تحقیقات زیادی تأثیر مثبت کشت گیاهان در افزایش تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی را تأیید می‌کند که در بیش‌تر این تحقیقات، خاک را به صورت مصنوعی با نفت خام آلوده کرده‌اند و این آلودگی به مدت طولانی طی چندین سال رخ نداده است. نوع هیدروکربن‌های آلاینده خاک نیز در توانایی گیاه‌پالایی گیاهان تأثیر زیادی دارد. آلودگی طولانی مدت باعث تبخیر هیدروکربن‌های فرار و به جای ماندن هیدروکربن‌های سنگین و جذب آن‌ها روی ذرات خاک می‌شود. بودهادو و همکاران (Budhadev et al., 2012) با ایجاد آلودگی هیدروکربن‌های نفتی خاک، توانایی گیاه‌پالایی گیاه اویار سلام بومی منطقه آسام هندوستان را آزمایش کرده و اظهار داشتند که کاهش هیدروکربن‌های نفتی در تیمارهای آلوده به نفت تحت کشت گیاه تقریباً دو برابر تیمار بدون کشت بوده است. هاتچینسون و همکاران (Hutchinson et al., 2001) گیاه‌پالایی را به عنوان یک روش مفید برای حذف هیدروکربن‌های نفتی در خاک معرفی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار تجزیه هیدروکربن‌های نفتی در ریزو سفر گیاه برموداگراس ۶۸ در صد و در ریزو سفر گیاه فسکیو ۶۲ درصد بود.

به‌طور کلی گیاهان به تنهایی برای پالایش خاک‌های آلوده به هیدروکربن‌های نفتی که در طولانی مدت آلوده شده‌اند توصیه نمی‌شود به نظر می‌رسد که کشت گیاهان همراه با تلقیح باکتریایی بتواند برای پالایش این نوع از آلودگی نفتی خاک مناسب باشد. در یک آزمایش گیاه‌پالایی اسکالنت و همکاران (Escalante et al., 2005) گزارش کردند بیش‌ترین میزان کاهش TPHs در خاک‌های زیر کشت که توسط باکتری‌های تجزیه کننده هیدروکربن‌های نفتی تلقیح شده بودند، مشاهده گردید. این میزان تجزیه TPHs در حضور گیاه تلقیح شده ۲ برابر گیاه تلقیح نشده بود. رامیرز و همکاران (Ramirez et al., 2009) نشان دادند بین میزان TPHs تجزیه شده و کربن زیست توده میکروبی در انتهای آزمایش همبستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد. یکی از شرایط اولیه و لازم برای تجزیه هیدروکربن‌ها کافی بودن زیست توده میکروبی برای تجزیه این ترکیبات می‌باشد. رجایی و همکاران (Rajaei et al., 2012) طی مطالعات زیست پالایی خاک آلوده به نفت خام مسن چنین بیان داشتند که ترکیب گیاه و باکتری بهترین گزینه برای زیست پالایی می‌باشد.

مرکل و همکاران (Merkel et al., 2005) چنین عنوان کردند که زیست توده ریشه بیشتر، یک محیط ریزوسفری بزرگتر برای جمعیت میکروبی است و با تجزیه بیش‌تر هیدروکربن‌ها در خاک همبستگی دارد. آنان در آزمایشات گیاه‌پالایی خود افزایش بیش‌تر تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی در خاک را در نیمه دوم آزمایش خود با افزایش یافتن زیست توده ریشه توجیه کردند. لی و همکاران (Lee et al., 2008) بیان نمودند که محدوده توسعه ریشه یعنی ریزوسفر، دارای جمعیت میکروبی بیش‌تر و فعال‌تری نسبت به خاک بدون ریشه است. گیاهان قادر هستند از طریق رها سازی عناصر غذایی و ترشحات خود در خاک و انتقال اکسیژن در ناحیه ریشه‌ی خود، موجب تحریک و افزایش فعالیت جمعیت میکروبی تخریب کننده آلاینده‌های نفتی شوند؛ اما همواره افزایش زیست توده و تراکم ریشه گیاهان با افزایش تجزیه و تخریب هیدروکربن‌های نفتی آلاینده خاک همبستگی مثبت ندارد.

در آزمایش گیاه‌پالایی کایمی و همکاران (Kaimi et al., 2006 and 2007) بر روی ۱۲ گونه گیاهی در خاک‌های با ۲ درصد وزنی آلوده به روغن دیزل، با وجود بالاتر بودن تراکم ریشه فیبری گیاه کرابگراس (پنجه کلاغی از خانواده گندمیان) نسبت به سایر گونه‌های مورد مطالعه کاهش آلودگی نفتی خاک در تیمار کشت شده با این گیاه کم‌تر از سایر گونه‌ها بود. این امر نشان می‌دهد که به طور فیزیکی تراکم بالای سیستم ریشه‌ای همیشه تضمین کننده تأثیر جمعیت میکروبی در تجزیه ریزوسفری نیست؛ بنابراین به نظر می‌رسد که کیفیت ترشحات ریشه یا عوامل دیگر در کنار ویژگی‌های فیزیکی ریشه در تجزیه ریزوسفری مشارکت دارند.

جدول تجزیه واریانس در صد TPHs کاهش یافته نشان می‌دهد که غلظت آلودگی اولیه خاک بر افزایش تجزیه و تخریب TPHs مؤثر می‌باشد. هرچه مقدار هیدروکربن‌های آلاینده در خاک کم‌تر باشد مقدار تجزیه و تخریب آن بیش‌تر است. مطالعه تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که بیش‌ترین کارایی گیاه‌پالایی در سطوح پایین غلظت آلودگی است. مطالعات عابدی کوپایی و همکاران (Abedi-Koupai et al., 2007) در بررسی اثرات جمعیت میکروبی بر گیاه‌پالایی خاک آلوده به ترکیبات نفتی با استفاده از گیاهان بومی اگروپایرون^۱، تال فسکیو، لولیوم^۲ و پانیوکلیا^۳ به مدت ۹۰ روز نشان داد که گیاهان مورد مطالعه جهت گیاه‌پالایی خاک‌های دارای سطح آلودگی نسبتاً پایین مناسب هستند. همچنین بسالت‌پور و همکاران (Besaltpour et al., 2008) طی مطالعات گیاه‌پالایی گیاهان آفتابگردان، گلرنگ، کلزا، شبدر، پوک سنلیا، اگروپایرون و تال فسکیو در خاک‌های آلوده به

نتیجه گیری

آلوده به نفت، توصیه نمی شود. نتایج نشان داد که تفاوت آماری معنی داری بین تیمارهای تحت کشت و بدون کشت در سطوح مختلف آلودگی وجود ندارد و کاهش مقدار هیدروکربن های نفتی خاک نیز احتمالاً توسط ریزجانداران بومی موجود در خاک انجام گرفته است. توصیه می شود در پژوهش های بعدی برای حصول نتیجه بهتر، کارایی گونه گیاهی مورد استفاده، نوع هیدروکربن های آلاینده و مدت زمان آلودگی مورد توجه قرار گیرد.

نتایج این پژوهش گویای آن است که وجود هیدروکربن های نفتی متناسب با غلظت آن ها در خاک، موجب کاهش رشد و سایر ویژگی های فیزیولوژیک در همه گیاهان مورد مطالعه شد. گیاه کاملینا اگرچه قادر به جوانه زنی در خاک های آلوده به هیدروکربن های نفتی بود اما وجود این آلاینده ها در خاک مانع از رشد و عملکرد مناسب گیاه شد، بنابراین استفاده از آن در مطالعات بعدی گیاهپالایی خاک های

منابع

1. Abedi-Koupa, J., Ezzatian, R., Vossoughi-Shavari, M., Yaghmaei, S., & Borghei, M. (2007). The effects of microbial population on phytoremediation of petroleum contaminated soils using tall fescue. *International Journal of Agriculture and Biology* 9: 242-246. <https://doi.org/1560-8530/2007/09-2-242-246>.
2. Adavi, Z. (2011). Phytoremediation of oil contaminated soils by *Bermudagrass* varieties, *Journal of Environmental Science and Engineering* 48: 13-19. (In Persian with English abstract)
3. Akaninwor, J.O., Ayeleso, A.O., & Monago, C.C. (2007). Effect of different concentrations of crude oil (*Bonny light*) on major food reserves in guinea corn during germination and growth. *Journal of Science Research and Essay* 2(4): 127-131.
4. Anigboro, A., & Tonukari, N. (2008). Effect of crude oil on invertase and amylase activities in cassava leaf extract and germinating cowpea seedlings. *Asian Journal of Biological Science* 1: 56-60.
5. Aprill, W., & Sims, R.C. (1990). Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soils. *Chemosphere* 20: 253-265. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90100-8](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90100-8).
6. Baek, K.H., Kim, H.S., Oh, H.M., & Yoon, B.K. (2004). Effects of crude oil, oil components, and bioremediation on plant growth. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 39(9): 2465-2472. <https://doi.org/10.1081/ESE-200026309>.
7. Besalatpour, A.A., Hajabbasi, M.A., Khoshgoftarmanesh, A.M., & Afyuni, M. (2008). Remediation of petroleum contaminated soils around the Tehran oil refinery using Phytostimulation method. *Journal of Agriculture Resources* 15(4): 22-35. (In Persian with English abstract)
8. Bint, P., & Portal, J.M. (2000). Dissipation of 3-6 ring polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere of ryegrass. *Journal of Soil Biology and Biochemistry* 32: 2077-2077. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00100-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00100-0).
9. Black, C.A., Evans, D.D., White, J.L., Ensminger, L.E., & Clark, F.E. (1965). *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy, Madison Inc., Madison, Wisconsin. p. 1569
10. Bremner, J.M., & Mulvaney, C.S. (1982). *Nitrogen-total*. In: *Methods of soil analysis*, Part 2. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp: 595-624.
11. Budhadev, B., Sabitry, B., & Hari, P. (2012). Crude oil contaminated soil phytoremediation by using *Cyperus brevifolius* (Rottb.) Hassk. *Water, Air, and Soil Pollution* 233: 3373-3383. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1116-6>.
12. Caudle, K.L., & Maricle, B.R. (2014). Physiological relationship between oil tolerance and flooding tolerance in marsh plants. *Environmental and Experimental Botany* 107: 7-14. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.003>.
13. Cedric, K., Pettersson, K., Leeds, P., Harrison, R.L., & Ledin, S. (2007). Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated subsurface soil layers. *Environmental Pollution* 145: 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.039>.
14. Chaîneau, C.H., Morel, J.L., & Oudot, J. (1997). Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Environmental Pollution* 26: 1478-1483. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.039>.
15. Chupakhina, G.N., & Maslennikov, P.V. (2004). Plant adaptation to oil stress. *Russian Journal of Ecology* 35: 290-295. <https://doi.org/10.1023/B:RUSE.0000040681.75339.59>.
16. Cupers, C., Pancras, T., Grotenhuis, T., & Rulkens, W. (2002). The estimation of PAH bioavailability in contaminated sediments using hydroxypropyl- β -cyclodextrin and triton x-100 extraction techniques. *Chemosphere* 46: 1235-1245. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00199-0](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00199-0).
17. Dashti, N., Khanafer, M., El-Nemr, I., & Sorkhoh, N. (2009). The potential of oil-utilizing bacterial consortia associated with legume root nodules for cleaning oily soils. *Chemosphere* 74: 1354-1359.

- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.028>.
18. Dewis, J., & Freitas, F. (1984). *Physical and chemical methods of soil and water Analysis*. FAO soil bulletin 10, Oxford and 1BH publishing CO. PVT. LTD. New Delhi Bombay Calcutta.
19. Diaz-Perez, J.C., Shckel, K.L., & Sutter, E.G. (2006). Relative water content. *Annals of Botany* 97: 85-96.
20. Dorazio, V., Ghanem, A., & Senesi, N. (2013). Phytoremediation of pyrene contaminated soils by different plant species. *Journal of Clean (Soil, Air, Water)* 41(4): 377-382. <https://doi.org/10.1002/clen.201100653>.
21. Escalante, E.E., Gallegos-Martinez, M.E., Favela-Torres, E., & Gutierrez-Rojas, M. (2005). Improvement of the hydrocarbon phytoremediation rate by *Cyperus laxus* Lam. Inoculated with a microbial consortium in a model system. *Chemosphere* 59: 405-413. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.034>.
22. Farzami Spehr, M., Nowruzi Haji Abdal, F., & Farj Zadeh, M.A. (2013). Phytoremediation ability of *Polypogon monspeliensis* L. in refining oil contaminated soils. *Journal of Plant Science Research* 29(1): 75-86. (In Persian with English abstract)
23. García-Sánchez, M., Košnář, Z., Mercl, F., Aranda, E., & Tlustoš, P. (2018). A comparative study to evaluate natural attenuation, mycoaugmentation, phytoremediation, and microbial- assisted phytoremediation strategies for the bioremediation of an aged PAH-polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 147: 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.012>.
24. Gaskin, S.E., & Bentham, R.H. (2010). Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. *Science of the Total Environment* 408: 3683-3688. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.004>.
25. Huang, X.D., Alawi, Y.E., Gurska, J., Glick, B.R., & Greenberg, B.M. (2005). A multiprocessor phytoremediation system for decontamination of persistent total petroleum hydrocarbons (TPHs) from soil. *Microchemical Journal* 81: 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2005.01.009>.
26. Hutchinson, S.L., Banks, M.K., & Schwab, A.P. (2001). Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. *Journal of Environmental Quality* 30: 395-403. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302395x>.
27. Jussila, M.M. (2006). *Molecular biomonitoring during rhizoremediation of oil contaminated soil*. Ph.D thesis. Department of applied chemistry and microbiology division of microbiology. University of Helsinki. Finland.
28. Kaimi, E., Mukaidani, T., & Tamaki, M. (2007). Screening of twelve plant species for phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Journal of Plant Production Science* 10(2): 211-218. <https://doi.org/10.1626/pps.10.211>.
29. Kaimi, E., Mukaidani, T., Miyoshi, S., & Tamaki, M. 2006. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil. *Environmental and Experimental Botany* 55: 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2004.10.005>.
30. Kamath, R., Rentz, J.A., Schnoor, J.L., & Alvarez, P.J.J. (2004). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and application. Chapter 16. Petroleum Biotechnology: Developments and Perspectives. *Studies in Surface Science and Catalysis* 151: 447-478. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(04\)80157-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80157-5).
31. Lee, S.H., Lee, W.S., Lee, C.H., & Kim, J.G. (2008). Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. *Journal of Hazardous Materials* 153: 892-898. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.041>.
32. Lindsay, W.L., & Norvell, W.A. (1978). 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>.
33. Luepromchai, E., Lertthamrongsak, W., Pinphanichakarn, P., & Thaniyavarn, S. (2007). Biodegradation of PAHs in petroleum-contaminated soil using tamarind leaves as microbial inoculums. *Biodegradation* 29: 515-527.
34. Martin, B.C., George, S.J., & Price, C.A. (2014). The role of root exuded low molecular weight organic anions in facilitating petroleum hydrocarbon degradation: current knowledge and future directions. *Science of the Total Environment* 472: 642-653. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.050>.
35. Merkel, N., Schultze-Kraft, R., & Infant, C. (2005). Assessment of tropical grasses and legumes for phytoremediation of petroleum-contaminated soils. *Journal of Water, Air and Soil Pollution* 165: 195-209. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-4979-y>.
36. Moubasher, H.A., Hegazy, A.K., Mohamed, N.H., Moustafa, Y.M., Kabiell, H.F., & Hamad, A.A. (2015). Phytoremediation of soils polluted with crude petroleum oil using *Bassia scoparia* and its associated rhizosphere microorganisms. *International Biodeterioration and Biodegradation* 98: 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.11.019>.
37. Nie, M., Zhang, X., Wang, J., Jiang, L., Yang, J., Quan, Z., Cui, Q., Fang, C., & Li, B. (2009). Rhizosphere effects on soil bacterial abundance and diversity in the Yellow River Deltaic ecosystem as influenced by petroleum contamination and soil salinization. *Soil Biology and Biochemistry* 41: 2535-2542. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.012>.
38. Olsen, S.R., & Sommers, L.E. (1982). *Phosphorus. In: methods of soil analysis*, Part2. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. pp: 403-431.
39. Omosun, G., Markson, A., & Mbanasor, O. (2008). Growth and anatomy *Amaranthus hybridus* as affected different crude oil concentration. *American-Eurasian Journal of Scientific Research* 3(1): 70-74.
40. Oster, J.D., & Garrison, S. (1980). The Gapon coefficient and the exchangeable sodium percentage sodium

- adsorption ratio relation. *Soil Science Society American Journal* 44: 258-260. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400020011x>.
41. Peng, S., Zhou, Q., Cai, Z., & Zhang, Z. (2009). Phytoremediation of petroleum contaminated soils by *Mirabilis jalapa* L. in greenhouse plot experiment. *Journal of Hazardous Materials* 168: 1490-1496. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.036>.
42. Rajaei, S., Raiesi, F., & Seyedi, S. (2012). The Bioremediation of an aged petroleum contaminated soil using bioaugmentation and phytoremediation techniques. *Water and Soil* 26(4): 908-921. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.15295>.
43. Ramirez, M.E., Zapien, B., Zegarra, H.G., Rojas, N.G., & Fernandez, L.C. (2009). Assessment of hydrocarbon biodegradability in clayed and weathered polluted soils. *Journal International Biodeterioration and Biodegradation* 63: 347-353. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.11.010>.
44. Rhoades, J.D. (1982). *Soluble salts*. In: Page A.L., Miller R.H., and Keeney D.R. (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Mineralogical Properties* (2nd edition). Agronomy series No.9. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA, pp. 167-179.
45. Shekoohiyan, S., Moussavi, G., & Naddafi, K. (2016). The peroxidase- mediated biodegradation of petroleum hydrocarbons in a H₂O₂-induced SBR using in-situ production of peroxidase: biodegradation experiments and bacterial identification. *Journal of Hazardous Materials* 313: 170-178. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.081>.
46. Scott, S. (2003). *Biodegradation and toxicity of total petroleum hydrocarbon leachate from land treatment units*. Department of Engineering. California Polytechnic State University.
47. Shahriari, M.H., Savaghebi Firrozabadi, G., Minai-Tehrani, D., & Padidaran, M. (2006). The effect of mixed plants alfalfa (*Medicago sativa*) and fescue (*Festuca arundinacea*) on the phytoremediation of light crude oil in soil. *Environmental Sciences* 4(13): 33-40. (In Persian with English abstract)
48. Shim, H., Chauhan, S., Ryoo, D., Bowers, K., Thomas, S.M., & Burken, J.G. (2000). Rhizosphere competitiveness of trichloroethylene-degrading, poplar-colonizing recombinant bacteria. *Applied and Environmental Microbiology* 66(11): 4673-4678. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.11.4673-4678.2000>
49. Smits, P.E. (2005). Phytoremediation. *Annual Reviews of Plant Biology* 56: 15-39.
50. Victor, J., & Sadiq, A. (2002). Effects of spent engine oil on the growth parameters chlorophyll and protein level of *Amaranthus hybridus* L. *Environmentalist* 22: 23-28. <https://doi.org/10.1023/A:1014515924037>.
51. Villalobos, M., Avila-Forcada, A.P., & Gutierrez-Ruiz, M.E. (2008). An improved gravimetric method to determine total petroleum hydrocarbons in contaminated soils. *Journal of Water, Air and Soil Pollution* 194: 151-161. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9704-1>.
52. Walkley, A., & Black, I.A. (1974). An examination of the digestion method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of in organic soil constituents. *Soil Science* 63: 251-263.
53. Xu, S.Y., Chen, Y.X., Wu, W.X., Wang, K.X., Lin, Q., & Liang, X.Q. (2005). Enhanced dissipation of phenanthrene and pyrene in spiked soils by combined plants cultivation. *Science of the Total Environment* 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.05.030>.



The Application of Multi-Criteria Decision-Making Model in Land Suitability Assessment

S. Akhavan¹, A. Jalalian^{2*}, N. Toomanian³, N. Honarjo⁴

Received: 27-09-2022

Revised: 19-12-2022

Accepted: 18-01-2023

Available Online: 18-01-2023

How to cite this article:

Akhavan, S., Jalalian, A., Toomanian, N., & Honarjo, N. (2023). The Application of Multi-Criteria Decision-Making Model in Land Suitability Assessment. *Journal of Water and Soil* 37(1): 45-62. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/JSW.2023.78892.1205>

Introduction

Land suitability analysis and land use mapping are one of the most practical applications of Geographic Information Systems in land resource management. Complexities in soil have briefly limited studies on how it functions (Karlen, 2008). There are many methods from different centers including food and agriculture organizations (FAO), to evaluate land suitability. These methods are based on the characteristics of the land and the needs of the plant. Soil quality indicators are a set of measurable soil characteristics that affect crop production or the environment and are sensitive to land use change, management or conservation operations. (Brejda, 2000; Aparico and Costa, 2007). As a result, there is a global need for environmental issues, improvement of soil quality assessment methods for sustainable agricultural development and recognition of the sustainability of soil management and land use systems. Until now, various methods have been used to collect data, measure and evaluate soil quality, and laboratory analysis is the most common method, which has the advantage of being easy to use and characterizing and the quantitative characteristics of the test on different soil quality indicators (and Wang, 1998 Gong). Criteria for soil quality indicators should be a set of physical, chemical, biological characteristics or a combination of them (Doran and Parkin, 1997).

Materials and Methods

In the present study, the qualitative assessment of land suitability was investigated using fuzzy and parametric hierarchical analysis process models for the irrigated wheat and alfalfa crops. Soil characteristics, climatic conditions, topography and accessibility were selected based on the Food and Agriculture Organization framework and expert opinions. The interpolation function was used to plot values to points in terms of quality/ terrain characteristics for the type of operation and the evaluation was performed based on parametric and fuzzy analytical hierarchy process models. The process of evaluation is based on the FAO qualitative land evaluation system (FAO 1976a, b, 1983, 1985), which compares climatic conditions and land qualities/characteristics including topography, erosion hazard, wetness, soil physical properties, soil fertility, and chemical properties, soil salinity and alkalinity with each specific crop requirements developed by Sys et al. (1991a, b, 1993). Based on morphological and physical/chemical properties of soil profiles some 10 land units were identified in the study area. Climate data related to different stages of wheat growth were taken from ten years of meteorological data of the region (2007-2017) and the climatic requirements of the crop were extracted from the Table developed by (Sys et al., 1993). An interpolation technique using the ArcGIS ver 10.3 helped in managing the spatial data and visualizing the land index results in both models for preparing the final land suitability evaluation maps. The FAHP method and (Chang, 1996) method, which is a very simple method for generalizing the hierarchical analysis process to the fuzzy space, was used in order to assign weight to the criteria through. This method is based on computational mean of the experts' opinion and the time normalization method and the use of triangular fuzzy numbers. A pairwise comparison matrix has been made fuzzy based on the experts' opinion and using the triangular fuzzy

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Professor and Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, Isfahan (Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: jalalian@khuisf.ac.ir)

3- Associate Professor, Soil and Water Research Department, Isfahan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Isfahan, Iran

numb. After calculating the weights of the criteria in the present research through the FAHP method, the entire criteria maps were overlaid through the use of the GIS function and the suitability maps were prepared for the main criteria. The main suitability maps went through weight overlaying eventually and the final map of suitability for wheat and alfalfa cultivation was produced.

Results and Discussion

The results of this study showed that the FAHP was an efficient strategy to increase the accuracy of weight allocation to criteria that affect the analysis of ground fit. The inability of conventional decision-making methods to account for uncertainty paves the way for the use of fuzzy decision-making methods. One of the drawbacks of the AHP is its inability to account for the uncertainty of judgments in pairwise comparison matrices. This defect is compensated by the FAHP method. Instead of considering a specific number in a pairwise comparison, a range of values in the FAHP is used for uncertainty for decision makers. The present research method can be useful for prioritizing lands, improving exploitation, conserving resources, and creating sustainable management. The results of this study, considering the main criteria of cultivation in the study area and the opinion of domestic experts, can provide useful insights into choosing the appropriate cultivation pattern in the region. The use of different fuzzy AHP methods as well as comparing the results of different fuzzy AHP methods in future research is recommended.

Keywords: Fuzzy, Geographic information systems, Land suitability, Parametric

کاربرد مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره در ارزیابی تناسب اراضی

سحر اخوان^۱ - احمد جلالیان^{۲*} - نورایر تومانیان^۳ - ناصر هنرجو^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۲۷

چکیده

تحلیل تناسب اراضی با استفاده از مجموعه متنوعی از عوامل موثر بر تولید کمی و کیفی محصولات و بررسی پیچیدگی‌های روابط آن‌ها باهم، و همچنین نقشه‌برداری کاربری اراضی، از مفیدترین کاربردهای سامانه اطلاعات جغرافیایی و کاربرد مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در مدیریت منابع زمین است. در پژوهش حاضر، ارزیابی کیفی تناسب اراضی با استفاده از مدل‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی و پارامتریک برای محصول گندم آبی و یونجه مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات خاک، شرایط اقلیمی، توپوگرافی و دسترسی به آب، جاده و مراکز جمعیتی، بر اساس چارچوب سازمان خواربار جهانی و کشاورزی و نظرات کارشناسان انتخاب شد. تابع درونیابی برای ویژگی‌های کیفی و کمی موردنظر، استفاده شد و ارزیابی بر اساس مدل‌های پارامتریک و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی انجام شد. بر اساس مدل پارامتریک، مقادیر شاخص‌های زمین برای گندم و یونجه از ۵۰ درصد در برخی نقاط تا ۷۸ درصد در منطقه مورد مطالعه متغیر است، که دشت را به طبقات مناسب (S2) و خیلی مناسب (S1) طبقه‌بندی می‌کند. مقادیر ترجیحی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای کشت گندم و یونجه به ترتیب در منطقه مورد مطالعه از ۲۵ تا ۷۳ درصد و ۲۴ تا ۵۰ درصد می‌باشد که به عنوان متوسط تا خیلی زیاد طبقه‌بندی می‌شود. ضریب کاپا کوهن بین شاخص‌های پارامتری زمین و مقادیر ترجیحی فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی با عملکرد گندم و یونجه مشاهده شده، به ترتیب بین ۰/۰۳ تا ۰/۲۳۷ و ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۴ متغیر است که اعتبار هر دو مدل در برآورد تناسب اراضی برای تولید محصول در منطقه مورد مطالعه را تایید می‌کند. نتایج مطالعه حاضر نشان می‌دهد که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی یک استراتژی موثر برای افزایش دقت وزنی معیارهای موثر بر تحلیل تناسب زمین نسبت به روش سنتی برای شناسایی محدودیت‌های کشت محصولات می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پارامتریک، تناسب اراضی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، فازی

مقدمه

این روش‌ها بر پایه مطابقت خصوصیات اراضی و احتیاجات گیاه بنا نهاده شده است. پیچیدگی‌های موجود در خاک به طور جدی مطالعات را در چگونگی کارکردهای آن، محدود کرده است (Karlen, 2008). به سبب اهمیت تغییرات محیط‌زیست، بهبود روش‌های ارزیابی کیفیت خاک، برای توسعه کشاورزی پایدار و مدیریت خاک و زمین ضروری است. ارزیابی تناسب زمین یک ابزار قدرتمند برای حمایت از تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی کاربری زمین است و می‌توان بر اساس پارامترهای بیوفیزیکی و شرایط اجتماعی-اقتصادی یک منطقه انجام

واضح است که برای تداوم تولید پایدار و رفع نیازهای جامعه و در عین حال حفظ اکوسیستم‌های شکننده، نیاز مبرمی به تطبیق منابع زمین و کاربری زمین به مؤثرترین و منطقی‌ترین راه وجود دارد (FAO, 1993). روش‌های زیادی از جمله چارچوب سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO)، طبقه‌بندی قابلیت زمین وزارت کشاورزی ایالات متحده (USDA, 1961)، برای ارزیابی تناسب اراضی وجود دارند که

۱ و ۲ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و استادیار گروه خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران
(Email: jalalian@khuif.ac.ir)
*) نویسنده مسئول:

۳ - دانشیار پژوهش بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اصفهان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اصفهان، ایران
DOI: [10.22067/JSW.2023.78892.1205](https://doi.org/10.22067/JSW.2023.78892.1205)

شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Location of the case study area

جدول ۱- اطلاعات اقلیمی و هواشناسی منطقه در یک دوره ۱۰ ساله

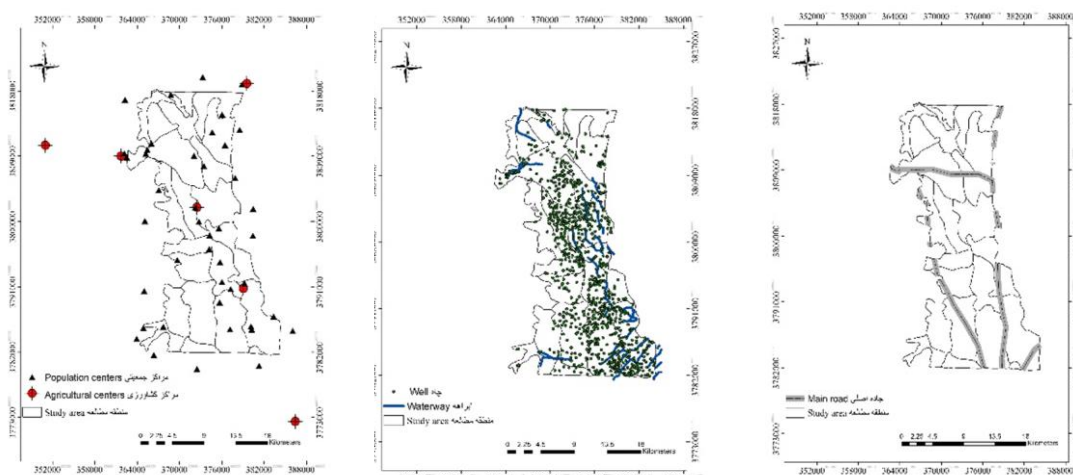
Table 1- Climatic and meteorological information of the region in a period of 10 years

میانگین دمای سالانه	14.5 °C
Average annual temperature	
میانگین بیشینه دمای سالانه	21.3 °C
Average annual maximum temperature	
میانگین کمینه دمای سالانه	7.5 °C
Average annual minimum temperature	
بیشینه مطلق دما در ماه تیر	40.6 °C
The absolute maximum temperature in July	
کمینه مطلق دما در ماه دی	-30 °C
The absolute minimum temperature in January	
میانگین سالانه رطوبت نسبی هوا	% 45.6
Annual average relative humidity	
میانگین بارندگی سالانه	275 mm
Average annual rainfall	

نهرها از سازمان آب اراک بدست آمد. توزیع فضایی برخی از مجموعه داده‌های وارداتی در منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

تعداد ۱۰ پروفیل شاهد در ۱۰ واحد خاک موجود (شکل ۳)، حفر و از هر لایه نمونه‌های لازم جهت انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی مورد نیاز جهت ارزیابی کیفی خاک و رده‌بندی خاک منطقه جمع‌آوری و به آزمایشگاه منتقل گردید (جدول ۲).

منابع آب مورد استفاده شامل آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی می‌باشد و قسمت اعظم اراضی به کشت زراعت آبی اختصاص دارد. محصولات عمده زراعی که در این منطقه کشت می‌شود عبارت‌اند از: گندم، جو، کلزا، یونجه، ذرت، سیب زمینی، چغندر. به منظور تعیین محدوده منطقه مورد مطالعه، از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان مرکز ملی نقشه‌برداری)، نقشه رقومی ارتفاعات (DEM) و لایه‌های مشتق شده مانند شیب و جهت شیب و نقشه‌های خاک‌شناسی موسسه تحقیقات خاک و آب کشور و تصاویر ماهواره‌ای استفاده گردید. اطلاعات موجود در مورد چاه‌ها و



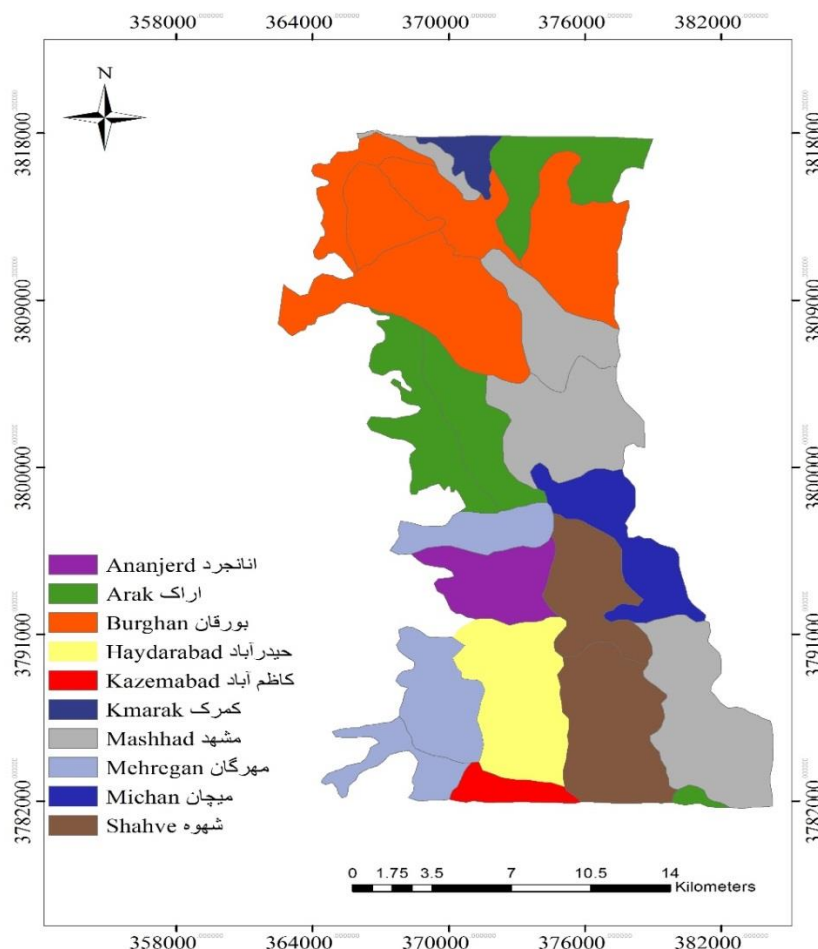
ج

ب

الف

شکل ۲- الف: جاده‌های اصلی ب: چاه‌آب و نهرها ج: مناطق مسکونی

Figure 2- Main Roads (a), Well and Waterway (b), Residential Areas (c)



شکل ۳- واحدهای خاک منطقه
Figure 3- Soil units of the region

شدن به مدل‌ها، تهیه شد. تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده با نرم‌افزار SPSS 22 و ArcGIS10.1 انجام پذیرفت. داده‌های محیطی در این پژوهش شامل توپوگرافی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک بودند.

ارزیابی کیفی اراضی به روش پارامتریک ریشه دوم

ارزیابی کیفی تناسب زمین نشان‌دهنده درجه تناسب برای کاربری خاص، بدون توجه به شرایط اقتصادی است. که بر جنبه‌های نسبتاً دائمی مناسب بودن، مانند ویژگی‌های آب و هوا و خاک، به جای موارد متغیر، مانند قیمت‌ها، تأکید می‌کند. جهت ارزیابی تناسب اراضی از روش پارامتریک ریشه دوم استفاده شد. مراحل اجرایی شامل ۳ مرحله می‌باشد. الف) جمع‌آوری و پردازش اطلاعات مورد نیاز درباره خصوصیات اراضی، ب) تعیین نیازهای انواع بهره‌وری‌های انتخاب شده، ج) تعیین کلاس‌های کیفی تناسب اراضی.

نمونه‌برداری از پارامترهای تاثیرگذار در مدل‌های ارزیابی به صورت نقاط مطالعاتی و به روش تصادفی طبقه‌بندی شده با استفاده از شبکه‌بندی انجام شده با ابعاد شبکه‌ای ۱۰۰۰ در ۱۰۰۰ متر صورت گرفت و تعداد ۱۱۲ نمونه خاک از عمق (۰-۳۰) سانتی‌متری از سطح منطقه، مورد آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی برای وارد شدن به مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره قرار گرفت. بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee, 1986). ماده آلی به روش والکی-بلمک (Reak et al., 1990)، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون، قابلیت هدایت الکتریکی عصاره اشباع به و سیله هدایت سنج و واکنش خاک در عصاره ۱:۲، پتاسیم قابل جذب به روش عصاره‌گیری با استات آمونیوم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر و فسفر قابل استفاده به روش اولسن با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. میزان سنگریزه نیز همزمان با کوبیدن و عبور از الک تعیین گردید. سپس اطلاعات حاصل از آن‌ها وارد نرم‌افزار GIS گردید و با روش میانبایی کربجینگ بهترین مدل برازش گردید و نقشه‌های رستری هر معیار برای وارد

جدول ۲- رده‌بندی خاک‌های موجود در منطقه

Table 2- Classification of Soils in the Region

شکل ظاهری زمین The shape of the earth	سری خاک Soil series	فامیل خاک Soil family
فلات و تراس‌های فوقانی Upper plateaus and terraces	کاظم آباد Kazemabad	Haploxerept Fine loamy, Carbonatic, Thermic, Typic
	کمرک Kamarak	Fine loamy, Carbonatic, Thermic, Typic Calcixerept
خاک‌های مخروط افکنه‌های آبرفتی سنگریزه دار Pebble alluvial alluvial cone soils	اراک Arak	Loamy Skeletal, Mixed, Thermic, Typic Haploxerept
	انانجرد Anajard	Loamy Skeletal, Mixed, Thermic, Typic Haploxerept
	مهرآباد Mehrabad	Loamy Skeletal, Mixed, Thermic, Typic Xerorthents
	میچان Michan	Fine loamy, Mixed, Thermic, Typic Xerorthents
دشت‌های سیلابی Flood plains	حیدرآباد Hyderabad	Fine loamy, Carbonatic, Thermic, Typic Haploxerept
	بورقان Burqan	Fine loamy, Carbonatic, Thermic, Typic Haploxerept
خاک‌های دشت‌های آبرفتی دامنه‌ای Soils of alluvial plains	مشهد Mashhad	Fine, Carbonatic, Thermic, Typic Haploxerept
	شبهه Shahveh	Fine, Mixed, Thermic, Typic Haploxerept

جدول ۳- مقادیر شاخص اراضی در کلاس‌های تناسب اراضی (روش فائو)

Table 3- Land index values in land suitability classes (FAO method)

کلاس تناسب Suitability class	شاخص اراضی Land index
خیلی مناسب Very Suitable	S1 100-75
تناسب متوسط Average Suitable	S2 75-50
تناسب کم Low Suitable	S3 50-25
نامناسب در شرایط فعلی Unsuitable in the current situation	N1 25-12.5
نامناسب دائمی Permanently Suitable	N2 12.5-0

تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM)

یک چارچوب بالقوه ارائه می‌دهد که منعکس‌کننده نگرش افراد درگیر در فرآیند تصمیم‌گیری است. این چارچوب اطلاعاتی، برخی از معیارها را ترکیب می‌کند و یک واحد شاخص ارزیابی را تشکیل می‌دهد.

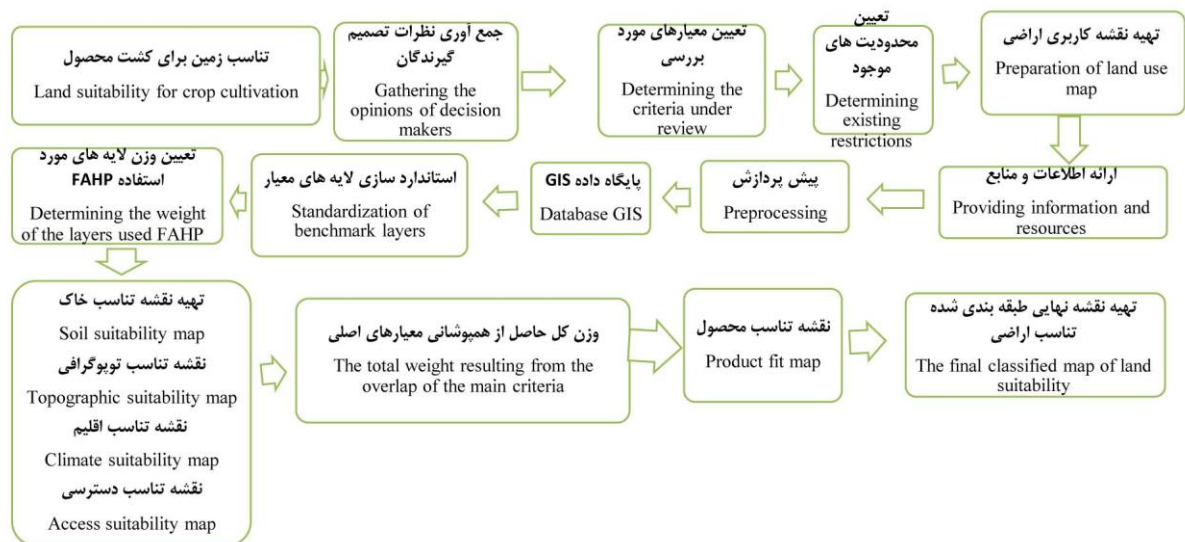
این مدل ارزیابی براساس سیستم ارزیابی کیفی اراضی فائو (FAO 1976a, b, 1983, 1985) انجام گردید. نیازهای اقلیمی محصول از جدول تهیه شده توسط سائیس و همکاران (Sys et al., 1993) استخراج شد.

تعیین کلاس‌های کیفی تناسب

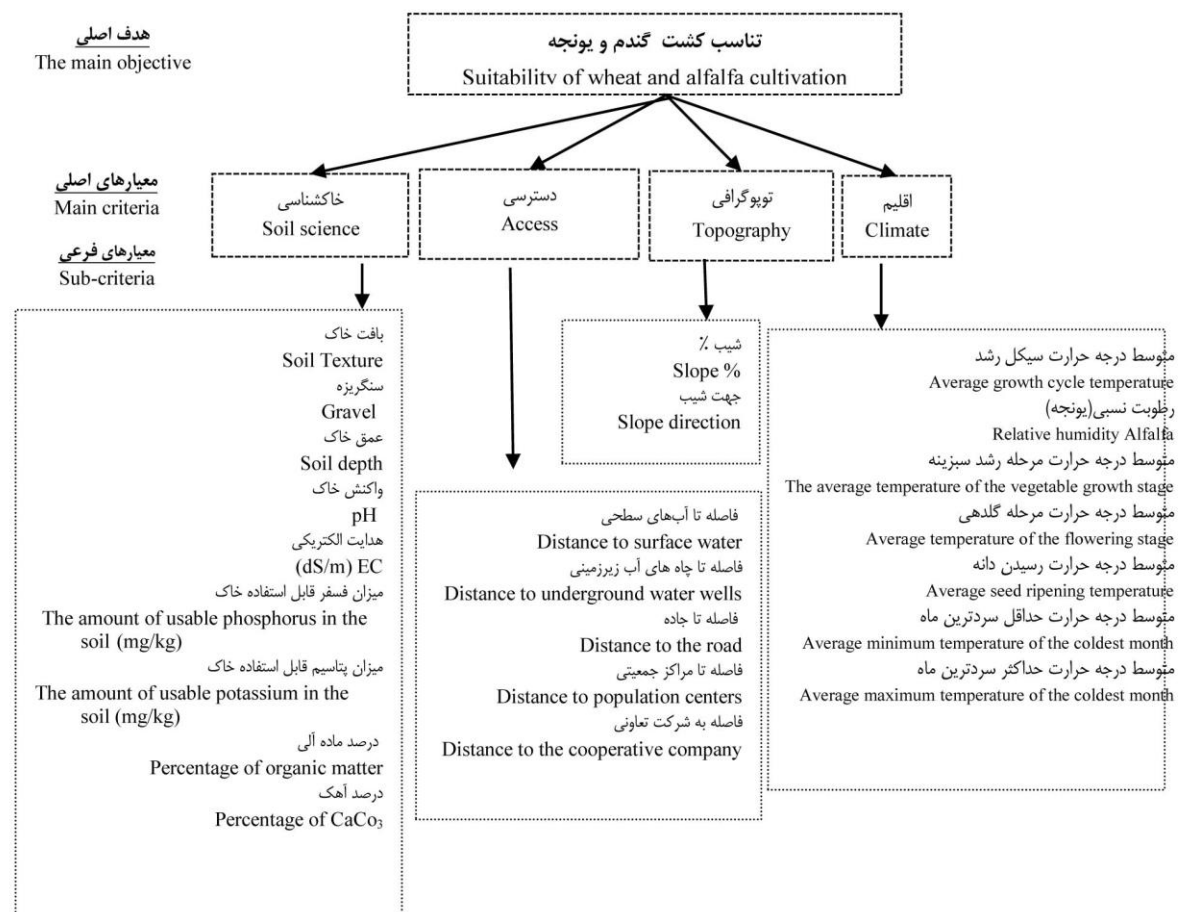
در این مرحله عمل انطباق خصوصیات اراضی با نیازهای انواع بهره‌وری به روش پارامتریک ریشه دوم انجام شد و کلاس نهایی اراضی تعیین گردید. در روش پارامتریک یک درجه‌بندی در مقیاس ۱۰۰-۰ به سطوح محدودیت نسبت داده شد. با یک رابطه ریاضی، شاخص نهایی اراضی به دست آمد، رابطه (۱).

$$I = Rmin \times \sqrt{\frac{A}{100} \times \frac{B}{100}} \times \dots \quad (1)$$

در رابطه (۱)، Rmin حداقل درجه بین خصوصیات مختلف و A، B، ... درجات خصوصیات دیگر غیر از این خصوصیات با حداقل درجه می‌باشند (Ayubi and Jalalian, 2014). سپس با استفاده از شاخص محاسبه شده، کلاس‌های کیفی تناسب اراضی تعیین گردید (جدول ۳).



شکل ۴- جریان روش شناسی مورد استفاده در مطالعه
Figure 4- Flowchart of the methodology used in the study



شکل ۵- ساختار درختی تصمیم گیری مورد استفاده در مطالعه
Figure 5- Decision tree structure used in the study

دسته اصلی شامل خصوصیات خاک، شرایط آب و هوایی، توپوگرافی و دسترسی طبقه‌بندی می‌شوند. پس از آماده‌سازی، نقشه‌ها نیاز به استانداردسازی داشتند. مقادیر موجود در نقشه‌های ورودی مختلف ممکن است معانی متفاوتی داشته باشند و ممکن است شامل واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی باشند (به عنوان مثال نقشه شیب بر $^{\circ}$ سب در صد، دما بر $^{\circ}$ سب درجه و غیره). به منظور مقایسه مقادیر متقابل، لازم است آن‌ها را با تبدیل به واحدهای اندازه‌گیری مشابه (۰-۱) استانداردسازی و بدون مقیاس نماییم. در این تحقیق از دو روش استانداردسازی، AHP فضایی برای استانداردسازی تمامی معیارهای کاربردی به جز معیارهای فاصله‌ای که برای آن‌ها از تحلیل هزینه-فایده استفاده شد، به عنوان مثال، در معیار مراکز جمعیتی، تحلیل هزینه-فایده، به کار رفت که بالاترین امتیاز (درجه تناسب = ۱) را به نزدیکترین نقطه به مراکز جمعیتی و کمترین (درجه تناسب = ۰) را به دورترین آن‌ها اختصاص می‌دهد.

آماده‌سازی داده‌ها با استفاده از GIS

آماده‌سازی داده‌ها اولین گام اساسی در تحلیل تناسب زمین است. یک تکنیک درونیابی با استفاده از نسخه ۱۰،۱ ArcGIS با مدیریت داده‌های مکانی و تجسم نتایج شاخص زمین در هر دو مدل، برای تهیه نقشه‌های نهایی تناسب اراضی در منطقه استفاده شد.

اعتبارسنجی مدل

برای ارزیابی توافق بین روش‌های فازی و فائو با تولید مشاهده شده در منطقه، ضریب کاپا که توسط (Cohen, 1960) تهیه شده است بکار رفت. ضریب کاپا اندازه‌گیری میزان توافق بین دو مشاهدات (نقشه) است و محاسبه آن بر اساس تفاوت بین پیکسل نقشه‌ها است. مقدار کاپا ۰ نشان می‌دهد که توافق ضعیفی بین نقشه‌ها وجود دارد و مقدار ۱ نشان دهنده توافق تقریباً کامل است.

نتایج و بحث

مدل پارامتریک در ارزیابی تناسب زمین. بر اساس نیازهای اقلیمی محصول، شاخص اقلیم (CI) و نرخ اقلیمی (CR) به عنوان عوامل اجرا شده در برآورد شاخص زمین تعیین شدند (Ayubi and Jalalian, 2014). در منطقه شرایط اقلیمی بهینه برای گندم و یونجه به ترتیب ۹۷،۴ و ۹۲،۷۴ تعیین گردید و اقلیم منطقه را در کلاس بسیار مناسب (S1) برای گندم آبی و یونجه قرار داد (جدول ۴ و ۵). مقادیر شاخص زمین بر اساس مدل پارامتریک بین ۵۰ تا ۷۸ با میانگین ۶۸/۸ متغیر بود (جدول ۶). طبقات تناسب زمین برای گندم و یونجه به دو دسته S1 و S2 طبقه‌بندی شدند (شکل ۶).

با توجه به تعداد زیاد عوامل مؤثر بر تصمیم‌گیری، بررسی تناسب زمین را می‌توان به عنوان یک روش ارزیابی چندمعیاره در نظر گرفت (Reshmidevi, 2009). ترکیب روش MCDM و روش GIS یک ابزار قدرتمند برای تحلیل فضایی تشکیل می‌دهد (Yu, 2009). شکل ۴ جریان کلی روش شناسی را که در اینجا دنبال کرده‌ایم، ارائه می‌دهد.

انتخاب معیارهای ارزیابی

مجموعه معیارهای انتخاب شده باید به اندازه کافی فضای تصمیم‌گیری را آشکار کند و باید به عنوان راهنمای هدف نهایی عمل کند (Kihoro, 2013). در راستای اجرای مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره، ساختار درخت تصمیم‌گیری برای ارزیابی تناسب اراضی ایجاد گردید (شکل ۵).

فرآیند سلسله مراتبی فازی (FAHP)

با عدم قطعیت و منبع ابهام سروکار دارد و برای ترکیب داده‌های نادقیق در چارچوب تصمیم‌گیری استفاده شده است (Brahma, 2018). FAHP یک فرمت AHP است که معیارهای مختلف را از طریق استفاده از اعداد فازی ارزیابی می‌کند و موفق شده است بر ایرادات AHP غلبه کند و می‌تواند ابهام و تردید را در ارزیابی، زمانی که به مسائل پیچیده و چند شاخصی می‌رسد، از بین ببرد (Yu, 2011). مهم‌ترین دلایل استفاده از FAHP به جای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک این است که مقادیر در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کلاسیک به صورت جفت از طریق اعداد مطلق مقایسه می‌شوند (Saaty, 1980). در حالی که این عدم قطعیت نمی‌تواند با منطق فازی نشان داده شود (Jiang and Eastman, 2000). وزن‌دهی معیارها به روش چانگ (Chang, 1996) جهت بسط‌دهی تحلیل سلسله مراتبی به فضای فازی استفاده می‌شود که مبتنی بر میانگین حسابی نظرات کارشناسان، روش نرمالایز و استفاده از اعداد مثلث فازی است. در ابتدا ماتریس‌های مقایسه زوجی فازی گردیدند و ماتریس مقایسه زوجی فازی معیارهای اصلی و همچنین ماتریس مقایسه زوجی فازی معیارهای فرعی و زیرمعیارها، تهیه گردید. سپس وزن‌های هر کدام از معیارهای اصلی و زیرمعیارها بدست آمد. با استفاده از وزن‌های حاصل از مقایسه جفتی در روش FAHP لایه‌های استاندارد شده به روش ساتی تلفیق شدند. نقشه‌های تناسب معیارهای فرعی و معیارهای اصلی و نقشه نهایی تناسب برای کشت گندم به روش FAHP حاصل گردید. ارزیابی تناسب زمین یک فرآیند ارزیابی چندمعیاره است و معیارهای آن فضایی و غیر مکانی بوده و شامل داده‌های کیفی و کمی تحت شرایط مختلف می‌باشد (Chen et al., 2010). بر اساس نظر کارشناسان و دیدگاه تصمیم‌گیران و چارچوب فائو برای کشت گندم آبی و کشت یونجه، عوامل تاثیرگذار در چهار

جدول ۴- ارزیابی اقلیمی گندم در منطقه

Table 4- Climatic requirements and characteristics for wheat cultivation in the study area

مشخصات اقلیمی Climatic characteristics	اطلاعات اقلیمی Climatic information	درجه پارامتریک Parametric grade	معادله مربوطه The corresponding equation
متوسط درجه حرارت سیکل رشد Average growth cycle temperature (°C)	15	95	$R=95+1(15-20)$
متوسط درجه حرارت مرحله رشد سبزینه‌ای The average temperature of the vegetative growth stage (°C)	11.45	99.31	$R=95+25.1(X-8)$
متوسط درجه حرارت مرحله گلدهی Average temperature of flowering stage (°C)	19.68	98.55	$R=95+6.0(X-14)$
متوسط درجه حرارت رسیدن دانه Average seed ripening temperature (°C)	25.2	93	$R=95-7.1(X-24)$
متوسط درجه حرارت حداقل سردترین ماه Average minimum temperature of the coldest month (°C)	-5.2	100	-----
متوسط درجه حرارت حداکثر سردترین ماه Average maximum temperature of the coldest month (°C)	5.5	100	-----
شاخص اقلیمی خیدر (ریشه دوم) Khaider climate index (second root)	---	89.67	$CI= Rmin*\sqrt{R1.100+R2.100+...}$
درجه اقلیمی R Climatic degree R	---	97.4	$CR=67.16 + 9.0 * CI$
کلاس اقلیم Climate class			S_1

مدل تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) در ارزیابی تناسب زمین

مقایسه معیارها به روش اعداد فازی با ماتریس مقایسه زوجی برای تمامی معیارها در جدول ۷ آمده است. تبدیل ماتریس‌ها به ماتریس فازی با هدف رسیدن به وزن‌های نرمال انجام شد و برای هر معیار، وزن‌ها در مدل FAHP محاسبه شد (جدول ۸). در تمامی

مقایسات شاخص سازگاری کمتر از ۰/۱ بود (جدول ۹). در محیط GIS با استفاده از نقشه‌های استاندارد شده هر معیار و وزن‌های حاصل از مدل FAHP نقشه‌های تناسب اراضی برای معیارهای مختلف توپوگرافی، ویژگی‌های خاک، شرایط اقلیمی و دسترسی در تهیه گردید که در (شکل ۷ و ۸) نشان داده شده است.

جدول ۵- ارزیابی اقلیمی یونجه در منطقه

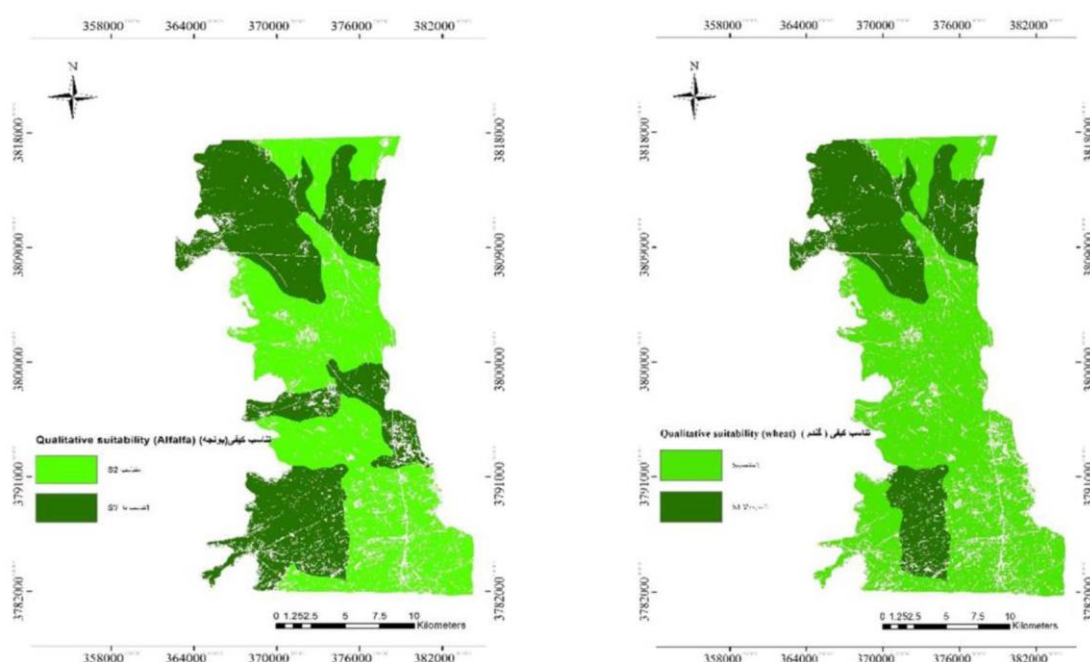
Table 5- Climatic requirements and characteristics for alfalfa cultivation in the study area

نیازهای اقلیمی Climatic characteristics	اطلاعات اقلیمی Climatic information	درجه پارامتریک Parametric grade	معادله مربوطه The corresponding equation
متوسط درجه حرارت سیکل رشد Average growth cycle temperature (°C)	20	85	$R=95-2.5(X-20)$
رطوبت نسبی % Relative humidity %	36.97	98.2	$R=100-25.0(X-30)$
شاخص اقلیمی خیدر (ریشه دوم) Khaider climate index (second root)	---	84.23	$CI= Rmin*\sqrt{R1.100+R2.100+...}$
درجه اقلیمی R Climatic degree R	---	92.47	$CR=67.16 + 9.0 * CI$
کلاس اقلیم Climate class			S_1

جدول ۶- مقادیر شاخص زمین، کلاس تناسب اراضی، به‌روش پارامتریک برای محصولات

Table 6- The values of land indexes, land suitability classes, the preference values and classes by Parametric Crops

یونجه Alfalfa		گندم Wheat		واحد اراضی Land unit
کلاس اراضی Land class	شاخص اراضی Land index	کلاس اراضی Land class	شاخص اراضی Land index	
S2	73	S2	75	
	62	S2	56	AN
	75	S1	77	AR
	78	S1	78	BU
	58	S2	68	HA
	61	S2	73	KA
	73	S2	74	KM
	50	S2	50	MA
	75	S2	75	ME
	63	S2	62	MI
				SH



شکل ۶- پهنه‌بندی تناسب اراضی برای تولید گندم و یونجه با مدل پارامتریک در دشت اراک

Figure 6- Land suitability zoning for wheat and alfalfa production with parametric model in Arak plain

جدول ۷- ماتریس مقایسه زوجی فازی شده معیارهای اصلی در کشت گندم و یونجه

Table 7- Fuzzy evaluation of the main criteria for Wheat and Alfalfa

شاخص Indicator	خصوصیات خاک Soil properties	توپوگرافی Topography	آب و هوا Climate	دسترسی Access
خصوصیات خاک Soil properties	(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)	(2, 3, 4)
توپوگرافی Topography		(1, 1, 1)	(1, 2, 3)	(2, 3, 4)
آب و هوا Climate			(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
دسترسی Access				

جدول ۸- عملکرد فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی معیارهای اصلی - گندم و یونجه
Table 8- Performance fuzzy analytical hierarchical process, for Wheat and Alfalfa

شاخص Indicator	عدد فازی Fuzzy number			وزن‌های نرمال شده Normalized weights
	پایین Down	وسط Center	بالا Top	
خصوصیات خاک Soil properties	0.214936	0.42535	0.804701	0.464322
توپوگرافی Topography	0.157591	0.308692	0.592107	0.35463
آب و هوا Climate	0.061434	0.09753	0.193684	0.032187
دسترسی Access	0.085069	0.168422	0.336179	0.148861

جدول ۹- وزن‌های حاصل از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی معیارها
Table 9- Weights derived from performance fuzzy analytical hierarchical process for all criteria

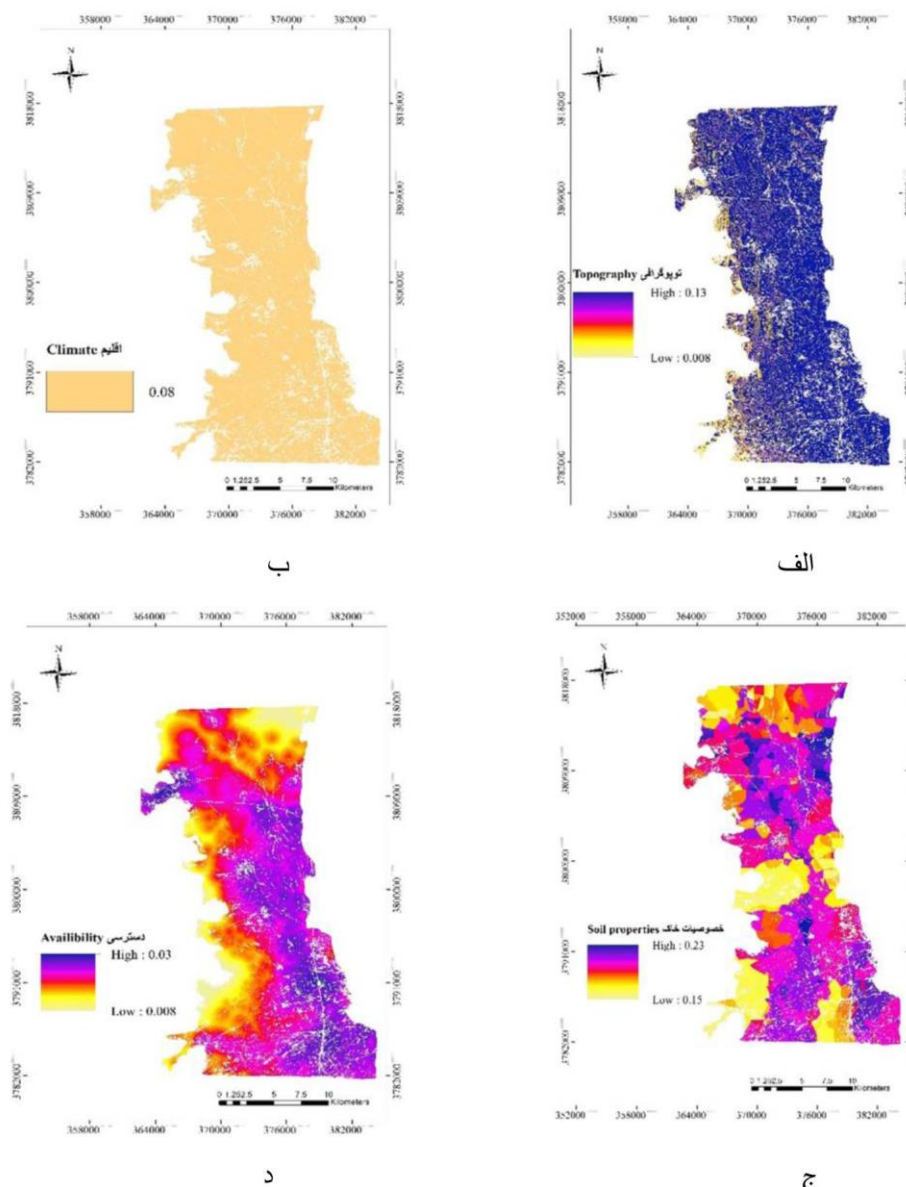
معیارها و زیر معیارها Criteria and sub-criteria	وزن‌های نرمال شده Normalized weights	
	گندم Wheat	یونجه Alfalfa
خاکشناسی Soil science		
بافت Soil Texture	0.2	0.23
سنگریزه Gravel	0.22	0.3
عمق خاک Soil depth	0.18	0.21
ماده آلی Percentage of organic matter	0.15	0.06
شوری (dS/m) EC	0.05	0.05
اسیدیته pH	0.11	0.07
میزان فسفر قابل استفاده خاک The amount of usable phosphorus in the soil (mg/kg)	0.01	0.03
میزان پتاسیم قابل استفاده خاک The amount of usable potassium in the soil (mg/kg)	0.05	0.001
درصد آهک Percentage of CaCO_3	0.01	0.05
شاخص سازگاری Compatibility index	0.06	0.09
توپوگرافی Topography		
جهت شیب Slope direction	0.85	0.69
شیب Slope %	0.14	0.31
شاخص سازگاری Compatibility index	0.001	0.00
اقلیم Climate		
متوسط درجه حرارت سیکل رشد Average growth cycle temperature	0.26	0.78

رطوبت نسبی (یونجه)	–	0.22
Relative humidity Alfalfa		
متوسط درجه حرارت مرحله رشد سبزینه	0.23	–
The average temperature of the vegetable growth stage		
متوسط درجه حرارت مرحله گلدهی	0.21	–
Average temperature of the flowering stage		
متوسط درجه حرارت رسیدن دانه	0.17	–
Average seed ripening temperature		
متوسط درجه حرارت حداقل سردترین ماه	0.09	–
Average minimum temperature of the coldest month		
متوسط درجه حرارت حداکثر سردترین ماه	0.001	–
Average maximum temperature of the coldest month		
شاخص سازگاری	0.01	0.0
Compatibility index		
دسترسی		
Access		
فاصله تا آب‌های سطحی	0.4	0.4
Distance to surface water		
دسترسی به آب زیر زمینی	0.32	0.32
Distance to underground water wells		
فاصله تا جاده	0.11	0.11
Distance to the road		
فاصله تا مراکز جمعیتی	0.1	0.1
Distance to population centers		
فاصله تا شرکت های تعاونی	0.06	0.06
Distance to the cooperative company		
شاخص سازگاری	0.02	0.02
Compatibility index		

جدول ۱۰- طبقه بندی تناسب اراضی بر اساس درصد مساحت هر طبقه کلاس تناسب

Table 10- Land suitability classes according to the percent of each suitability class

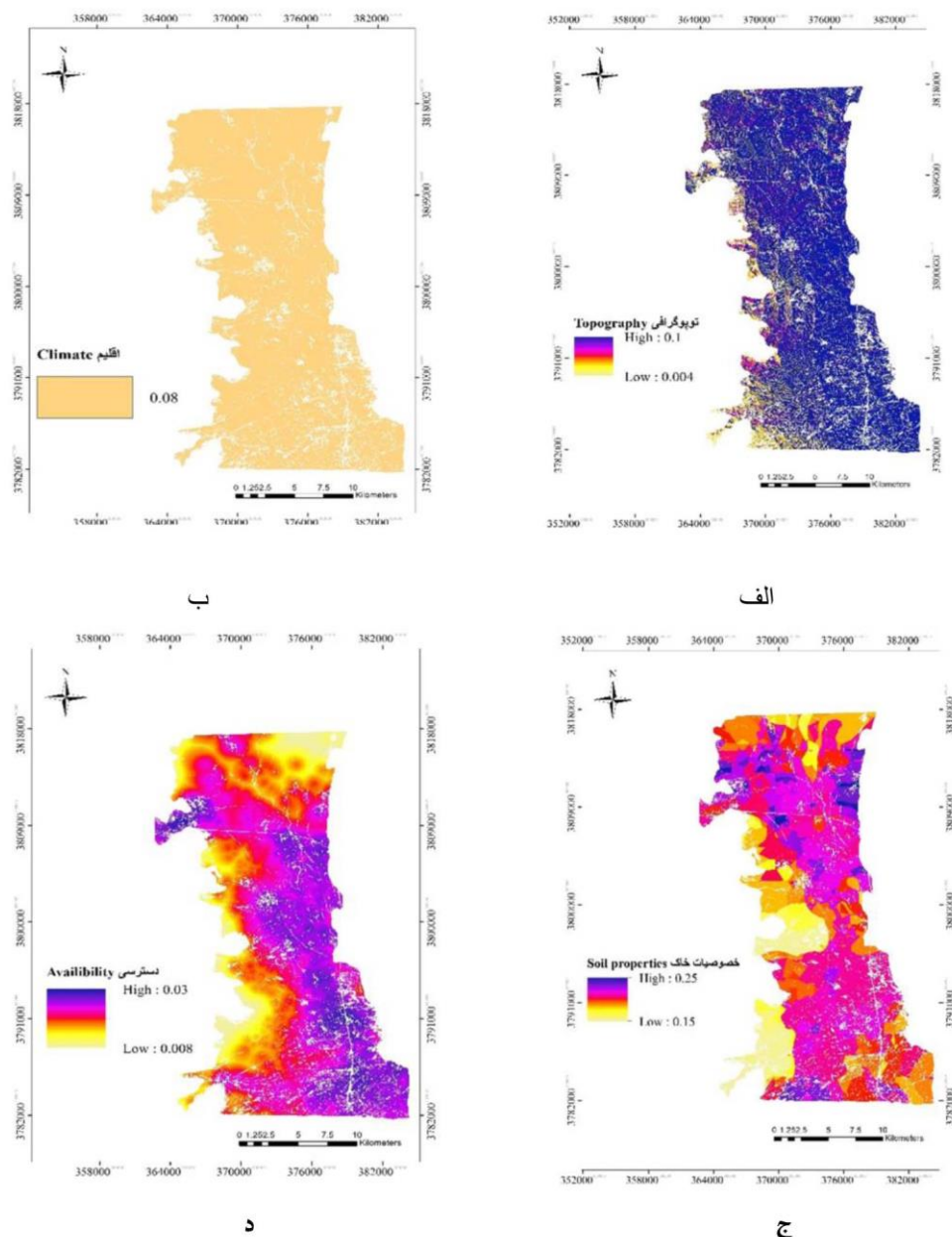
کلاس تناسب اراضی Land suitability class	مدل پارامتریک Parametric model		مدل FAHP FAHP model	
	گندم % Wheat	یونجه % Alfalfa	گندم % Wheat	یونجه % Alfalfa
تناسب بالا High suitability	32	46	28	60
متناسب Suitability	68	54	32	22
تناسب متوسط Average suitability	0	0	23	8
تناسب کم Low suitability	0	0	15	10
بدون تناسب Unsuitability	0	0	2	0
مجموع Total	100	100	100	100



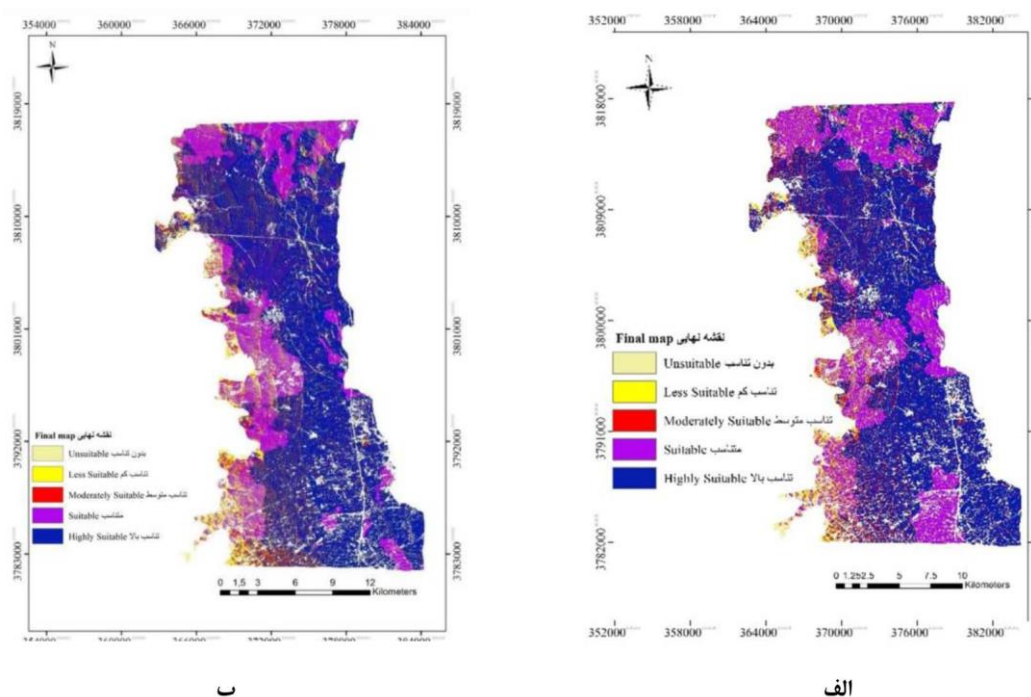
شکل ۷- نقشه‌های تناسب (کشت گندم)، (الف) توپوگرافی، (ب) شرایط اقلیمی، (ج) خصوصیات خاک، (د) دسترسی
Figure 7- Suitability maps(wheat cultivation) of topography (a), soil properties (b), climatic conditions (c), and accessibility factor (d)

مناسب، کمتر مناسب و نامناسب با مرزهای تدریجی تفکیک گردید و مساحت هر طبقه تناسب در منطقه محاسبه گردید. نقشه‌های ارزیابی بدست آمده از تناسب کیفی نیز به نقشه رستری تبدیل شدند و به ۲ طبقه بسیار مناسب و مناسب تفکیک گردید (جدول ۱۰).

در نهایت نقشه تناسب اراضی طبقه بندی شده منطقه مورد مطالعه برای کشت گندم و یونجه با همپوشانی وزنی چهار نقشه تناسب که از معیارهای اصلی استخراج شده بود بدست آمد (شکل ۹). نقشه‌های نهایی حاصل شده براساس Natural Breaks در نرم افزار ArcGIS به ۵ طبقه تناسب اراضی بسیار مناسب، مناسب، نسبتا



شکل ۸- نقشه‌های تناسب (کشت یونجه)، (الف) توپوگرافی، (ب) شرایط اقلیمی، (ج) خصوصیات خاک، (د) دسترسی
Figure 8- Suitability maps (alfalfa cultivation) of topography (a), soil properties (b), climatic conditions (c), and accessibility factor (d)



شکل ۹- پهنه‌بندی تناسب اراضی با مدل FAHP در دشت اراک. الف- گندم ب- یونجه
Figure 9- The zonation of land suitability by FAHP model in ARAK plain. A- Wheat B- Alfalfa

نتیجه‌گیری

بررسی نقشه‌های تناسب ارزیابی تهیه شده با مدل FAHP نشان داد از کل منطقه، ۸۰٪ برای کشت گندم و ۸۲٪ برای کشت یونجه بسیار مناسب و مناسب می‌باشد (جدول ۵) و به ترتیب برای کشت گندم و یونجه ۳۲٪ و ۴۶٪ از مساحت منطقه دارای تناسب S_1 و ۶۸٪ و ۵۴٪ دارای تناسب S_2 می‌باشند. نتایج نشان داد که سطح وسیعی از منطقه پتانسیل بالایی برای کشت و تولید گندم و یونجه دارد. پس مناطقی می‌باشد که کشت این دو محصول در مناطقی که برای کشت بسیار مناسب هستند، صورت پذیرد. علاوه بر این، سایر محصولات باید در مناطقی کاشته شوند که برای کشت گندم و یونجه کمتر مناسب هستند. ضریب کاپا بدست آمده از مقایسه مقادیر تولید مشاهده شده با نقشه‌های حاصل از مدل پارامتریک و FAHP به ترتیب برای کشت گندم ۰٫۳۳ و ۰٫۳ و کشت یونجه ۰٫۴۲ و ۰٫۰۱ بود که نشان دهنده تطابق ضعیف مدل پارامتریک با شرایط واقعی کشت در منطقه در راستای ارزیابی تناسب اراضی است. همچنین مقدار پایین ضریب کاپا در هر دو مدل بیانگر مدیریت بسیار پایین مزرعه توسط کشاورز می‌باشد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی با ۹ درجه‌بندی نظرات کارشناسان برای انواع معیارها را باهم می‌سجد و با ترکیبی از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای ارزیابی و شناسایی محل و محصول

مناسب کشت مناسب می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که FAHP یک استراتژی کارآمد برای افزایش دقت تخصیص وزن به معیارهایی است که بر تحلیل تناسب زمین تأثیر می‌گذارد. روش تحقیق حاضر با کاربرد مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند برای اولویت‌بندی اراضی کشت گندم و یونجه، بهبود بهره‌برداری، حفظ منابع و ایجاد مدیریت پایدار با بکارگیری انواع معیارهای متفاوت و موثر از نظر کارشناسان (مسائل اقتصادی و زیست محیطی و ...) اطلاعات مفیدی را در اختیار بهره‌برداران بخش کشاورزی قرار دهد و بینش مفیدی در انتخاب الگوی کشت مناسب در منطقه ارائه دهد. استفاده از معیارهای مختلف در مدل AHP فازی و همچنین مقایسه نتایج مدل‌ها و کاربرد تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره برای انواع محصولات کشاورزی در راستای بهره‌وری کمتر در مصرف آب در تحقیقات آتی توصیه می‌شود. با توجه به اینکه در الگوی کشت نیاز به نقشه‌های تناسب اراضی به عنوان نقشه‌های پایه می‌باشد لذا داشتن بهترین نقشه تناسب اراضی کمک شایانی به طرح الگوی کشت در منطقه می‌نماید. آگاهی از این که چه محصولاتی به طور طبیعی بهترین بازده را در یک قطعه زمین دارند، اطلاعات بسیار مفیدی را در اختیار مدیران و تصمیم‌گیران در سازمان جهاد کشاورزی و منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی منطقه قرار می‌دهد.

1. Ayubi, S., & Jalalian, A. (2014). *Land evaluation (agricultural uses and natural resources)*. Publications of Isfahan University of Technology. Fifth Edition. (In Persian)
2. Brahma, B., Pathak, K., Lal, R., Kurmi, B., Das, M., Nath, P.C., & Das, A.K. (2018). Ecosystem carbon sequestration through restoration of degraded lands in Northeast India. *Land Degradation & Development* 29(1): 15-25. <https://doi.org/10.1002/ldr.2816>.
3. Chang, D.Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research* 95(3): 649-655. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2).
4. Chen, Y., Yu, J., & Khan, S. (2010). Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling & Software* 25(12): 1582-1591. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>.
5. Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement* 20(1): 37-46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>.
6. Dent, D., & Young, A. (1981). *Book: Soil survey and land evaluation*. George Allen & Unwin.
7. FAO. (1976a). A framework for land evaluation. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
8. FAO. (1976b). *A framework for land evaluation*. FAO Soil Bulletin 32. Rome.
9. FAO. (1983). *Guidelines: land evaluation for rainfed agriculture*. FAO Soils Bulletin, No. 52, FAO, Rome.
10. FAO. (1985). *Guideline: land evaluation for irrigated agriculture*. FAO Soils Bulletin, No. 55. Rome.
11. FAO. (1993). *Guideline for Land use planning*. FAO Development Series No: 21, Rome, p 96.
12. Fekadu, Dadi, A., Miller, E.R., & Mwanri, L. (2020). Antenatal depression and its association with adverse birth outcomes in low and middle-income countries: a systematic review and meta-analysis. *PloS One* 15(1): e0227323. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227323>.
13. Gee, G.W., & Bauder, J.W. (1986). *Particle-size analysis In: A. Klute, Methods of soil analysis, Part 1-Physical and mineralogical methods*, 2nd edition, Soil Sci. Soc. Am. Madison, Wiscon. USA. 383-409.
14. Jiang, H., & Eastman, J.R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science* 14(2): 173-184. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/136588100240903>.
15. Karlen, D.L. (2008). Sustainability indicators: a scientific assessment. *Journal Environment Quality* 37: 1663-1663. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0005br>.
16. Kihoro, J., Bosco, N.J., & Murage, H. (2013). Suitability analysis for rice growing sites using a multicriteria evaluation and GIS approach in great Mwea region, Kenya. *SpringerPlus* 2(1): 1-9. Available at <https://link.springer.com/article/10.1186/2193-1801-2-265>.
17. Mert, M., Bölük, G., & Çağlar, A.E. (2019). Interrelationships among foreign direct investments, renewable energy, and CO₂ emissions for different European country groups: a panel ARDL approach. *Environmental Science and Pollution Research* 26(21): 21495-21510. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05415-4>.
18. Musavi, M., & Bozorgi-Amiri, A. (2017). A multi-objective sustainable hub location-scheduling problem for perishable food supply chain. *Computers & Industrial Engineering* 113: 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.039>.
19. Pilevar, A.R., Matinfar, H.R., Sohrabi, A., & 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>.
20. Reak R., Kalra, Y., Vaughan, B., & Wolf, A.M. (1990). *Soil analysis handbook of reference methods*. CRC press. 1st Edit, pp. 264.
21. Reshmidevi, T.V., Eldho, T.I., & Jana, R. (2009). A GIS-integrated fuzzy rule-based inference system for land suitability evaluation in agricultural watersheds. *Agricultural Systems* 101(1-2): 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2009.04.001>.
22. Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy: planning, priority setting, resource allocation* (Decision Making Series). New York, McGraw-Hill. <http://citeseerx.ist.psu.edu/doi=10.1.1.410.5705>.
23. Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, IJ. (1991a). *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.
24. Sys, C., Van Ranst, E., & Debaveye, IJ. (1991b). *Land evaluation*. Part II: methods in land evaluation. General Administration for Development Cooperation, Agricultural Publication-No. 7, Brussels, Belgium, p 247.
25. Sys, C., Van Ranst, E., Debaveye, IJ., & Beernaert, F. (1993). *Land evaluation*. Part III: crop requirements. General Administration for Development Cooperation, Agricultural Publication-No. 7, Brussels, Belgium, p 199.
26. Triantafyllis, J., Odeh, I.O.A., & McBratney, A.B. (2001). Five geostatistical models to predict soil salinity from electromagnetic induction data across irrigated cotton. *Soil Science Society of America Journal* 65(3): 869-878.

<https://doi.org/10.2136/sssaj2001.653869x>.

27. Yu, J., Chen, Y., & Wu, J.P. (2009). *Cellular automata and GIS based land use suitability simulation for irrigated agriculture*. In 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, Australia (pp. 13-17). Retrieved from https://mssanz.org.au/modsim09/I8/yu_j.pdf.
28. Yu, J., Chen, Y., Wu, J., & Khan, S. (2011). Cellular automata-based spatial multi-criteria land suitability simulation for irrigated agriculture. *International Journal of Geographical Information Science* 25(1): 131-148. <https://doi.org/10.1080/13658811003785571>.



Effects of Spent Mushroom Substrates and Alfalfa Green Manure on Selected Fertility Indicators of Soil Quality and Spinach's Nutrients

T. Gheitasi Ranjbar¹, M. Nael^{2*}

Received: 30-10-2022

Revised: 23-12-2022

Accepted: 28-12-2022

Available Online: 28-12-2022

How to cite this article:

Gheitasi Ranjbar, T., & Nael, M. (2023). Effects of Spent Mushroom Substrates and Alfalfa Green Manure on Selected Fertility Indicators of Soil Quality and Spinach's Nutrients. *Journal of Water and Soil* 37(1): 63-75. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.79340.1217>

Introduction

Conventional cropping systems, dependent on heavy application of chemical fertilizers, are not ecologically and environmentally sustainable; they are a threat for soil and water quality and, in consequence, for plant and human health. Nitrogen fertilizers are heavily applied in conventional leaf vegetable production systems to obtain maximum growth and yield. However, the excess nitrogen tends to accumulate in leaf vegetables in the form of nitrate, which pose serious human health hazards. Therefore, to supply nitrogen from non-chemical sources, such as organic amendments, is a sustainable practice for production of leaf vegetables. Spent mushroom substrate (SMS), which is the remaining material after the harvest of mushroom, is produced in large quantities (5 kg SMS for 1 kg of mushroom) and is enriched with organic carbon, N, P, K, and micronutrients. Therefore its reuse as a soil amendment not only provides essential elements for plants but also improves soil quality. Similarly, incorporation of green manures, especially legume green manures, into cropping systems is a sustainable practice for soil fertility and soil quality management. In this study, we aimed to investigate the short-term effects of two soil organic amendments (spent mushroom substrate and alfalfa residues) and their combination, in comparison to inorganic N fertilizer (urea), on soil fertility, and selected essential nutrients, and nitrate accumulation in a leaf vegetable, test plant (spinach).

Materials and Method

A one-season pot experiment was led in a randomized complete block design with three replications in experimental greenhouse of Bu-Ali Sina University. Treatments were comprised of two levels of spent mushroom substrate (SMS-1: 2% SMS, and SMS-2: 5% SMS), two levels of alfalfa green manure (AGM-1: 1% AGM, and AGM-2: 3% AGM); two levels of the mixture of SMS and AGM (SMS+AGM-1: 1% SMS plus 0.5% AGM; and SMS+AGM-2: 2.5% SMS plus 1.5% AGM); two levels of urea fertilizer (U-1: 120 kg/ha, and U-2: 360 kg/ha); and control. Selected properties of the initial soil and both organic amendments were determined. Spinach (*Spinacea oleracea* L.) was seeded as leaf vegetable, test plant in early autumn 2017. After ten weeks, spinach were harvested and the aboveground and root dry weights were determined. Moreover, the content of NO₃⁻, P, Fe, Cu, Zn, and Mn in edible parts were measured. Soil samples were analyzed for EC, pH, total organic carbon, available P and K, and alkaline phosphatase activity.

Results and Discussion

All soil quality indicators were significantly affected by the treatments. TOC was significantly increased in all of the organic treatments compared to the chemical and control treatments. The maximum increase in TOC was observed in SMS-2, SMS+AGM-2, and AGM-2 treatments, compared to the control (134, 130 and 107%, respectively). A decreasing trend in TOC was detected in the high level of urea treatment (U-2) compared to the control which can be explained by the faster decomposition of soil organic matter in the presence of higher

1 and 2- Ph.D. Student in Soil Science and Assistant Professor, Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.

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

inorganic N inputs. Both organic amendments (in both levels) and the higher level of urea (U-2) decreased soil pH compared to the control. The initial low pH of SMS (5.6) and AGM (6.2), in the first case, and oxidation of urea to nitrate, in the latter, may justify this observation. In contrast, soil EC increased under the both organic amendments relative to the control and U-1 treatments. Moreover, the adverse effect of SMS on soil salinity was greater than AGM due to the initial differences in their corresponding source materials (5.8 vs. 3.0 ds/m). Available K was significantly increased in the second level of all organic treatments compared to the chemical and control treatments. As for available P, all organic treatments, except AGM-1, led to the significantly higher P than the chemical and control treatments. It is reported that organic materials compete with mineral particles for P adsorption and increase its availability. Moreover, all organic treatments, except SMS-1, significantly increased phosphatase activity compared to the chemical and control treatments. This could contribute to the mineralization of organic materials and increase available P.

Spinach yield was affected by the experimental treatments. The highest increase in shoot dry weight occurred in SMS+AGM-2 and AGM-2 treatments by 235 and 230%, respectively, compared to the control. Moreover, the second level of all organic treatments as well as the first level of SMS plus AGM treatment significantly increased yield compared to the chemical treatments. Spinach P content was significantly higher in all organic treatments, except SMS-1 and AGM-1, compared to the chemical and control treatments. Organic amendments, by decreasing the surface adsorption of P and increasing soil microbial biomass, promote the availability of P for plants. Spinach nitrate content ranged from 265 (in control) to 7807 mg/kg (in U-2). According to the critical limit of nitrate in spinach (4000 mg/kg) presented by European Union, only U-2 treatment led to over-accumulation of NO_3^- . The two levels of AGM treatments and SMS+AGM-2 resulted in the comparable amounts of nitrate as the recommended amount of urea (U-1). A narrow variation in spinach Cu content (from 6.1 in SMS+AGM-2 to 9.8 mg/kg in AGM-2), all within the standard range reported for plants (5-20 mg/kg), was observed among the treatments. Spinach Fe content was increased under all organic treatments relative to the control, although some disparities were not significant. The lowest Fe was detected in U-2. It is reported that excessive N may diminish root growth and, in turn, reduce nutrient uptake. Spinach Zn content varied from 44.8 (in control) to 71.5 mg/kg (in SMS-2), which was close to the higher limit of standard range (20-50 mg/kg) reported for vegetables, but lower than toxic concentration range (200-400 mg/kg). Spinach Mn content varied from 17.4 (in control) to 32.1 mg/kg (in SMS-2), which was close to the lower limit of the standard range (40-400 mg/kg) reported for plants.

Conclusion

The most appropriate treatments in view of improving yield and soil quality (i.e., optimum TOC, P, and K; and lower EC) as well as tolerable nitrate accumulation were SMA+AGM-1 and SMS-1 in decreasing order. These treatments are preferred over the chemical treatments (U-1 and U-2).

Keywords: Micronutrients, Nitrate accumulation, Organic amendment, Soil quality, Sustainable agriculture

تاثیر کاربرد پسماند بستر کشت قارچ و کود سبز یونجه بر برخی شناسه‌های حاصلخیزی کیفیت خاک و عناصر مغذی در اسفناج

تهمینه قیطاسی رنجبر^۱ - محسن نائل^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

چکیده

به منظور بهبود کمیت و کیفیت محصول و ارتقاء کیفیت خاک، استفاده بهینه از بهسازی‌های آلی یک ضرورت است. در مطالعه حاضر، اثر دو بهساز آلی، در مقایسه با کود شیمیایی اوره، بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک، هم چنین عملکرد و برخی عناصر غذایی گیاه اسفناج بررسی شد. آزمایش در قالب بلوک‌های کامل تصادفی، با سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل کود سبز یونجه^۳ (AGM) در دو سطح ۱ و ۳ درصد، پسماند بستر کشت قارچ^۴ (SMS) در دو سطح ۲ و ۵ درصد، کود اوره (U) در دو سطح ۱۲۰ و ۳۶۰ کیلوگرم بر هکتار، ترکیب AGM و SMS (SA) در دو سطح ۱/۵ درصد (به ترتیب ۰/۵ و ۱ درصد) و ۴ درصد (به ترتیب ۱/۵ و ۲/۵ درصد)، و شاهد بود. نتایج نشان داد کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی، پی‌اچ، فعالیت آنزیم فسفاتاز، پتاسیم و فسفر فراهم تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند. تمام تیمارهای پسماند بستر قارچ، کود سبز یونجه و ترکیبی موجب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک نسبت به تیمارهای شاهد و کود شیمیایی شدند. تیمار SMS-2 بیشترین افزایش EC را نسبت به تیمارهای شاهد و U-1 (به ترتیب، با ۵۵۲ و ۵۲۰ درصد افزایش) داشت. کود سبز یونجه نیز موجب افزایش EC خاک نسبت به شاهد شد، با این حال اثر منفی این بهساز آلی بر شوری خاک کم‌تر از SMS بود. از طرفی، در تیمارهای U-2؛ AGM-2؛ SMS-2؛ SMS-1؛ SA-2 و SA-1 بیشترین کاهش پی‌اچ نسبت به تیمار شاهد دیده شد. کاهش پی‌اچ در تیمارهای حاوی بهسازی‌های آلی به دلیل پی‌اچ اسیدی اولیه آنها بود. بیشترین محتوای پتاسیم و فسفر فراهم، و فعالیت آنزیم فسفاتاز در تیمار SMS-2 مشاهده شد. عملکرد گیاه و غلظت نیترات، فسفر، آهن، روی، منگنز و مس تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت. تیمارهای بهسازی‌های آلی (AGM-1، AGM-2، SMS-2؛ AS-1 و AS-2) توانستند نیاز کودی گیاه اسفناج را برطرف کنند و عملکرد گیاه را نسبت به دو تیمار کود اوره افزایش دهند. بیشترین غلظت نیترات گیاه در تیمار کود شیمیایی U-2 دیده شد که از حد مجاز فراتر بود. غلظت فسفر گیاه در تیمارهای SMS-2، AGM-2 و دو تیمار ترکیبی به طور معنی‌داری بیشتر از تیمارهای کود شیمیایی بود. بیشترین مقدار آهن در گیاه در هر دو سطح پسماند بستر قارچ و تیمار کود سبز یونجه، و کمترین آن در تیمار U-2 مشاهده شد. هر دو بهساز آلی باعث افزایش معنی‌دار منگنز گیاه نسبت به دو تیمار کود شیمیایی شدند. با این حال، تنها تیمار پسماند بستر قارچ (SMS-2) توانست غلظت روی در گیاه را به طور معنی‌داری نسبت به تیمارهای کودی افزایش دهد. با توجه به اینکه سطوح بالای تیمارهای کود سبز یونجه و تیمار ترکیبی، علی‌رغم افزایش عملکرد گیاه و ارتقاء کیفیت خاک، موجب تجمع نیترات در مرز بحرانی، در گیاه اسفناج شدند، و از طرف دیگر استفاده مداوم از سطح بالای کمپوست بستر قارچ خطر شور شدن خاک را به همراه دارد، تیمار ترکیبی SA-1، و پس از آن تیمار پسماند بستر قارچ SMS-1 به عنوان مناسب‌ترین تیمارها از نظر بهبود کیفیت خاک و بهبود عملکرد و کیفیت اسفناج شناخته شد.

واژه‌های کلیدی: بهساز آلی، تجمع نیترات، کشاورزی پایدار، کیفیت خاک، عناصر کم‌مصرف

۱ و ۲- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(Email: m.nael@basu.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول

مقدمه

نظام‌های کشت متکی بر مقادیر بالای نهاده‌های شیمیایی نه تنها تهدیدکننده سلامت خاک، گیاه و انسان هستند، بلکه ناپایداری اقتصادی بخش کشاورزی را نیز در پی دارد. نیاز به نیتروژن در نظام‌های کشت سبزیجات یکی از موضوعات مهم در رابطه با کوددهی سبزی‌ها به ویژه سبزی‌های برگ‌ری می‌باشد، زیرا تولیدکنندگان برای افزایش رشد و عملکرد تمایل به مصرف زیاد انواع کودهای حاوی نیتروژن دارند. با این حال، از نظر سلامتی مصرف‌کنندگان، غلظت کم ترکیبات مضر نیتروژن‌دار مانند نیترات در سبزی‌ها مطلوب است. در برگ‌های گیاه اسفناج احتمال تجمع زیاد نیترات و اگزالات وجود دارد و میزان تجمع آن‌ها در اندام‌هایی از شاخص‌های تعیین‌کننده کیفیت اسفناج می‌باشد (Jaworska, 2005). گیاه اسفناج به خوبی به مصرف کودهای حاوی نیتروژن پاسخ می‌دهد و افزایش کودهای شیمیایی حاوی نیتروژن به طور واضحی سبب افزایش نیترات در بخش‌های اسفناج می‌گردد (Wang et al., 2009). علاوه بر این، استفاده طولانی مدت از کودهای شیمیایی بدون ورود مواد آلی کافی، یکی از عوامل اصلی کاهش مواد آلی خاک، تخریب ساختمان خاک، کاهش فعالیت‌های بیولوژیکی و در نتیجه کاهش باروری خاک شناخته شده است (Zhong and Cai, 2007). از طرف دیگر، کاهش ورودی‌های کود نیتروژنی می‌تواند فعالیت باکتری‌های نیتروژن‌زا را افزایش داده و در نتیجه تثبیت بیولوژیکی نیتروژن را برای اکوسیستم‌های زراعی سبب شود. لیو و همکاران (Liu et al., 2009) گزارش دادند که استفاده از به‌سازهای آلی همراه با کاهش کود شیمیایی باعث افزایش زیست‌توده و فعالیت میکروبی شد و در دسترس بودن مواد مغذی را در مقایسه با استفاده از کود شیمیایی افزایش داد.

تبدیل ضایعات و پسماندهای کشاورزی و صنایع تبدیلی به به‌سازهای آلی و استفاده مجدد از آن‌ها در کشاورزی یک عملیات پایدار و هماهنگ با قانون بازگردش طبیعی مواد در اکوسیستم است. تولید قارچ خوراکی در سراسر جهان گسترده و رایج است. ضایعات تولید قارچ خوراکی به عنوان پسماند بستر کشت قارچ (SMS) شناخته می‌شود. تقریباً به ازای تولید یک کیلوگرم قارچ خوراکی، پنج کیلوگرم SMS تولید می‌شود (Medina et al., 2012). تولید قارچ در ایران در حال افزایش است، به طوری که میزان تولید قارچ از ۷۷۴۴ تن در سال ۲۰۱۷ به ۱۰۵۳۳۲ تن در سال ۲۰۱۸ افزایش یافته است (FAO, 2021). بنابراین می‌توان تخمین زد که سالانه ۵۲۶۱۶۰ تن SMS در ایران تولید می‌شود. قارچ خوراکی در لایه‌های مختلف لیگنوسلولوزی مانند کاه گندم، خاک اره، یا ضایعات پنبه کشت می‌شود. به همین ترتیب، SMS به دلیل قابلیت هوادهی مطلوب و نفوذپذیری

بالا می‌تواند به‌ساز مناسبی برای خاک باشد. روش‌های مختلفی برای حذف این پسماندها، از جمله احتراق، دفن زباله، استفاده از آن برای اصلاح آب و خاک، محیط رشد بدون خاک و استفاده مجدد در تولید قارچ خوراکی وجود دارد. محققان دریافته‌اند که SMS برای محصولات با دوره رشد طولانی کارایی بیشتری دارد، زیرا SMS معمولاً برای معدنی شدن به مدت زمان طولانی نیاز دارد (Zanella et al., 2018). استفاده از SMS در کشت کاهو و تره اثرات مثبتی بر عملکرد این گیاهان داشته و عملکرد مشابه کودهای معدنی را نشان داده است (Zanella et al., 2018). مطالعات نشان می‌دهد محتوای نیترات سبزیجات در حضور SMS کمتر از حد مجاز و همچنین کمتر از سبزیجات کشت شده با کود شیمیایی بود (Gobbi et al., 2018). با این حال، استفاده بلافاصله از بستر قارچ مصرفی به دلیل شوری بالا توصیه نمی‌شود. هنگامی که SMS به درستی و مناسب استفاده شود، بستر مناسبی برای بهبود سلامت خاک و رشد گیاه خواهد بود. آزمایشات نشان داده است که SMS منبع بسیار خوبی از فسفر، پتاسیم و عناصر کم‌مصرف است (Cabilovski et al., 2014).

به علاوه، کشت محصولات پوششی و کود سبز نیز می‌تواند جایگزین مناسبی برای کودهای شیمیایی باشد. اختلاط مواد گیاهی با خاک برای حفظ یا بهبود باروری خاک برای محصول بعدی به عنوان کود سبز شناخته می‌شود. اگر چه استفاده از مواد آلی به عنوان منبع نیتروژن در کشاورزی به اندازه کافی با نیازهای گیاهان همپوشانی ندارد، اما بسیاری از محققان بر نقش مواد آلی در افزایش کارایی استفاده از نیتروژن تأکید کرده‌اند (Dobermann et al., 2003). تجزیه میکروبی کود سبز باعث آزاد شدن عناصر غذایی برای گیاهان و افزایش کربن و مواد آلی، نیتروژن کل و حاصلخیزی خاک می‌شود (Talgre et al., 2009). ماتوس و همکاران (Matos et al., 2008) در مطالعات خود نشان دادند که با استفاده از کودهای سبز لگوم، مقدار عناصر غذایی خاک و نیتروژن معدنی خاک افزایش یافته است. کود سبز در کشور ما فقط در برخی مناطق و به میزان محدود استفاده می‌شود (Mohammadi et al., 2015). گران بودن کود دامی و عدم استفاده صحیح از آن، نقش اندک کودهای آلی را در افزایش باروری و بهبود خاک در ایران رقم زده است (Mohammadi et al., 2015). دیباچی و همکاران (Dabighi et al., 2017) نشان دادند افزودن کود سبز (ارزن، جو، ماش) به خاک سبب افزایش عناصر غذایی (فسفر، پتاسیم و ازت) و کاهش علف هرز در خاک می‌شود.

مطالعه حاضر با هدف بررسی اثر سطوح مختلف پسماند بستر قارچ، کود سبز یونجه و ترکیب آن‌ها، به عنوان دو به‌ساز آلی و جایگزین برای کود شیمیایی اوره، بر برخی شاخص‌های حاصلخیزی کیفیت خاک، عملکرد و کیفیت گیاه محک (اسفناج) انجام گردید. با توجه به اینکه شایع‌ترین مدیریت عناصر مغذی در زمین‌های تحت

مورد استفاده در این پژوهش شامل کود سبز یونجه در دو سطح (۱ و ۳ درصد)، بستر قارچ باقیمانده در دو سطح (۲ و ۵ درصد)، کود اوره در دو سطح (۱۲۰ و ۳۶۰ کیلوگرم بر هکتار)، ترکیب کود سبز یونجه و بستر قارچ باقیمانده در دو سطح (۱/۵ درصد (۰/۵ درصد کود سبز یونجه و ۱ درصد بستر قارچ باقیمانده) و ۴ درصد (۱/۵ درصد کود سبز یونجه و ۲/۵ درصد بستر قارچ باقیمانده)، و تیمار شاهد بود. برخی از ویژگی‌های خاک و بهسازی‌های مورد استفاده در این پژوهش در [جدول ۱](#) ارائه شده است.

مراحل کاشت، داشت و برداشت گیاه

در این پژوهش گیاه اسفناج به عنوان گیاه محک انتخاب شد. برای کشت گیاه، گلدان‌هایی با بلندی ۲۵ و پهنای دهانه ۱۸ سانتی‌متر به کار گرفته شد. به طور متوسط داخل هر گلدان $3/25 \pm 0/25$ کیلوگرم خاک تیمار شده ریخته شد. تعداد ده عدد بذر اسفناج رقم ماتادور (*Spinacea oleracea* L.) در عمق حدود یک سانتی‌متری در هر گلدان کاشته شد و پس از جوانه‌زنی، نهایتاً تعداد اسفناج‌ها در هر گلدان به سه عدد کاهش یافت. لازم به ذکر است هر دو سطح تیمار کود شیمیایی اوره (۱۲۰ و ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار) طی سه مرحله به خاک افزوده شد. به این ترتیب که در تیمار ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار، در هر مرحله ۴۰ کیلوگرم در هکتار و در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم بر هکتار، در مرحله اول ۴۰ کیلوگرم در هکتار و در مراحل دوم و سوم به طور یکسان ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار کود اوره اضافه شد. نوبت اول کوددهی همزمان با کشت، نوبت دوم در مرحله سه برگی شدن گیاه اسفناج و نوبت سوم یک هفته پس از سه برگی شدن به خاک افزوده شد. آبیاری گلدان‌ها با آب شرب و تا رسیدن به حدود رطوبت ظرفیت زراعی انجام شد. پس از گذشت ده هفته، قسمت هوایی (برگ و ساقه) و ریشه گیاهان برداشت شد.

تجزیه‌های آزمایشگاهی خاک

خاک گلدان‌ها پس از برداشت گیاه و جداسازی ریشه‌ها، در معرض هوا خشک شد و پس از کوبیدن و عبور از الک دو میلی‌متری جهت تجزیه آزمایشگاهی آماده گردید. هدایت الکتریکی و اسیدیته برای تیمارها به ترتیب، با نسبت ۱:۵ و ۱:۲۰ خاک به آب، به کمک دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (مدل ۷۱۲ش) و دستگاه پی‌اچ متر (مدل ۸۲۷) اندازه‌گیری شد. پتاسیم فراهم نمونه‌های خاک به روش استات آمونیوم یک نرمال اندازه‌گیری شد ([Helmke and Sparks, 1996](#)). فسفر در نمونه‌ها به روش السن و با عصاره‌گیری کربنات سدیم، در پی‌اچ برابر ۸/۵ اندازه‌گیری شد ([Olsen, 1954](#)). کربن آلی خاک به روش اکسایش تر اندازه‌گیری شد ([Walkley and Black, 1934](#)). همچنین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی ([Thomas, 1996](#)) اندازه‌گیری شد.

کشت سبزیجات در شهرستان همدان استفاده از کودهای شیمیایی، به ویژه اوره، در مقادیر بسیار بالاتر از مقدار توصیه شده می‌باشد، اثرات دو سطح مختلف کود اوره (مقدار توصیه شده بر اساس نتایج تجزیه خاک و میانگین مقدار مورد استفاده کشاورزان در منطقه) مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه، از آنجایی که گیاه اسفناج به مقادیر بالای نیتروژن خاک پاسخ داده و یک گیاه بیش‌انباشتگر برای نیترات بحساب می‌آید، میزان تجمع نیترات در این گیاه تحت تاثیر تیمارهای آزمایشی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

تیمارهای آزمایشی

این پژوهش به صورت گلدانی و در گلخانه تحقیقاتی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شد. نمونه خاک از زمینی واقع در مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان همدان با مختصات جغرافیایی ($34^{\circ} 17' 92''$ عرض شمالی و $48^{\circ} 53' 71''$ طول شرقی)، از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه گردید. خاک پس از هوا خشک شدن از الک ۳/۳۶ میلی‌متر گذرانده شد. بافت خاک ([Gee and Bauder, 1986](#))، گنجایش تبادل کاتیونی ([Bower et al., 1952](#)) و کربن آلی خاک به روش اکسایش تر ([Walkley and Black, 1934](#)) برای نمونه خاک اولیه اندازه‌گیری شد. همچنین هدایت الکتریکی و اسیدیته خاک اولیه با نسبت ۱:۵ خاک به آب، به کمک دستگاه هدایت سنج الکتریکی (مدل ۷۱۲ش) و دستگاه پی‌اچ متر (مدل ۸۲۷) اندازه‌گیری شد. پسماند بستر قارچ از شرکت کوهستان الوند واقع در شهرک صنعتی همدان تهیه شد. برای تهیه این بستر قارچ از مواد اولیه‌ای شامل: کاه گندم، سنگ گچ و کود مرغی استفاده شده بود. این ترکیب پس از استفاده به عنوان بستر پرورش قارچ و پاستوریزه شدن، به مدت یک سال در فضای آزاد رها شده بود. پسماند بستر قارچ از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. از آنجایی که امکان کاشت یونجه به عنوان کود سبز لگوم و سپس کاشت گیاه اصلی در زمان کوتاه این پژوهش میسر نبود، از یونجه خشک تازه برداشت شده، استفاده شد. یونجه تازه از مزرعه پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا واقع در روستای دستجرد تهیه شد و پس از سایه خشک شدن توسط خرمن‌کوب در ابعاد 3 ± 1 سانتی‌متر خرد شد. هدایت الکتریکی و اسیدیته پسماند بستر قارچ و یونجه با نسبت ۱:۲۰ با آب مقطر، به کمک دستگاه هدایت‌سنج الکتریکی (مدل ۷۱۲ش) و دستگاه پی‌اچ متر (مدل ۸۲۷) اندازه‌گیری شد. میزان خاکستر پسماند بستر قارچ و یونجه در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس به مدت ۵ ساعت تعیین گردید. کربن آلی به روش اکسایش تر ([Walkley and Black, 1934](#)) برای بستر قارچ و یونجه اندازه‌گیری شد. آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارهای

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک، پسماند بستر قارچ و کود سبز یونجه مورد مطالعه

Table 1- Initial physico-chemical characteristics of the soil, spent mushroom substrates (SMS) and alfalfa green manure

ویژگی (Property)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	pH	EC (dS/m)	OC (%)	CEC (cmol _c /kg)	Ash (%)
خاک Soil	61	23	16	7.6	0.2	1.34	10.3	—
پسماند بستر قارچ Spent mushroom substrates	—	—	—	5.6	5.8	29.7	—	64.3
کود سبز یونجه Alfalfa green manure	—	—	—	6.2	3.0	75.5	—	11.5

تیمارها نسبت به سطح اول افزایش بیش‌تری در محتوای کربن آلی ایجاد کرد. این دور از انتظار نبود چرا که محتوای کربن آلی در به‌سازها (AGM و SMS به ترتیب ۷۵/۵ و ۲۹/۷ در صد) بالا بود. در مقابل، کود شیمیایی اوره، بخصوص در سطح دوم (U-2)، موجب کاهش ماده آلی نسبت به شاهد شد، با این حال این تفاوت معنی‌دار نبود. علت این مشاهده را می‌توان به تجزیه سریع‌تر ماده آلی موجود در خاک در حضور نیتروژن در دسترس نسبت داد. در مطالعه‌ای تأثیر کاربرد مستمر SMS به مدت ۱۰ سال در خاک‌های شالیزار بر کربن آلی خاک بررسی شد، نتایج نشان داد که استفاده از SMS باعث افزایش ۲۱ درصدی کربن آلی شد (Li et al., 2020). در مطالعه‌ای تأثیر دو نوع متفاوت از SMS در یک خاک تحت کشت با یک محصول صیفی (*Lactuca sativa* L. var. linus) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد افزودن SMS به خاک با گذشت زمان می‌تواند به افزایش ماده آلی کمک کند (Zanella et al., 2018).

پی‌اچ و هدایت الکتریکی

تیمار شاهد با میانگین ۷/۶۶، بیش‌ترین پی‌اچ را داشت و با تیمار کود اوره (U-1) (۱۲۰ kg/ha) با میانگین ۷/۵۴ تفاوت معنی‌داری نداشت (جدول ۲). تیمارهای AGM+SMS (هر دو سطح)، SMS (هر دو سطح)، کود سبز یونجه (۳٪) (AGM-2) و U-2 دارای کم‌ترین مقادیر پی‌اچ بوده و همگی در یک گروه آماری قرار گرفتند. کاهش پی‌اچ در تیمارهای حاوی به‌سازهای آلی را می‌توان به ماهیت این اصلاح‌کننده‌ها مرتبط دانست. این به‌سازها دارای پی‌اچ اسیدی هستند (جدول ۱). همچنین تغییر پی‌اچ خاک را می‌توان بدلیل افزایش ماده آلی خاک یا هوموس که حاوی گروه‌های کربوکسیل و فنول است و همانند یک اسید ضعیف عمل کرده و یون هیدروژن آزاد می‌کنند، توجیه نمود. در مورد تیمار کود U-2، کاهش پی‌اچ می‌تواند به دلیل اکسیداسیون میکروبی آمونیوم موجود در کود و تبدیل شدن آن به نیترات باشد.

تجزیه‌های گیاهی

اندام هوایی گیاه و ریشه‌ها پس از برداشت و شستشو با آب مقطر، در آون و در دمای ۶۵ درجه سلسیوس به مدت ۴۸ ساعت نگهداری شدند. مقدار وزن خشک اندام هوایی و ریشه به طور جداگانه اندازه‌گیری شد. نیترات گیاه به روش دی‌آزو برآورد شد (Ysart et al., 1999). مقدار کل عناصر مغذی (آهن، مس، روی و فسفر) در نمونه‌های گیاهی پس از هضم با روش بورا و همکاران (Bora et al., 2015) توسط دستگاه جذب اتمی اندازه‌گیری شد.

تحلیل‌های آماری

این پژوهش در قالب طرح بلوک کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. برای نرمال کردن داده‌ها، تحلیل آماری و رسم نمودار از نرم‌افزار R و Excel استفاده شد. آزمون میانگین داده‌ها به روش دانکن و در سطح ۵ درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

اثر تیمارها بر ویژگی‌های خاک: نتایج تجزیه واریانس نشان داد کربن آلی خاک، هدایت الکتریکی، پی‌اچ، فعالیت آنزیم فسفاتاز، پتاسیم و فسفر فراهم تحت تأثیر تیمارها قرار گرفتند.

کربن آلی کل

نتیجه‌ی آزمون میانگین (جدول ۲) نشان داد، به ترتیب تیمارهای پسماند بستر قارچ (۵٪) (SMS-2) و تیمار ترکیبی (۴٪) (AGM+SMS-2) بیش‌ترین تأثیر را در افزایش مقادیر کربن آلی (به ترتیب ۳/۰۹ و ۳/۰۳ درصد) داشتند. کم‌ترین مقدار کربن آلی در هر دو سطح تیمار کود اوره و شاهد دیده شد. تیمارهای پسماند بستر قارچ (SMS)، کود سبز یونجه (AGM) و ترکیبی (AGM+SMS) (هر سه، در دو سطح) موجب افزایش معنی‌دار کربن آلی خاک نسبت به شاهد و کود شیمیایی اوره (U) شده است. به علاوه، سطح دوم این

جدول ۲- مقایسه میانگین ($\pm$ خطای استاندارد) برخی ویژگی‌های خاک تحت تاثیر تیمارها آزمایشی

 Table 2- Mean comparison ($\pm$ standard error) of selected characteristics of soil affected by the experimental treatments

تیمارها Treatments	کربن آلی کل Total organic carbon (%)	پی‌اچ pH	هدایت الکتریکی EC (dS m ⁻¹)	فسفر P (mg kg ⁻¹)	فعالیت فسفاتاز Phosphatase activity (μ g pNP g ⁻¹ h ⁻¹)	پتاسیم K (mg kg ⁻¹)
Control	1.32 e (± 0.34)	7.6 a (± 0.02)	0.19 f (± 0.02)	15.0 f (± 0.64)	73.9 d (± 12.13)	295.8 de (± 15.23)
SMS-1	2.20 c (± 0.02)	7.1 c (± 0.19)	0.70 c (± 0.06)	25.8 c (± 4.21)	100.8 cd (± 39.48)	425.5 c (± 25.09)
SMS-2	3.09 a (± 0.11)	6.9 c (± 0.08)	1.24 a (± 0.03)	45.7 a (± 1.62)	239.8 a (± 44.21)	824.4 a (± 47.13)
AGM-1	1.86 d (± 0.09)	7.3 b (± 0.12)	0.25 f (± 0.01)	20.1 de (± 3.95)	146.8 bc (± 8.11)	395.6 cd (± 35.02)
AGM-2	2.73 b (± 0.10)	6.9 c (± 0.05)	0.39 de (± 0.01)	24.8 cd (± 1.06)	169.1 b (± 56.58)	571.7 b (± 32.05)
AGM+SMS-1	2.11 c (± 0.10)	7.1 c (± 0.28)	0.45 d (± 0.02)	22.4 cd (± 2.82)	139.1 bc (± 38.84)	385.6 cd (± 109.85)
AGM+SMS-2	3.03a (± 0.07)	7.0 c (± 0.05)	0.90 b (± 0.05)	32.6 b (± 3.24)	181.1 ab (± 41.40)	601.7 b (± 64.11)
U-1	1.44 e (± 0.09)	7.5 a (± 0.01)	0.20 f (± 0.01)	14.0 f (± 2.13)	68.5 d (± 22.91)	262.6 e (± 51.17)
U-2	1.18 e (± 0.05)	6.8 c (± 0.11)	0.34 e (± 0.00)	15.7ef (± 1.68)	66.8 d (± 18.09)	335.7 cde (± 81.22)

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون دانکن می‌باشد. SMS: تیمار پسماند بستر قارچ در دو سطح ۲ و ۵ درصد؛ AGM: تیمار کود سبز یونجه در دو سطح ۱ و ۵ درصد؛ AGM+SMS: ترکیب کود سبز یونجه و پسماند بستر قارچ در دو سطح ۱/۵ درصد (۰/۵ درصد کود سبز یونجه و ۱ درصد پسماند بستر قارچ) و ۴ درصد (۱/۵ درصد کود سبز یونجه و ۲/۵ درصد پسماند بستر قارچ)؛ U: تیمار کود شیمیایی اوره در دو سطح ۱۲۰ و ۳۶۰ کیلو گرم در هکتار؛ Control: شاهد

Similar letters in each column are not significantly different at the 1% probability level, using Duncan's Test. SMS: spent mushroom substrates treatment at two levels of 2 and 5%; AGM: alfalfa green manure treatment at two levels of 1 and 5%; AGM+SMS: combination of alfalfa green manure and spent mushroom substrates at two levels of 1.5% (0.5% alfalfa green manure and 1% spent mushroom substrates) and 4% (1.5% alfalfa green manure and 2.5% spent mushroom substrates) U: Urea chemical fertilizer treatment at two levels of 120 and 360 kg/ha; Control: benchmark

تحقیق دارای EC به بزرگی ۵/۷۵ دسی‌زیمنس بر متر است (جدول ۱)، که خود می‌تواند زمینه‌ساز شوری در خاک باشد. به طور معمول غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌ها در SMS زیاد بوده و سبب افزایش EC آن می‌گردد. EC در SMS به طور معمول بیشتر از خاک است و به طور کلی بیشتر از ۴ دسی‌زیمنس بر متر است (Vahabi et al., 2008). از این رو، این ویژگی SMS می‌تواند م صرف زیاد و طولانی مدت این ماده را محدود نماید، مگر اینکه قبل از مصرف به اندازه کافی آبشویی شود. AGM نیز همانند SMS موجب افزایش EC خاک نسبت به شاهد شد، با این حال اثر منفی این به‌ساز آلی بر شوری خاک کمتر از SMS است. EC اولیه کود سبز یونجه برابر ۳/۰ دسی‌زیمنس بر متر است که می‌تواند به دلیل مقدار بالای کاتیون و آنیون در کود سبز یونجه باشد. تیمار کود U-2 همانند AGM باعث افزایش EC خاک شده است که آن هم به خاطر عناصر معدنی موجود در کود اوره است. هریچ و دیواسناپاسی (Deshpande and Devasenapathy, 2010) در بررسی تأثیر کود سبز و منابع مختلف آلی (کود مرغی و ورمی‌کمپوست) بر عملکرد برنج (*Oryza sativa*)

دامنه تغییرات پی‌اچ در این مطالعه ۶/۸ تا ۷/۶، و ضریب تغییرات آن در بین تیمارها ۱/۴ بدست آمد. لازم به ذکر است، اگرچه مقدار پی‌اچ در بین برخی از تیمارها تفاوت‌های آماری نشان می‌دهد، با این حال این تفاوت‌ها ممکن است اثرات قابل توجهی بر محیط خاک نداشته باشد. با این وجود، باید در نظر داشت که کاربرد مستمر به‌سازهای مورد آزمون می‌تواند در بلندمدت به کاهش چشمگیر پی‌اچ خاک بیانجامد. در مطالعه‌ی لی و همکاران (Lee et al., 2010) نشان داده شد، استفاده از کود سبز می‌تواند چگالی ظاهری خاک و پی‌اچ را کاهش دهد و موجب افزایش ماده آلی و جمعیت میکروبی شود. بانیک و دی (Banik and Dey, 1982) نیز گزارش کردند که کمپوست حاصل از ضایعات بستر قارچ باعث افزایش اسیدیته خاک‌های آهکی شده است. تیمار SMS-2 با ۱/۲۴ دسی‌زیمنس بر متر بالاترین مقدار هدایت الکتریکی (EC) را نشان داد و کمترین مقدار را تیمارهای U-1 و شاهد (به ترتیب، ۰/۲۰ و ۰/۱۹ دسی‌زیمنس بر متر) داشت (جدول ۲). مقدار بالای EC در تیمارهای حاوی درصد بالای SMS را می‌توان با ماهیت SMS مرتبط دانست. SMS مورد استفاده در این

(L.) و خواص شیمیایی خاک نشان دادند، EC بعد از اضافه کردن کود سبز در مرحله پنجه زنی گیاه افزایش یافته است. اما پس از این مرحله، EC در خاک کاهش یافت.

پتاسیم و فسفر فراهم و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی

تیمار SMS-2 با میانگین ۸۲۴/۴ میلی گرم بر کیلوگرم بالاترین مقدار پتاسیم را دارا بود (جدول ۲). پتاسیم در تیمار AGM+SMS-2 و تیمار AGM-2 (به ترتیب ۶۰۱/۷ و ۵۷۱/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) تفاوت معنی داری نشان نداد. به علاوه، تیمارهای SMS-1، AGM-1، AGM+SMS-1 و تیمار کود U-2 (به ترتیب ۴۲۵/۵، ۳۹۵/۶، ۳۸۵/۶ و ۳۳۵/۸ میلی گرم بر کیلوگرم) در یک گروه آماری قرار گرفتند. هم چنین تیمارهای U-1، U-2 و شاهد و کود U-1 (به ترتیب ۲۶۲/۶، ۳۸۵/۶ و ۲۹۵/۹ میلی گرم بر کیلوگرم) از نظر آماری تفاوتی معنی داری با یکدیگر نداشتند. نتایج نشان داد، محتوای پتاسیم در تیمارهایی که حاوی به ساز آلی هستند بالاتر است. جلالی (Jalali, 2013) یکی از راه های افزایش پتاسیم خاک را افزودن بقایای گیاهی و آلی دانسته و اشاره کرد، به دلیل حالیت بالای یون های این عنصر، پتاسیم به راحتی از بافت های گیاهی مرده آبشویی می گردند و سبب افزایش پتاسیم خاک می شود. همچنین مواد آلی می توانند به عنوان منبعی از مکان های تبادل کاتیونی در خاک، یون های پتاسیم را جذب نموده و مانع آبشویی این کاتیون از خاک شوند. وهابی و همکاران (Vahabi et al., 2011) تاثیر SMS را بر خصوصیات یک خاک لوم شنی بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از این به ساز آلی موجب افزایش سدیم، پتاسیم و منیزیم خاک شده است. جلالی (Jalali, 2011) با بررسی اثر اضافه کردن بقایای آلی به خاک های آهکی بر پتاسیم قابل تبادل نشان داد، در کلیه تیمارهای کود آلی (آفتابگردان، سیب زمینی، علف های هرز، بقایای میوه، بقایای سبزیجات، کلزا، کود مرغی، کود دامی، برگ درختان) محتوای پتاسیم قابل عصاره گیری با استات آمونیوم به طور معنی داری افزایش یافته است.

تیمار SMS-2 با میانگین ۴۵/۷ میلی گرم بر کیلوگرم بیشترین مقدار فسفر در خاک را دارا بود. پس از آن، تیمار AGM+SMS-2 با میانگین ۳۲/۷ میلی گرم در کیلوگرم قرار داشت (جدول ۲). تیمارهای SMS-2، AGM-2 و AGM+SMS-1 به ترتیب با میانگین های ۲۵/۹، ۲۴/۸ و ۲۲/۴ میلی گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی داری با هم نداشتند و همگی در یک گروه آماری جای گرفتند. تیمار AGM-1، با میانگین ۲۰/۱ میلی گرم بر کیلوگرم، تفاوت معنی داری با تیمار AGM+SMS-1 و تیمار کود U-2، با میانگین ۱۵/۷ میلی گرم بر کیلوگرم، نداشت. سه تیمار کود U-2 (۱۵/۷ میلی گرم بر کیلوگرم)، U-1 (۱۴/۱ میلی گرم بر کیلوگرم) و شاهد (۱۵/۰ میلی گرم بر کیلوگرم) در یک گروه آماری قرار گرفتند. در تیمارهایی که به سازهای

آلی، به خصوص SMS استفاده شد، فسفر خاک افزایش چشم گیری نشان داد. آیاموری و همکاران (Iyamuremye et al., 1996) بیان کردند اجزای ماده آلی اضافه شده به خاک با فسفر برای مکان های جذب رقابت می کند؛ در نتیجه فراهمی فسفر در خاک را افزایش می دهد. یافته های پژوهش حاضر با نتایج گردیدانی (Fathi Gerdelidani et al., 2016) که نشان داد کاربرد پسماند بستر قارچ در خاک های آهکی سبب افزایش فراهمی فسفر شده است همسو بود. به علاوه، کود های آلی، فعالیت آنزیم فسفاتاز را در خاک افزایش داده و از طریق فرآیندهای معدنی شدن و انحلال، موجب فراهمی بیشتر فسفر در محلول خاک می گردند. افزایش فسفر در تیمار کود U-2 نسبت به شاهد که البته معنی دار نبود، ممکن است در اثر تجزیه ماده آلی موجود در خاک و آزاد شدن فسفر بقایا بوده باشد. همچنین این احتمال وجود دارد که تیمار اوره با کاهش پی اچ خاک موجب پایداری شدن فسفر آلی در خاک شده باشد. در مطالعه ای تاثیر SMS تازه و خشک بر حذف هیدروکربن های آروماتیک چند حلقه ای در خاک کشاورزی تحت انکوباسیون ۶۰ روزه بررسی شد. نتایج نشان داد محتوای مواد مغذی خاک با افزودن SMS پس از ۶۰ روز انکوباسیون، در تیمارهای اصلاح شده افزایش یافت و افزایش محتوای فسفر و پتاسیم موجود در تیمارهای SMS خشک شده در هوا بیشتر از تیمارهای SMS تازه بود (Jordan et al., 2008).

تیمار SMS-2 بیشترین فعالیت آنزیم فسفاتاز ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) (۲۳۹/۸) را دارا بود (جدول ۲). پس از آن، تیمارهای AGM+SMS-2 و AGM-2 قرار داشتند. کمترین میزان فعالیت آنزیم به تیمار شاهد ($\mu\text{g pNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$) (۷۳/۹) تعلق داشت. به علاوه، تیمار شاهد تفاوت معنی داری با تیمارهای کود شیمیایی (U-1 و U-2) نداشت. نتایج نشان داد تیمارهای حاوی به ساز آلی از میزان بالاتری فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی برخوردار هستند (جدول ۲). افزایش دسترسی ریز جانداران به مواد غذایی به دنبال افزودن مواد آلی و افزایش ترشحات ریشه ای دلیلی بر افزایش فعالیت فسفاتاز است. همچنین ماده آلی محیط بهتری را برای پایداری آنزیم های برون سلولی فراهم می آورد و از آن ها در مقابل تنش های محیطی حمایت می کند. در پژوهشی، اثر دو SMS متفاوت بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک در حضور یک محصول باغی (*Lactuca sativa* L. var. *linus*) مطالعه شد. نتایج نشان داد فعالیت آنزیم فسفاتاز در خاک های تیمار شده نسبت به خاک شاهد بالاتر بود (Medina et al., 2012). بر اساس نتایج مطالعه حاضر، سطح دوم SMS نسبت به سطح اول آن در افزایش فعالیت فسفاتاز مؤثرتر بود که احتمالاً به سبب کربن در دسترس بیشتر در سطح دوم SMS است.

اثر تیمارها بر ویژگی های گیاهی

نتایج تجزیه واریانس نشان داد عملکرد گیاه و غلظت نیتрат،

گیاه اسفناج را برطرف کنند و رشد گیاه را نسبت به دو تیمار کودی U-1 و U-2 افزایش دهد. تیمار AGM+SMS-2 بالاترین وزن ریشه را در بین تیمارها نشان داد. با این حال این تیمار از نظر آماری، تفاوت معنی‌داری با تیمارهای SMS-2 و AGM-2 نداشت. همچنین، تیمار AGM-1 و کود U (هر دو سطح) تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد نداشتند. مقایسه میانگین وزن ریشه و وزن اندام هوایی شباهت زیادی با یکدیگر دارند، به طوری که در تیمارهایی که میزان وزن ریشه افزایش یافته، وزن اندام هوایی نیز افزایش نشان داده است. در بین تیمارها، تیمارهای حاوی به‌سازهای آلی نقش موثری در افزایش وزن ریشه داشتند.

فسفر، آهن، روی، منگنز و مس در گیاه اسفناج تحت تاثیر تیمارهای آزمایشی قرار گرفت. نتایج مقایسه میانگین نشان داد، تیمار AGM+SMS-2 و تیمار AGM-2 بیشترین افزایش را در وزن خشک اسفناج (به ترتیب ۲۳۵ و ۲۳۰ درصد) نسبت به شاهد ایجاد کرده است (جدول ۳). همچنین این دو تیمار سبب افزایش معنی‌دار میانگین وزن خشک اندام هوایی اسفناج نسبت به تیمارهای کودی (U-1 و U-2) شدند. به علاوه، اختلاف معنی‌داری بین تیمار SMS-1 با تیمارهای U-1 و U-2 مشاهده نشد. با این حال، تمام تیمارها افزایش معنی‌داری را نسبت به تیمار شاهد نشان دادند. نتایج نشان می‌دهد، تیمارهای به‌سازهای آلی (هر دو سطح AGM، سطح دوم SMS-2 و دو سطح تیمار AGM+SMS) توانسته است نیاز کودی

جدول ۳- مقایسه میانگین ($\pm$ خطای استاندارد) عملکرد (گرم بر گلدان) و غلظت برخی عناصر (میلی گرم بر کیلوگرم وزن خشک گیاه) در اسفناج تحت تاثیر تیمارها آزمایشی

Table 3- Mean comparison ($\pm$ standard error) of yield (g/pot) and concentration of selected elements (mg/kg plant dry weight) in spinach affected by the experimental treatments

تیمارها Treatments	وزن خشک اندام هوایی Shoot dry weight	وزن خشک ریشه Root dry weight	فسفر کل Total P	نیترات NO ₃	مس Cu	آهن Fe	منگنز Mn	روی Zn
	(g/pot)							
Control	1.38 e (± 0.31)	0.35 c (± 0.01)	714.5 bc (± 16.60)	265.3 c (± 7.08)	6.8 b (± 0.49)	275.6 cd (± 5.31)	17.4 e (± 0.05)	44.8 c (± 0.51)
SMS-1	2.41 cd (± 0.22)	0.67 b (± 0.06)	779.3 bc (± 49.66)	463.2 c (± 73.7)	7.0 b (± 1.00)	351.8 ab (± 30.9)	25.2 c (± 0.56)	60.4 ab (± 6.73)
SMS-2	3.19 b (± 0.37)	0.80 ab (± 0.11)	1071.7 a (± 73.20)	1364.3 c (± 242.4)	7.3 b (± 1.95)	383.9 a (± 38.78)	32.01 a (± 1.38)	71.4 a (± 11.17)
AGM-1	2.70 bc (± 0.29)	0.44 c (± 0.02)	769.4 bc (± 27.5)	4941.2 b (± 880.1)	7.4 b (± 0.08)	349.7 ab (± 20.15)	25.7 c (± 0.52)	50.2 bc (± 0.32)
AGM-2	4.56 a (± 0.29)	0.68 ab (± 0.08)	817.7 b (± 18.27)	4536.5 b (± 588.4)	9.7 a (± 0.71)	384.5 a (± 56.22)	27.1 b (± 0.43)	58.5 b (± 7.66)
AGM+SMS-1	3.06 b (± 0.31)	0.64 b (± 0.11)	905.1 ab (± 132.58)	915.0 c (± 121.1)	6.1 b (± 0.20)	314.6 bc (± 3.17)	17.9 e (± 0.82)	51.4 bc (± 6.45)
ABM+SMS-2	4.62 a (± 0.51)	0.85 a (± 0.17)	1086.4 a (± 34.13)	5835.6 b (± 1082.5)	6.9 b (± 0.64)	313.8 bc (± 36.34)	21.2 d (± 0.98)	53.9 bc (± 8.48)
U-1	2.26 cd (± 0.02)	0.40 c (± 0.07)	605.7 c (± 231.1)	4544.5 b (± 1309.1)	7.76 b (± 0.52)	309.1 bc (± 23.22)	18.3 e (± 0.24)	49.3 bc (± 4.62)
U-2	2.06 d (± 0.23)	0.34 c (± 0.04)	609.4 c (± 52.6)	7806.8 a (± 1151.3)	7.48 b (± 0.55)	228.0 d (± 19.51)	21.4 d (± 0.52)	53.3 bc (± 4.87)

حروف مشابه در هر ستون نمایانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بر اساس آزمون دانکن می‌باشد. SMS: تیمار پسماند بستر قارچ در دو سطح ۲ و ۵ درصد؛ AGM: تیمار کود سبز یونجه در دو سطح ۱ و ۵ درصد؛ AGM+SMS ترکیب کود سبز یونجه و پسماند بستر قارچ در دو سطح ۱/۵ درصد (۰/۵ درصد کود سبز یونجه و ۱ درصد پسماند بستر قارچ) و ۴ درصد (۱/۵ درصد کود سبز یونجه و ۲/۵ درصد پسماند بستر قارچ)؛ U: تیمار کود شیمیایی اوره در دو سطح ۱۲۰ و ۳۶۰ کیلو گرم در هکتار؛ شاهد

Similar letters in each column are not significantly different at the 1% probability level, using Duncan's Test. SMS: spent mushroom substrates treatment at two levels of 2 and 5%; AGM: alfalfa green manure treatment at two levels of 1 and 5%; AGM+SMS: combination of alfalfa green manure and spent mushroom substrates at two levels of 1.5% (0.5% alfalfa green manure and 1% spent mushroom substrates) and 4% (1.5% alfalfa green manure and 2.5% spent mushroom substrates) U: Urea chemical fertilizer treatment at two levels of 120 and 360 kg/ha; Control: benchmark

شده و همچنین شسته نشده بر جذب عناصر کم مصرف در گیاه مرزه بررسی شد. نتایج نشان داد SMS به خصوص باقیمانده شسته نشده SMS سبب افزایش مس در گیاه شده است (Rahmanian et al., 2017). همچنین گلسر (Gülser, 2005) گزارش کرد افزایش کود اوره موجب افزایش محتوای مس در گیاه اسفناج شده است و آن را به کاهش پی‌اچ خاک ناشی از نیتریفیکاسون نسبت دادند.

بیشترین مقدار آهن در گیاه به هر دو سطح تیمارهای SMS و AGM اختصاص دارد، و کمترین آن در تیمار کود U-2 مشاهده شد. دیلون و همکاران (Dhillon et al., 1983) کاهش غلظت آهن در برگ اسفناج را بر اثر نیتروژن گزارش کردند. بلک (Black, 1934) عقیده دارد که در سطوح بالای نیتروژن، مقدار اکسین (ایندول استیک اسید) در ریشه زیاد می‌شود، و این هورمون رشد ریشه را کاهش می‌دهد، و در نتیجه جذب عناصر را کم می‌کند. کانسال و همکاران (Kansal et al., 1981) نشان دادند که جذب کل آهن در اسفناج تا سطح ۹۰ کیلوگرم در هکتار افزایش یافت. آنان این افزایش را ناشی از ازدیاد رشد اسفناج می‌دانند. وجود بهسازهای آلی به دلیل اثرات مثبتی که بر ویژگی‌های خاک و پراکنش ریشه و رشد گیاه دارد، می‌تواند بر جذب آهن توسط گیاه اثرگذار باشد. از طرف دیگر، فعالیت‌های میکروبی در هنگام تجزیه بقایای گیاهی سبب افزایش کلات‌های آلی طبیعی در خاک‌های حاوی بقایای گیاهی شده و موجب جذب بیشتر عناصر کم مصرف در گیاه می‌شود (Khamadi et al., 2015). مقدار کافی آهن در بافت‌های گیاهی بین ۲۵۰-۵۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Jalali, 2013).

بالاترین مقدار عنصر روی در گیاه متعلق به تیمار AGM+SMS-2 بود، و از نظر آماری تفاوت با سطح اول تیمار مذکور نداشت. از طرفی هر دو سطح تیمار AGM موجب افزایش مقدار عنصر روی در گیاه شدند و از نظر آماری با سطح اول تیمار SMS، دو سطح تیمار AGM+SMS و دو سطح کود اوره اختلاف آماری معنی‌داری نداشتند؛ اما از نظر آماری تفاوت معنی‌داری در سطح یک در صد با تیمار شاهد داشتند. لازم به ذکر است بین دو سطح تیمارهای AGM+SMS و کود اوره با شاهد تفاوت معنی‌دار آماری در سطح پنج در صد مشاهده نشد. حد مجاز روی در سبزیجات ۵۰-۲۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم است (Jalali, 2013). همچنین ترابی‌ان و مهجوری (Torabian and Mahjouri, 2002) بیان کردند چنانچه غلظت روی بیش از دامنه ۴۰۰-۲۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم باشد، باعث ایجاد سمیت در سبزیجات خواهد شد. با توجه به جدول ۳، مقدار روی در گیاه در تمام تیمارها بیش از حد مجاز است. با این حال با توجه به دامنه ارائه شده برای سمیت روی توسط ترابی‌ان و مهجوری (Torabian and Mahjouri, 2002)، غلظت این عنصر در حد سمیت نیست. محدثی و همکاران (Mohd Hanafi et al., 2018) بیان کردند SMS این پتانسیل را دارد که به عنوان یک کود ریزمغذی مورد استفاده قرار گیرد. یافته‌های

تیمار AGM+SMS-2 و SMS-2 بالاترین میزان فسفر گیاه (به ترتیب، ۱۰۸۶ و ۱۰۷۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم) را در مقایسه با شاهد (۶۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم) داشت. کمترین مقدار فسفر به تیمار کود U-2 تعلق داشت. در مقابل، تفاوت معنی‌داری بین تیمارهای شاهد، SMS-1 و تیمار AGM-1 وجود نداشت. نتایج نشان می‌دهد تمامی تیمارها، به خصوص تیمارهای حاوی بهسازهای آلی، موجب افزایش فسفر گیاه نسبت به تیمار شاهد شدند. بهسازهای آلی می‌توانند جذب سطحی فسفر را کاهش داده و در نتیجه دسترسی به فسفر را برای گیاهان افزایش دهند، از طرف دیگر افزایش زیست توده میکروبی خاک به انتقال بهتر فسفر از خاک به گیاه کمک می‌کند (Anjana and Iqbal, 2007). همچنین، از آنجایی که تیمارهای حاوی بهسازهای آلی سبب افزایش رشد ریشه شده‌اند، این نیز خود می‌تواند دلیلی بر افزایش جذب فسفر توسط گیاه باشد. در مطالعه‌ای اثر کود سبزی بونجه بر برخی ویژگی‌های خاک و گیاهان کلزا و ذرت بررسی شد. نتایج نشان داد که افزودن کود سبزی به خاک سبب افزایش وزن خشک در هر دو گیاه، و افزایش غلظت فسفر در کلزا شد (Heidari et al., 2019).

بیشترین مقدار نیترات گیاه در تیمار کود U-2 و کمترین مقدار آن در تیمار شاهد مشاهده شد (۷۸۰۷ در مقابل ۲۶۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم) (جدول ۳). تیمارهای کود U-1، تیمار AGM (در هر دو سطح) و تیمار AGM+SMS-2 اختلاف معنی‌داری در تجمع نیترات نسبت به یکدیگر نداشتند و همگی بعد از تیمار کود U-2، در بالاترین سطح تجمع نیترات در گیاه، نسبت به شاهد، قرار داشتند. استانداردهای مختلفی برای حد مجاز نیترات در گیاه اسفناج ارائه شده است. اتحادیه اروپا (European Union, 2002) حد مجاز نیترات در اسفناج را ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در نظر گرفته است. بنابراین هر دو سطح تیمار SMS و سطح اول تیمار AGM+SMS توانسته‌اند به یک میزان سطح نیترات گیاه را کنترل کنند و از این رو جایگزین‌های مناسبی برای تامین نیاز نیترات گیاه هستند. به علاوه، از آنجایی که در این تیمارها (SMS-1، SMS-2 و AGM+SMS)، تجمع نیترات در گیاه به طور معنی‌داری کمتر از تیمار U-1 (سطح توصیه کودی) است، مخاطرات این تیمارها از نظر تاثیر بر سلامتی انسان بسیار کمتر است. با این حال اثراتی که استفاده مداوم و بلندمدت این تیمارها بر تجمع نیترات در گیاه دارد نامعلوم است و لازم است مطالعات تکمیلی در این زمینه صورت گیرد.

مقدار معمول مس در بافت‌های گیاهی ۲۰-۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده و در غلظت‌های کمتر از ۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم، گیاه دچار کمبود می‌شود (Jalali, 2013). بیشترین مقدار مس در گیاه در تیمار AGM-2 با میانگین ۹/۸ mg/kg (نسبت به تیمار شاهد با میانگین ۶/۹ mg/kg) تعلق داشت و بین دیگر تیمارها از لحاظ آماری تفاوت معنی‌دار وجود نداشت. در مطالعه‌ای تاثیر SMS شده شسته

حاصل از تحقیقات نشان می‌دهد که نیتروژن می‌تواند قابلیت استفاده عنصر روی را تحت تاثیر قرار دهد. افزایش تشکیل پروتئین بعد از افزودن کود نیتروژن، سبب افزایش تشکیل کمپلکس روی-پروتئین در ریشه‌ها و انتقال آن در گیاه می‌شود. از طرف دیگر، کودهای نیتروژنه می‌توانند منجر به اسیدی شدن محیط اطراف ریشه و افزایش قابلیت استفاده روی گردند.

تیمارها در نتیجه آزمون مقایسه میانگین برای مقدار عنصر منگنز در گیاه به پنج گروه آماری متفاوت تفکیک شدند. میزان منگنز در گیاهان بسته به قابلیت جذب Mn^{2+} متغیر است؛ و دامنه ۲۰۰-۴۰ میلی گرم در کیلوگرم در بافت گیاه برای اکثر گیاهان مطلوب می‌باشد. بیشترین مقدار منگنز در تیمار AGM+SMS-2، با افزایش ۸۴/۵ درصدی نسبت به تیمار شاهد (۱۷/۴ mg/kg)، مشاهده شد. پس از آن بالاترین مقدار منگنز در گیاه به تیمار AGM-2 تعلق داشت. می‌توان گفت تمامی تیمارها به غیر از AGM+SMS-1 و U-1 سبب افزایش معنی‌دار این عنصر در گیاه نسبت به شاهد شدند. مورسیا و همکاران (Murcia et al., 1995) نشان دادند با کاربرد نیتروژن، جذب کل منگنز در اسفناج به طور معنی‌داری افزایش یافته است. گلدبرگ و همکاران (Goldberg, et al. 1983) تاثیر نیتروژن در افزایش غلظت منگنز را به دلیل افزایش منگنز قابل استفاده خاک می‌دانند. همچنین نتایج پژوهشگران (Verma and Pandey, 2013) نشان می‌دهد، افزودن بقایای گیاهی سبب بیشتر شدن کربن آلی خاک شده که این خود موجب جذب بیشتر عناصر ریزمغذی در اندام هوایی می‌شود.

نتیجه‌گیری

توجه به بهسازی‌های آلی در کشاورزی به جای وابستگی به

نهاده‌های شیمیایی، ضمن بهبود خصوصیات خاک و گیاه، باعث تحقق اهداف کشاورزی پایدار نظیر افزایش خود اتکایی سامانه‌های کشاورزی، جلوگیری از زوال خاک و سلامت محیط زیست و همچنین موجب امنیت غذایی خواهد شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تیمارهای دارای بهساز آلی (پسماند بستر کشت قارچ، کود سبز یونجه و ترکیب هر دو)، نه تنها مواد آلی خاک را افزایش می‌دهند، بلکه بخاطر اینکه منبع سرشاری از عناصر غذایی نیتروژن، فسفر، پتاسیم و ریزمغذی‌ها هستند، این عناصر را در اثر معدنی شدن تدریجی در اختیار گیاه قرار می‌دهند. به دلیل پی‌اچ پایین هر دو بهساز آلی (به‌ویژه پسماند بستر قارچ) نسبت به خاک اولیه، تمامی تیمارهای آلی سبب کاهش اندک پی‌اچ خاک شدند. از این رو، کاربرد مداوم و طولانی مدت این بهسازها می‌تواند در کاهش پی‌اچ خاک‌های قلیایی مؤثر باشد. با این حال، هدایت الکتریکی نسبتاً بالای این بهسازها، به ویژه پسماند بستر قارچ، یک محدودیت جدی برای استفاده طولانی مدت این مواد است و لازم است پیش تیمارهای خاصی، مانند آبشویی، قبل از استفاده از این مواد صورت گیرد. از طرف دیگر، تمام تیمارهای بهسازهای آلی، بجز SMS-1، توانستند نیاز کودی گیاه اسفناج را برطرف کنند و عملکرد گیاه را نسبت به دو تیمار کود آورده افزایش دهند. با این حال، تجمع نترات در اسفناج، تنها در برخی از تیمارهای آلی (SMS-1، SMS-2، و AGM+SMS-1) در حد قابل قبول قرار داشت. در کل، با توجه به اینکه سطوح بالای کود سبز یونجه و تیمار ترکیبی ضمن افزایش عملکرد گیاه و ارتقاء کیفیت خاک، موجب تجمع نترات در مرز بحرانی، در گیاه اسفناج شده‌اند، و از طرف دیگر استفاده مداوم پسماند بستر قارچ در مقادیر بالا خطر شور شدن خاک را به همراه دارد، مناسب‌ترین تیمار، تیمار ترکیبی AGM+SMS-1، و پس از آن تیمار SMS-1 شناخته شد.

منابع

1. Anjana, S.U., & Iqbal, M. (2007). Nitrate accumulation in plants, factors affecting the process, and human health implications. *A Review. Agronomy for Sustainable Development* 27(1): 45-57.
2. Banik, S., & Dey, B. (1982). Available phosphate content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing micro-organisms. *Plant and Soil* 69(3): 353-364.
3. Bora, F.D., Bunea, C.I., Rusu, T., & Pop, N. (2015). Vertical distribution and analysis of micro-, macroelements and heavy metals in the system soil-grapevine-wine in vineyard from North-West Romania. *Chemistry Central Journal* 9(1): 1-13. <https://doi.org/10.1186/s13065-015-0095-2>.
4. Bower, C.A., Reitemeier, R., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science* 73(4): 251-262. <https://doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>.
5. Cabilovski, R., Manojlovic, M., Bogdanovic, D., Magazin, N., Keserovic, Z., & Sitaula, B.K. (2014). Mulch type and application of manure and composts in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) production: impact on soil fertility and yield. *Zemdirbyste-Agriculture* 101(1).
6. Dabighi, K., Fateh, E., & Aynehband, A. (2017). The study of nitrogen efficiency indices of canola (*Brassica napus* L.) under different green manure crops and nitrogen sources. *Field Crops Research* 15(2): 413-424. (In Persian with English abstract)
7. Deshpande, H.H., & Devasenapathy, P. (2010). Effect of green manuring and organic manures on yield, quality and economics of rice (*Oryza sativa* L.) under lowland condition. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences* 23(2):

- 235-238. <https://doi.org/10.1017/S0021859600082198>.
8. Dhillon, K., Yagodeen, B., & Pleshkov, A. (1983). Micronutrients and nitrogen metabolism. *Plant and Soil* 73(3): 355-363.
 9. Dobermann, A., Witt, C., Abdurachman, S., Gines, H., Nagarajan, R., Son, T., Tan, P., Wang, G., Chien, N., & Thoa, V. (2003). Soil fertility and indigenous nutrient supply in irrigated rice domains of Asia. *Agronomy Journal* 95(4): 913-923. <https://doi.org/10.2134/agronj2003.9130>.
 10. European Union. (2002). Commission Regulation (EC) No563/2002 of 2 April 2002 amending regulation (EC) No466/2001 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. *Official Journal* 77: 1-13. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/87610dae-c48e-46bf-9413-3b4d633e6f38>
 11. Food and Agriculture Organisation, 2021. FAOSTAT database. <http://www.fao>. 2012 Available from
 12. Fathi Gerdelidani, A., Mirseyed Hosseini, H., & Farahbakhsh, M. (2016). Effect of spent mushroom compost (SMC) and sugar cane bagasse biochar on availability and fractions of inorganic phosphorus in a calcareous soil. *Agricultural Engineering Soil Science and Agricultural Mechanization, (Scientific Journal of Agriculture)* 39(1): 127-144. (In Persian with English abstract)
 13. Gee, G., & Bauder, J. (1986). *Particle-size analysis 1: Soil science society of America: American Society of Agronomy* Madison, WI. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>.
 14. Gobbi, V., Nicoletto, C., Zanin, G., & Sambo, P. (2018). Specific humus systems from mushrooms culture. *Applied Soil Ecology* 123: 709-713. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.023> Get rights and content.
 15. Goldberg, S.P., Smith, K.A., & Holmes, J.C. (1983). The effects of soil compaction, form of nitrogen fertiliser, and fertiliser placement on the availability of manganese to barley. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 34(7): 657-670. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740340702>.
 16. Gülser, F. (2005). Effects of ammonium sulphate and urea on NO_3^- and NO_2^- accumulation, nutrient contents and yield criteria in spinach. *Scientia Horticulturae* 106(3): 330-340.
 17. Heidari, N., Alizadeh, Y., & Alizadeh, H. (2019). Investigating the Interaction of salinity, drought and nitrogen fertilizer stresses on some physiological traits, yield and yield components of maize (*Zea mays* L.). *Environmental Stresses in Crop Sciences* 12(3): 889-905. (In Persian with English abstract)
 18. Helmke, P.A., & Sparks, D.L. (1996). *Lithium, sodium, potassium, rubidium, and cesium*. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods 5: 551-574.
 19. Iyamuremye, F., Dick, R., & Baham, J. (1996). Organic amendments and phosphorus dynamics: I. Phosphorus chemistry and sorption. *Soil Science* 161(7): 426-435.
 20. Jalali, M. (2011). Comparison of potassium release of organic residues in five calcareous soils of western Iran in laboratory incubation test. *Arid Land Research and Management* 25(2): 101-115.
 21. Jalali, M. (2013). *Soil Fertility*. Bu Ali Sina University Publishing Center.
 22. Jaworska, G. (2005). Content of nitrates, nitrites, and oxalates in New Zealand spinach. *Food Chemistry* 89(2): 235-242.
 23. Jordan, S.N., Mullen, G.J., & Murphy, M. (2008). Composition variability of spent mushroom compost in Ireland. *Bioresource Technology* 99(2): 411-418.
 24. Kansal, B., Singh, B., Bajaj, K., & Kaur, G. (1981). Effect of different levels of nitrogen and farmyard manure on yield and quality of spinach (*Spinacea oleracea* L.). *Plant Foods for Human Nutrition* 31(2): 163-170. <https://doi.org/10.15159/jas.21.21>.
 25. Khamadi, F., Mesgarbashi, M., Hasibi, P., Farzaneh, M., & Enayatzamir, N. (2015). Influence of crop residue and nitrogen levels on nutrient content in grain wheat. *Applied Field Crops Research* 28(4): 158-166. (In Persian with English abstract)
 26. Lee, C.H., Do Park, K., Jung, K.Y., Ali, M.A., Lee, D., Gutierrez, J., & Kim, P.J. (2010). Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 138(3-4):343-347. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.05.011>.
 27. Li, F., Kong, Q., Zhang, Q., Wang, H., Wang, L., & Luo, T. (2020). Spent mushroom substrates affect soil humus composition, microbial biomass and functional diversity in paddy fields. *Applied Soil Ecology* 149: 103489. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103489>.
 28. Liu, M., Hu, F., Chen, X., Huang, Q., Jiao, J., Zhang, B., & Li, H. (2009). Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field: the influence of quantity, type and application time of organic amendments. *Applied Soil Ecology* 42(2): 166-175. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.03.006>.
 29. Matos, E.D.S., Mendonça, E.D.S., Lima, P.C.D., Coelho, M.S., Mateus, R.F., & Cardoso, I.M. (2008). Green manure in coffee systems in the region of Zona da Mata, Minas Gerais: characteristics and kinetics of carbon and nitrogen mineralization. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32: 2027-2035.
 30. Medina, E., Paredes, C., Bustamante, M., Moral, R., & Moreno-Caselles, J. (2012). Relationships between soil physico-chemical, chemical and biological properties in a soil amended with spent mushroom substrate. *Geoderma* 173: 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.12.011>.

31. Mohammadi, G., Safari-Poor, M., Eghbal Ghobadi, M., & Najaphy, A. (2015). The effect of green manure and nitrogen fertilizer on corn yield and growth indices. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 25(2): 105-124.
32. Mohd Hanafi, F.H., Rezanian, S., Mat Taib, S., Md Din, M.F., Yamauchi, M., Sakamoto, M., Hara, H., Park, J., & Ebrahimi, S.S. (2018). Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20(3): 1383-1396. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0739-0>.
33. Murcia, M., Vera, A., Ortiz, R., & Garcia-Carmona, F. (1995). Measurement of ion levels of spinach grown in different fertilizer regimes using ion chromatography. *Food Chemistry* 52(2): 161-166. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)P4198-O](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)P4198-O).
34. Olsen, S.R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*: US Department of Agriculture.
35. Rahmanian, M., Esmailpour, B., Hadian, J., & Shahriari, M.H. (2017). Effect of vermicompost and spent mushroom compost on growth and micronutrients content in Summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agroecology* 7(2): 61-77. (In Persian with English abstract)
36. Talgre, L., Lurington, E., Roostalu, H., & Astover, A. (2009). The effects of green manures on yields and yield quality of spring wheat. *Agronomy Research* 7(1): 125-132.
37. Thomas, G.W. (1996). *Soil pH and soil acidity. Methods of soil analysis: Part 3 chemical methods* 5: 475-490. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.
38. Torabian, A., & Mahjouri, M. (2002). Heavy metals uptake by vegetable crops irrigated with waste water in south Tehran. *Journal of Environmental Study* 16(2). (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100475>.
39. Vahabi, F., Mirseyed Hosseini, H., & Shorafa, M. (2011). Effects of spent mushroom compost (SMC) application on some chemical properties of a sandy loam soil and leachate. *Soil Research* 25(1): 49-60. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.5194/se-8-1153-2017>.
40. Vahabi, M.F., Mirseyed, H.H., Shorafa, M., & Hatami, S. (2008). Investigation of the effects of spent mushroom compost (SMC) application on some chemical properties of soil and leachate. *Journal of Water and Soil* 22(2): 394-406. (In Persian with English abstract).
41. Verma, N.K., & Pandey, B.K. (2013). Effect of varying rice residue management practices on growth and yield of wheat and soil organic carbon in rice-wheat sequence. *Global Journal of Science Frontier Research Agriculture and Veterinary Sciences* 13(3): 32-38. <https://doi.org/10.5958/0976-4038.2016.00090.7>.
42. Walkley, A., & Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37(1): 29-38. <https://doi.org/10.1080/00103629209368599>.
43. Wang, J., Zhou, Y., Zhou, C., Shen, Q., & Putheti, R. (2009). Effects of $\text{NH}_4^+\text{-N/NO}_3\text{-N}$ ratios on growth, nitrate uptake and organic acid levels of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *African Journal of Biotechnology* 8(15). <https://doi.org/10.1017/S0014479714000192>.
44. Ysart, G., Clifford, R., & Harrison, N. (1999). Monitoring for nitrate in UK-grown lettuce and spinach. *Food Additives & Contaminants* 16(7): 301-306. <https://doi.org/10.1080/026520399283966>.
45. Zanella, A., Ponge, J.F., Guercini, S., Rumor, C., Nold, F., Sambo, P., Gobbi, V., Schimmer, C., Chaabane, C., & Mouchard, M.L. (2018). Humusica 2, article 16: Techno humus systems and recycling of waste. *Applied Soil Ecology* 122: 220-236. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.037>.
46. Zhong, W., & Cai, Z. (2007). Long-term effects of inorganic fertilizers on microbial biomass and community functional diversity in a paddy soil derived from quaternary red clay. *Applied Soil Ecology* 36(2-3): 84-91. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.12.001>.



Impact of Iron Ore Mining on the Concentration of some Heavy Metals and Soil Pollution Zoning (Case Study: Sangan Iron Ore Mine, Khaf-Iran)

R. Khashtabeh¹, M. Akbari^{2*}, A. Heidari³, A. Najafpour⁴

Received: 06-11-2022

Revised: 28-12-2022

Accepted: 09-01-2023

Available Online: 09-01-2023

How to cite this article:

Khashtabeh, R., Akbari, M., Heidari, A., & Najafpour, A. (2023). Impact of Iron Ore Mining on the Concentration of some Heavy Metals and Soil Pollution Zoning (Case Study: Sangan Iron Ore Mine, Khaf-Iran). *Journal of Water and Soil* 37(1): 77-94. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79471.1219>

Introduction

One of the most fundamental global environmental challenges in the past two decades has been the issue of soil pollution and degradation. Soil, as an important environmental element, has played a significant role in food production, human health, and living organisms, but various factors, by both human and naturally have destroyed it. The exploitation of natural resources with activities such as mining and quarrying, as an anthropogenic action (caused by human activities), is one of the most important factors of human intervention in nature and also one of the environmental hazards of soil degradation, which has caused the spread of desertification. Sangan iron mines in Khaf city are the largest mines in the northeast of Iran. According to the geomorphological disturbances caused by the activity of Khaf iron ore mines and the geological composition of the region, there is a potential for causing pollution and destroying the soil around the mine. This research was conducted with the aim of evaluating the impact of mining activity on concentration of some heavy metals such as lead, iron, nickel, copper, and arsenic in the soil around the iron ore mine in Sangan area of Khaf city in Khorasan Razavi province. Realizing the polluted hotspots due to the concentration of heavy metals, as one of the important signs of soil pollution and the spread of desertification, is one of the goals of this research, and the results can be effective in making appropriate management decisions to prevent soil pollution and further destruction.

Materials and Methods

In order to conduct this research, 60 soil samples were systematically taken from a depth of 0-20 cm from two areas adjacent to the mine and control. The concentration of aqua regia extracted heavy metals was measured using an inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES). In the first stage, the results were descriptive, and in the second part, after performing tests related to the normality of the data, they were inferential using the parametric independent t-test and Pearson's correlation coefficient in the statistical environment of the SPSS software. In order to quantify the level of soil contamination with heavy metals, geochemical indices including contamination factor, pollution load index, and enrichment factor were used. The pollution load zoning map of the area adjacent to the mine as well as the average enrichment map of lead and arsenic elements were prepared using the inverse distance weighting interpolation method in the ArcGIS environment.

Results and Discussion

The results of this research showed that the average concentrations of arsenic, copper, nickel, lead, and iron elements in the area near the mine were 12.71, 25.54, 34.59, 48.64, and 38860 mg/kg and in the control area were

1- Masters Science, Faculty Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Assistant Professor, Department of Desert Areas Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- Assistant Professor, Department of Environmental Science, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

4- Professor, Faculty of Health, Mashhad University of Medical Sciences, Iran

8.57, 15.97, 32.13, 16.96, 29110 mg/kg, respectively. The comparison of the coefficient of variation (dispersion criterion) of heavy metals showed that the highest coefficient of variation among the metals is related to the lead with a value of 42.8%, as well as the coefficient of variation for other metals in the area adjacent to the mine also has a relatively high dispersion compared to the control area. In addition, it was found in all elements except for nickel ($p < 0.05$), which indicates a significant difference in the average concentrations between the control area and the area adjacent to the mine. The correlation between lead element and nickel, copper and arsenic variables was inverse and there was a positive and very strong correlation between iron and copper and nickel with values of 0.8 and 0.76 respectively and nickel and copper with values of 0.82. The pollution coefficient of the lead elements in the area adjacent to the mine showed moderate to significant pollution levels, which is more polluted than other elements. The pollution load in the area near the mine showed that the value of this index was greater than one in the samples closer to the mining areas, which indicates the high contamination of the surface soil with these elements. Lead and arsenic elements in the area adjacent to the mine showed moderate to relatively intense enrichment. From the examination of all the pollution indicators used in this research, as well as the positive and very strong correlation between copper and nickel, the presence of these two elements in the soil of the study area showed no pollution. The comparison of the results obtained from the analysis of soil samples in the two areas of the control and adjacent to the mine showed an increase in the concentration of heavy metals (iron, lead, and arsenic, copper) in the area adjacent to the mining.

Conclusion

The results obtained from the analysis of soil samples and pollution indicators in the two control areas adjacent to the Sangan iron ore mine in Khaf city showed that the presence of iron ore industrial and mining sites in the study area and the spread of its wastes and tailings by seasonal and local winds, as well as the activities of humanity and the spread of these pollutants to other areas, can be one of the main reasons for the increase in the concentration of metal pollutants in the soils of this region.

Keywords: Desertification, Human activities, Heavy metals, Soil contamination indicators

تأثیر استخراج سنگ آهن بر غلظت برخی از فلزات سنگین و پهنه‌بندی آلودگی خاک (مطالعه موردی: معدن سنگ آهن سنگان، خواف-ایران)

ریحانه خشتابه^۱ - مرتضی اکبری^{۲*} - آوا حیدری^۳ - علی اصغر نجف پور^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۹

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی اثرات برخی از فلزات سنگین همچون سرب، آهن، نیکل، مس، آرسنیک و پهنه‌بندی آلودگی خاک ناشی از آنها در مناطق اطراف معدن سنگ آهن سنگان شهرستان خواف در خراسان رضوی انجام شد. جهت انجام این تحقیق، تعداد ۶۰ نمونه خاک از عمق (۰-۲۰) سانتی‌متری به صورت سیستماتیک و از دو منطقه مجاور معدن و شاهد برداشت شد. غلظت فلزات سنگین با استفاده از دستگاه پلاسما جفت شده القایی-آزمون طیف سنجی نشر نوری (ICP-AES) اندازه‌گیری گردید. آزمون نرمال بودن داده‌ها به صورت استنباطی با استفاده از آزمون پارامتریک t مستقل و ضریب همبستگی پیرسون انجام شد. برای کمی نمودن میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین، از شاخص‌های ژئوشیمیایی همچون فاکتور آلودگی، شاخص بار آلودگی و فاکتور غنی‌شدگی استفاده گردید. نقشه پهنه‌بندی بار آلودگی منطقه مجاور معدن و همچنین نقشه متوسط غنی‌شدگی عنصر سرب و آرسنیک نیز با استفاده از روش‌های درونیابی در محیط ArcGIS تهیه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که میانگین غلظت عناصر آرسنیک، مس، نیکل، سرب و آهن در منطقه مجاور معدن به ترتیب ۱۲/۷، ۲۵/۵، ۳۴/۵، ۴۸/۶، ۳۸۸۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم و در منطقه شاهد به ترتیب ۸/۵، ۱۵/۹، ۳۲/۱، ۱۶/۹، ۲۹۱۱۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم بوده است. مقایسه ضریب تغییرات فلزات سنگین نیز نشان داد که بیشترین مقدار این ضریب مربوط به عنصر سرب با ۴۲/۸ درصد و سایر فلزات در منطقه مجاور معدن نیز پراکندگی نسبتاً بالایی را نسبت به منطقه شاهد داشته‌اند. در آزمون t مستقل، مشاهده شد که مقدار سطح معنی‌داری (p-value) در همه عناصر به غیر از عنصر نیکل کمتر از ۰/۰۵ بوده که بیانگر اختلاف معنی‌دار میانگین غلظت‌ها بین منطقه شاهد و منطقه مجاور معدن می‌باشد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته همبستگی بین عنصر سرب با متغیرهای نیکل، مس و آرسنیک از نوع معکوس بوده و همبستگی مثبت و بسیار قوی بین آهن با مس و نیکل به ترتیب با مقدار ۰/۸ و ۰/۷۶ و نیکل با مس با مقدار ۰/۸۲ وجود دارد. ضریب آلودگی عنصر سرب در منطقه مجاور معدن، مقادیر آلودگی متوسط تا قابل توجه را نشان داد که نسبت به سایر عناصر از آلودگی بیشتری برخوردار می‌باشد. عنصر سرب و آرسنیک در منطقه مجاور معدن، غنی‌شدگی متوسط تا نسبتاً شدید را نشان دادند. مقایسه نتایج بدست آمده از آنالیز نمونه‌های خاک در دو منطقه شاهد و مجاور معدن با یکدیگر نشان از افزایش غلظت فلزات سنگین آهن، سرب، آرسنیک و مس در منطقه مجاور معدن کاری بوده است. میانگین غلظت عنصر آرسنیک و آهن احتمال بروز سمیت در آینده را هشدار می‌دهد. حضور دو عنصر مس و نیکل در خاک منطقه تحت تأثیر عوامل طبیعی و زمین‌زاد است. در نتیجه می‌توان به این مهم دست یافت که در صورتی که آلاینده‌های حاصل از معدن‌کاری سنگ آهن در مناطق مجاور معدن کنترل نشود و به دنبال آن روند بیابان‌زایی تکنوژنیک مهار نگردد. علاوه بر بروز مشکلات زیست‌محیطی متعدد تأثیر شگرفی بر بوم‌نظام منطقه خواهد گذاشت.

واژه‌های کلیدی: بیابان‌زایی، شاخص‌های آلودگی خاک، فعالیت‌های انسانی، فلزات سنگین

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استادیار، گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(*) نویسنده مسئول: Email: m_akbari@um.ac.ir

۳- استادیار، گروه محیط‌زیست، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۴- استاد، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، ایران

مقدمه

یکی از اساسی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی جهان در دو دهه‌ی گذشته تاکنون، مسأله‌ی آلودگی و تخریب خاک بوده است (Sahu and Dash, 2011; Damian et al., 2018). هرچند خاک به عنوان یک عنصر مهم محیطی، نقش بسزایی در تولید مواد غذایی، سلامت انسان‌ها و موجودات زنده داشته، اما عوامل مختلفی چه انسانی و چه طبیعی باعث تخریب آن شده است (Akbari et al., 2016; Feyzi Koshki et al., 2019). براساس گزارشات و آمار رسمی منتشر شده توسط سازمان جهانی غذا و کشاورزی^۱ و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل^۲ (۲۰۱۸)، بهره‌برداری از منابع طبیعی با فعالیت‌هایی همچون معدنکاری و معدنکاوی، به منزله کُشی‌ی آنتروپوژنیک (ناشی از فعالیت‌های انسانی)، یکی از مهم‌ترین عوامل دخالت بشر در طبیعت و از مخاطرات محیطی تخریب خاک بوده و باعث گسترش بیابان‌زایی شده است (Darwish et al., 2011; Cocheci et al., 2019; Khashtabeh et al., 2020). هرچند معادن به عنوان یک صنعت مادر به لحاظ تولید کانی‌ها و سایر مواد معدنی برای زندگی روزمره انسان‌ها یک امر ضروری می‌باشد (Teplická et al., 2021)، اما استخراج فلزات از معادن آثار تخریبی بسیار گسترده‌ای بر منابع آب، خاک، هوا و موجودات زنده داشته است (Hubert et al., 2019). معدن‌کاری و معدن‌کاوی با عملیاتی همچون تسطیح اراضی، برداشت خاک، حفر گودال و عملیات بهره‌برداری، باعث کاهش کیفیت و بهم ریختگی خاک شده و در نهایت آلودگی خاک را به همراه خواهد داشت (Sahu and Dash, 2011). فلزات سنگین از آلاینده‌های مهم معدنی محیطی هستند که در غلظت‌های خیلی کم نیز سمی می‌باشند. زمانی که غلظت مواد سمی از آستانه مشخصی تجاوز کند، حاصلخیزی یا توان تولید زمین ممکن است به صفر کاهش یابد. مطالعات مختلف نشان می‌دهند که افزایش حجم آلاینده‌ها ناشی از فلزات سنگین، موجب کاهش و یا از بین رفتن میکروارگانیسم‌های خاک، کاهش کربن آلی خاک، از دست دادن تنوع زیستی، از دست دادن باروری خاک و کاهش حاصلخیزی، از بین رفتن پوشش گیاهی، عدم تعادل عنصری، اسیدی شدن، فرسایش و تخریب خاک و در نهایت گسترش بیابان‌زایی می‌گردند (Mbaya, 2013; Rajeshkumar et al., 2018). نتایج ارزیابی‌های محیطی در منطقه سنگ آهنی در چاتیسگر

هند نشان داد که استخراج سنگ آهن آثاری همچون فرسایش خاک، تخریب زمین، آلودگی آب و خاک را به همراه داشته و باعث گسترش بیابان‌زایی در مناطق اطراف معدن سنگ آهن شده است (Das, 2014). مطالعات انجام شده در ایران نیز نشان داده است که فعالیت‌ها و بهره‌برداری از معادن باعث انتشار عناصری همچون آرسنیک (As)، کادمیم (Cd)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، مس (Cu)، روی (Zn)، آهن (Fe) و سرب (Pb) و آلودگی خاک شده است (Dabiri et al., 2017; Sanjari, 2017; Sistani et al., 2017; Shamsaddin et al., 2020; Hosseinniaee et al., 2021). ایران نیز با توجه به اینکه یک کشور در حال توسعه بوده و برای پیشرفت خود ناچار به توسعه معادن می‌باشد از این قاعده مستثنی نبوده و فعالیت‌های معدنکاوی همچون استخراج و فرآوری فلزات در دو دهه گذشته زمینه تشدید آلودگی خاک به فلزات سنگین را افزایش داده و موجب گسترش بیابان‌زایی در برخی از استان‌های معدنی کشور شده است (Rezaei pour Baghdar et al., 2015; Khashtabeh et al., 2020a; Zanganeh et al., 2022; Akbari et al., 2020a). بنابراین، مطالعه و استفاده از روش‌های مختلف جهت ارزیابی اثر غلظت فلزات سنگین در مناطق اطراف معادن، به خصوص سنگ آهن به طور مستمر از مهم‌ترین اقدامات می‌باشد که در نتیجه آن می‌توان میزان آلودگی خاک (Yangmin et al., 2006; Dabiri et al., 2017) را بررسی و از گسترش بیابان‌زایی تکنوژنیک (بیابان‌زایی ناشی از فعالیت‌های انسانی) در اطراف معادن سنگ آهن پیش‌گیری نمود (Akbari et al., 2020b).

برای ارزیابی اثرات غلظت فلزات سنگین ناشی از معادن، محققین مختلفی در سراسر جهان روش‌هایی را توصیه نموده‌اند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به شاخص‌های فاکتور آلودگی^۳ (Hakanson, 1980)، شاخص بار آلودگی^۴ (Thomilson et al., 1980)، فاکتور غنی‌شدگی^۵ (Nikolaidis et al., 2010) اشاره نمود. لذا، با توجه به اهمیت معدن سنگ آهن سنگان خواف در شرق کشور و وجود تولید باطله‌های معدنی و دپوی سنگ آهن در محدوده سنگ شکن‌ها و ماشین‌آلات (Saadati, 2016)، و رفت و آمد روزانه حدود ۸۰۰ تریلر و کامیون (Sanjari, 2017)، و همچنین بادهای ۱۲۰ روزه سیستان که موجب جابه‌جایی ذرات شده و به تخریب هر چه بیشتر محیط دامن می‌زند؛ الزام انجام این پژوهش را با هدف ارزیابی اثر غلظت برخی از

1- FAO

2- UNEP

3- Contamination Factor

4- Pollution Load Index

5- Enrichment Factor

شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و موقعیت نمونه‌های خاک برداشت شده را نشان می‌دهد.

روش نمونه‌برداری

در بررسی روند و میزان آلودگی خاک منطقه‌ی مورد مطالعه به فلزات سنگین همچون آر سنیك، مس، آهن، سرب، نیکل، تعداد ۶۰ نمونه خاک سطحی از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متری خاک (Xiaoa et al., 2017) بر اساس یک الگوی مشخص (فاصله و موقعیت نمونه‌ها) و به صورت سیستماتیک برداشت شد. نمونه‌ها از دو مکان شاهد و نمونه و در محدوده‌ای به وسعت ۲۰ کیلومتر مربع، از زمین‌های دست نخورده و فاقد کشت می‌باشند (لازم به توضیح است که از نظر کاربری، خاک این مناطق جزء اراضی مرتعی فقیر و تنک بوده و عموماً مورد استفاده چرای دام در زمان دامداری قرار می‌گیرند). لازم به توضیح است که به دست آوردن نمونه‌ی واقعاً دست نخورده خاک تقریباً غیرممکن است، به همین دلیل استفاده عمومی از اصطلاح دست نخورده به آن معنی است که برای تهیه نمونه دقت شد تا حداقل دست خوردگی در ساختار خاک موجود ایجاد شده باشد. همانطور که اشاره شد نمونه برداری خاک شامل دو بخش؛ - نمونه برداری از خاک‌های مجاور معدن (گروه آزمایش) با متوسط فاصله ۵ کیلومتر از معدن - نمونه برداری از خاک‌های منطقه شاهد (گروه کنترل) با متوسط فاصله ۳۵ کیلومتر از معدن بوده است. به‌طوریکه تعداد ۳۰ نمونه از منطقه مجاور معدن به وسعت ۱۰ کیلومتر مربع و ۳۰ نمونه نیز از منطقه شاهد به وسعت ۱۰ کیلومتر مربع برداشت گردید (Xiaoa et al., 2017; Aluko et al., 2018; Tepansyan et al., 2018). مناطق نمونه برداری به گونه‌ای انتخاب شدند که محدوده‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه را تا حد زیادی پوشش دهد.

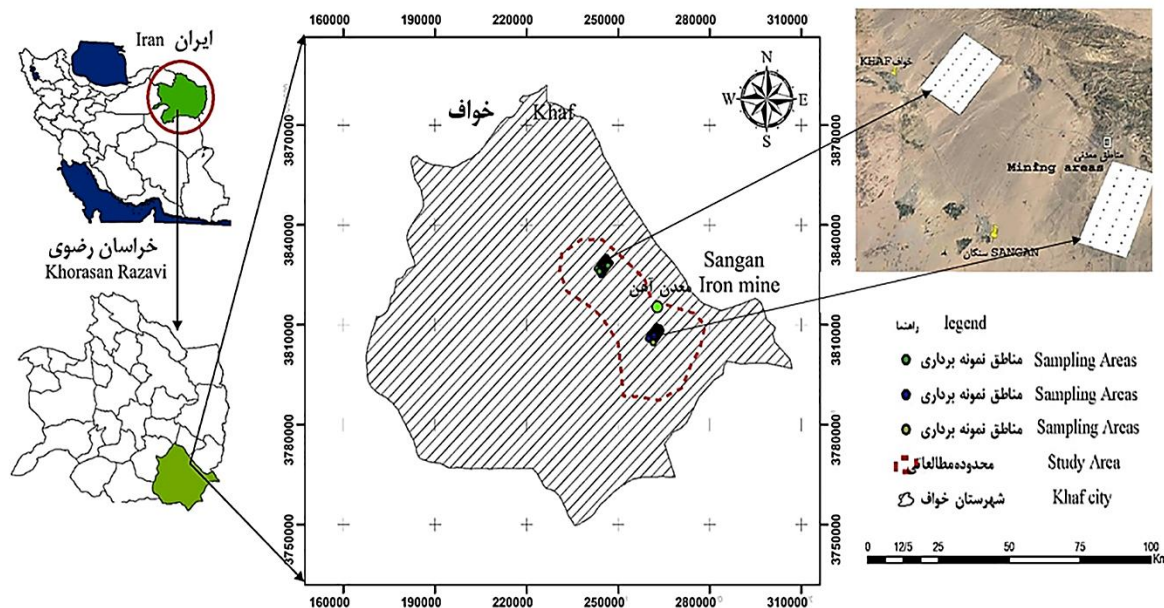
نمونه‌ها با استفاده از بیل و بیلچه برداشت و به مقدار ۱ کیلوگرم در کیسه‌های زیپ پلاست قرار داده شدند. برای هضم و آماده‌سازی نمونه‌ها، از روش تیزاب سلطانی (Aqua regia) استفاده گردید. در این روش میزان ۵ میلی‌لیتر اسید نیتریک غلیظ و ۱۵ میلی‌لیتر هیدروکلریک اسید غلیظ به هر نمونه اضافه و سپس نمونه‌ها به مدت یک شبانه روز در دمای محیط قرار داده شده‌اند. سپس نمونه‌ها در درون بن ماری و در دمای حدود ۹۵-۱۰۵ درجه سانتیگراد حرارت داده شدند تا عملیات هضم، کامل و مایع شفاف حاصل شود. در نهایت در صورت مشاهده رسوب، نمونه‌ها را از کاغذ صافی (واتمن ۴۱) عبور داده و در بالن ژوژه ۵۰ میلی‌لیتری به حجم رسانده شدند (Salman, 2019). برای اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک از دستگاه پلاسمای جفت شده القایی ICP-OES^۲ و در محیط آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد. روش مورد نظر فاکتور غلظت را در نمونه‌ها توسط دستگاه اسپکترومتری نشری پلاسمای جفت شده القایی ارائه می‌کند (Wiel, 2003).

فلزات سنگین بر آلودگی و تخریب خاک، پهنه‌بندی و سنجش آلودگی محیط ناشی از آن فلزات را دو چندان می‌نماید. بطوریکه مهم‌ترین گام در راستای چاره‌اندیشی و نیز پیش‌گیری از گسترش تخریب خاک در اطراف معادن، آگاهی و شناخت از وضعیت آلودگی است. لذا، در این پژوهش، تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی خاک با استفاده از شاخص‌های اشاره شده فوق و آگاهی از مکان‌های هات‌اسپات^۱ آلوده ناشی از غلظت فلزات سنگین به عنوان یکی از نشانه‌های مهم آلودگی خاک و گسترش بیابان‌زایی، از اهداف این پژوهش بوده و امیداست نتایج بدست آمده بتواند در تصمیم‌گیری‌های مناسب مدیریتی برای جلوگیری از آلودگی و تخریب بیشتر خاک ناشی از عناصر فلزات سنگین معادن سنگ آهن موثر باشد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

سنگ آهن سنگان شهرستان خواف با موقعیت جغرافیایی ۲۸° ۲۲' ۶۰" شرقی و ۲۲° ۲۷' ۳۴" شمالی در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد، ۶۸ کیلومتری جنوب غرب شهر تایباد، ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی شهر خواف و ۱۸ کیلومتری شمال شرقی شهرستان سنگان واقع شده است. حداکثر ارتفاع از سطح آب‌های آزاد منطقه ۱۸۱۲ متر است. از جمله مشخصات کانسار سنگ آهن سنگان خواف، دارا بودن عیار ۵۴ درصد (Golmohammadi et al., 2015)، پایین بودن میزان فسفر، گسترش زیاد و حجیم بودن مواد معدنی است (Golmohammadi et al., 2017; Khashtabeh et al., 2021). از مهم‌ترین بادهای محلی آن می‌توان به باد ۱۲۰ روزه سیستان اشاره نمود که در جهتی شمال شرقی به جنوب غربی می‌وزد و به علت عبور از دشت‌های تایباد و خواف و سرعت نسبتاً زیاد، باعث فرسایش خاک و در نتیجه گرد و خاک می‌شود. کانسار سنگ آهن سنگان خواف را جزئی از کمربند آتشفشانی-نفوذی خواف-کاشمر-بردسکن معرفی کردند بخش عمده کانسار آهن سنگان از مگنتیت تشکیل شده است و کانسنگ‌های آهن‌دار هماتیت، لیمونیت و گوتیت در این محدوده دیده می‌شود و کانی‌های سولفوری عمده، شامل پیریت، کالکوپیریت، مارکاسیت و پیروتیت می‌باشد (Mazhari, 2016). منطقه مورد مطالعه بر روی نهشته‌های کواترنری دشت خواف واقع گردیده است و به لحاظ سنگ‌شناسی از تنوع چندانی برخوردار نمی‌باشد (Khashtabeh et al., 2021). طبق آمار منتشره در سالنامه آماری استان خراسان رضوی (۱۳۹۵)، شهرستان خواف دارای ۳۳۱۸۹ نفر جمعیت می‌باشد که در فعالیت‌های همچون معدن‌کاری مشغول به فعالیت هستند (Khashtabeh et al., 2021).



شکل ۱- موقعیت و الگوی نمونه برداری خاک در منطقه مورد مطالعه
Figure 1- Location and soil sampling patterns in the study area

شده طبق رابطه ۱ بدست آمد (Chen and Liu, 2012).

$$W_i = \frac{D_i^{-a}}{\sum_{i=1}^n D_i^{-a}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن W_i وزن نقطه i ام، D_i فاصله نقطه i ام تا نقطه مجهول و a معادل توازن وزن دهی می باشد.

شاخص‌های آلودگی خاک

الف) فاکتور آلودگی^۱: از فاکتور آلودگی برای تعیین مقدار آلودگی خاک استفاده می شود و از تقسیم غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینه به دست می آید (Hakanson, 1980).

$$CF = \frac{C_{\text{metal}}}{C_{\text{background}}} \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲ C_{metal} غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و $C_{\text{background}}$ غلظت عنصر مورد نظر در زمینه که معمولاً متوسط غلظت در شیل (مقیاس) جهانی (Turekian and Wedepohl, 1961) یا متوسط غلظت در بخش بالایی پوسته قاره‌ای (Tylor and McLennan, 1995) در نظر گرفته می شود؛ در این مطالعه از متوسط غلظت مقیاس جهانی (Turekian and Wedepohl, 1961) با مقادیر (As=۱۳، Cu=۴۵، Pb=۲۰، Ni=۶۸، Fe=۴۷۲۰۰) میلی گرم بر کیلوگرم استفاده شده است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

در این پژوهش علاوه بر آزمون چولگی و کشیدگی برای بررسی نرمال بودن یا نبودن توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد (Hosseinniaee et al., 2021). تحلیل‌های آماری در محیط نرم افزاری SPSS نسخه ۲۶ انجام گردید. آزمون t مستقل جهت تحلیل تفاوت میانگین غلظت فلزات سنگین در گروه آزمایش (منطقه مجاور معدن) و گروه کنترل (منطقه شاهد) استفاده شد (Dashti amirabad et al., 2012). ضریب همبستگی پیرسون نیز برای بررسی همبستگی خطی بین متغیرهای مختلف در گروه آزمایش به کار برده شد (Haghparsat and Torshizian, 2019; Rastmanesh et al., 2010).

تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی آلودگی خاک

نقشه پهنه‌بندی آلودگی خاک با استفاده از شاخص‌های معرفی شده در این پژوهش و در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی ArcGIS 10.6 و با روش‌های آنالیز مکانی زمین آمار انجام گرفت. در این مطالعه برای تهیه نقشه پراکنش سطحی فلزات سنگین و طبق مقادیر بدست آمده برای هر نمونه خاک، از روش درون‌یابی IDW استفاده شد (Xiao et al., 2016; Akbari et al., 2020). وزن محاسبه شده برای هر نقطه در روش IDW وابسته به توان اعمال

جدول ۱- رده بندی مقادیر فاکتور آلودگی خاک (Hakanson, 1980)

Table 1- Classification of soil Contamination factor values (Hakanson, 1980)

Value مقدار	CF < 1	1 ≤ CF < 3	3 ≤ CF < 6	CF ≥ 6
سطح CF leve CF	آلودگی پایین Low contamination	آلودگی متوسط Moderate contamination	آلودگی قابل توجه (نسبتاً شدید) Considerable contamination (relatively intense)	آلودگی بسیار بالا Very high contamination
کد Code	A	B	C	D

$$EF = \left[\frac{C_x(\text{sample})}{C_{ref}(\text{sample})} \right] / \left[\frac{B_n(\text{background})}{B_{ref}(\text{background})} \right]^4$$
 رابطه ۴
 در رابطه فوق، EF فاکتور غنی‌شدگی، C_x غلظت فلز مورد نظر در نمونه (خاک)، C_{ref} غلظت فلز مرجع (Fe) در نمونه، B_n غلظت همان فلز در یک محیط مبنا (پوسته زمین) و B_{ref} غلظت فلز مرجع در محیط مبنا (پوسته زمین) است (Tylor, 1964). عنصر مرجع عنصری است که تغییرات اندکی در محیط داشته و غلظت آن در محیط متأثر از فعالیت‌های انسان نباشد (عنصری که منشأ کاملاً زمین‌شناسی داشته باشد). در این مطالعه آهن با مقدار ۴۱۰۰۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم، به عنوان عنصر مرجع (Nikolaidis et al., 2010) و آرسنیک با ۱/۸، مس با مقدار ۵۵، سرب با مقدار ۱۳ و نیکل با مقدار ۵۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم در محیط مبنا (پوسته) در نظر گرفته شده است. بر اساس نظر ژانگ و همکاران در سال ۲۰۰۷ (Zhang et al., 2007) زمانی که مقدار EF بین ۰/۵ و ۱/۵ است، فلزات کمیاب به طور کامل منشأ پوسته‌ای دارند و زمانی که مقدار EF بیشتر از ۱/۵ است، بخش فراوانی از عناصر توسط منابع دیگر تأمین شده‌اند (انسان‌زاد). در جدول ۲ رده‌بندی درجه آلودگی (Sutherland, 2000) بر مبنای فاکتور غنی‌شدگی آورده شده است.

نتایج و بحث

تو صیف آماری داده‌ها اولین قدم در راستای سامان‌دهی داده‌ها و اطلاع از وضعیت توزیع آن‌ها است. نتایج بدست آمده در جدول‌های ۳ و ۴ مهم‌ترین ویژگی‌های آماری داده‌های اولیه عناصر سنگین آرسنیک، مس، نیکل، سرب، آهن خاک‌های مورد بررسی در این پژوهش را نشان داد.

هاگانسون (Hakanson, 1980) فاکتور آلودگی را در ۴ رده بیان نموده که در جدول ۱ رده‌بندی مقادیر فاکتور آلودگی نشان داده شده است. طبق روش هاگانسون، درجات آلودگی از کم تا زیاد و به صورت کدهای A تا D کدگذاری و مشخص می‌شوند.

ب) شاخص بار آلودگی^۱: این شاخص برای ارزیابی کل درجه آلودگی در خاک استفاده می‌شود. مزیتی که شاخص بار آلودگی نسبت به شاخص‌های دیگر دارد، این است که در این شاخص ریسک آلودگی به همه فلزات، در منطقه مشخص می‌شود و این شاخص راه آسانی برای اثبات تخریب خاک در اثر انباشت فلزات سنگین است (et al., 2018). با استفاده از این شاخص می‌توان بار آلودگی کل فلزات را در منطقه ارزیابی نمود. زیرا یک شاخص آلودگی تجمعی است که از شاخص منفرد CF بدست می‌آید. در واقع با استفاده از این شاخص می‌توان به میزان تخریب خاک ناشی از آلودگی فلزات سنگین در منطقه دست یافت. شاخص بار آلودگی برای یک سایت ویژه توسط روشی که تامیلسون در سال ۱۹۸۰ (Thomilson et al., 1980) ارائه داده است، ارزیابی می‌شود. این پارامتر با رابطه‌ی ۳ بیان می‌شود:

$$PLI = \sqrt[n]{Cf1 \times Cf2 \times \dots \times Cfn}$$
 رابطه ۳
 در رابطه فوق، n تعداد فلزات است که در این مطالعه ۵ نوع فلز بررسی شده است و CF نیز فاکتور آلودگی می‌باشد. مزیتی که این شاخص نسبت به سایر شاخص‌های آلودگی دارد این است که در آن ریسک آلودگی به همه فلزاتی که در منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد، مشخص می‌شود. PLI یک شاخص انتگرالی مهم در بررسی میزان آلودگی منطقه است که هر چه از عدد یک بالاتر باشد، مراتب آلوده بودن به فلزات در منطقه غیرآلوده را نشان می‌دهد. اگر $PLI \geq 1$ باشد بیانگر آلودگی و اگر $PLI < 1$ بیانگر غیرآلوده بودن خواهد بود (Jorfi et al., 2017).

ج) فاکتور غنی‌شدگی^۲: این فاکتور روش مناسبی جهت تعیین منشأ طبیعی و انسان‌زاد آلودگی است و از رابطه ۴ طبق روش زیر محاسبه می‌شود (Nikolaidis et al., 2010).

جدول ۲- رده بندی درجه آلودگی بر مبنای فاکتور غنی شدگی (Sutherland, 2000)

Table 2- Classification of the degree of pollution based on the values of the enrichment factor (Sutherland, 2000)

Value مقدار	EF < 1	1 ≤ EF < 3	3 ≤ EF < 5	5 ≤ EF < 10	10 ≤ EF < 25	25 ≤ EF < 50
رده بندی مقدار آلودگی Classification of the amount of pollution	بدون غنی شدگی No enrichment	غنی شدگی اندک Low enrichment	غنی شدگی متوسط Moderate enrichment	غنی شدگی قابل ملاحظه (نسبتاً شدید) Significant enrichment (relatively intense)	غنی شدگی شدید Very high enrichment	غنی شدگی بسیار شدید Extremely high enrichment
Code کد	A	B	C	D	E	F

جدول ۳- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در نمونه های خاک مجاور معدن

Table 3- Descriptive statistics of heavy metal concentration in the soil samples of the adjacent area's mine

عنصر Element	حداقل Minimum (mg kg ⁻¹)	حداکثر Maximum (mg kg ⁻¹)	میانگین Mean (mg kg ⁻¹)	میانه Median (mg kg ⁻¹)	انحراف معیار Standard Deviation (mg kg ⁻¹)	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	دامنه تغییرات Variation range (mg kg ⁻¹)	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
آرسنیک As	9.4	18.9	12.7	12.1	2.4	19.2%	9.5	0.9	0.2
مس Cu	18.3	46.4	25.5	23.05	6.4	25.1%	28.05	1.5	2.5
نیکل Ni	19.1	49.3	34.5	35.9	9.2	26.8%	30.2	0.19	1.1
سرب Pb	21.9	95.7	48.6	47.7	20.8	42.8%	73.8	0.50	0.5
آهن Fe	29200	62400	38860	37000	7430.02	19.1%	33200	1.6	3.1

جدول ۴- آمار توصیفی غلظت فلزات سنگین در نمونه های خاک منطقه شاهد

Table 4- Descriptive statistics of heavy metal concentration in the soil samples of witness area

عنصر Element	حداقل Minimum (mg kg ⁻¹)	حداکثر Maximum (mg kg ⁻¹)	میانگین Mean (mg kg ⁻¹)	میانه Median (mg kg ⁻¹)	انحراف معیار Standard Deviation (mg kg ⁻¹)	ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	دامنه تغییرات mg kg ⁻¹ Variation range (mg kg ⁻¹)	چولگی Skewness	کشیدگی Kurtosis
آرسنیک As	7.6	9.9	8.5	8.4	0.60	7%	2.2	0.4	-0.7
مس Cu	11.05	21.3	15.9	16.04	2.8	17%	10.2	0.2	-0.8
نیکل Ni	17.5	40.7	32.1	32.8	5.8	18%	23.2	-0.50	-0.40
سرب Pb	13.1	24.5	16.9	16.5	2.4	14.6%	11.3	1.6	3.87
آهن Fe	24400	37200	29110	28500	3210.04	11%	12800	0.8	0.5

میانگین غلظت عناصر به ترتیب ۸/۵، ۱۵/۹، ۳۲/۱، ۱۶/۹، ۲۹۱۱۰ میلی گرم بر کیلوگرم شد. بیشترین مقدار میانگین فلز در منطقه مجاور معدن، برای آهن ۳۸۸۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم و کمترین آن برای

براساس نتایج در جدول ۳ میانگین غلظت عناصر آرسنیک، مس، نیکل، سرب و آهن به ترتیب ۱۲/۷، ۲۵/۵، ۳۴/۵، ۴۸/۶، ۳۸۸۶۰ میلی گرم بر کیلوگرم بدست آمد و همچنین در منطقه شاهد (جدول ۴)

سطح معنی‌داری عنصر آرسنیک، مس و آهن در گروه آزمایش کوچکتر از p -value با مقدار $0/05$ است که نشان از نرمال نبودن توزیع داده‌ها در این عناصر است و همچنین در گروه کنترل عنصر سرب با سطح معنی‌داری $0/046$ نرمال نمی‌باشد زیرا از p -value مقدار $0/05$ کوچکتر است (شرایط عدم نرمالیتی در گروه آزمایش بیشتر از گروه کنترل است). پس از شناسایی داده‌های غیر نرمال باید آن‌ها را از مجموعه اطلاعاتی که برای پردازش لازم است، خارج کرد و محاسبات آماری و تحلیل‌ها را انجام داد (Aggarwal, 2017). نتایج آزمون کولموگروف-اسمیرنوف بعد از حذف داده‌های غیر نرمال برای تست نرمالیتی داده‌ها به تفکیک دو گروه بررسی شد. در همه متغیرها و در هر دو گروه شرایط نرمالیتی برقرار شد (میزان سطح معنی‌داری عددی بزرگتر از $0/05$ شد). بنابراین آزمون پارامتریک t دو نمونه مستقل استفاده شد. جدول ۵ نتایج آزمون t دو نمونه مستقل را نشان می‌دهد.

اگر سطح معنی‌داری کمتر از $0/05$ باشد یعنی اختلاف معنی‌داری بین غلظت عناصر سنگین در دو منطقه ذکر شده وجود دارد. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۵ مشخص شد که در همه متغیرها به جز نیکل اختلاف بین میانگین دو گروه معنی‌دار است و در همه متغیرها میانگین گروه آزمایش بالاتر از گروه کنترل قرار دارد؛ که حاکی از افزایش غلظت عناصر سنگین در منطقه تحت تأثیر معدنکاری است. در مطالعه دشتی امیرآباد و همکاران (Dashti amirabad et al., 2012) که بر روی اثر باطله‌های سولفیدی در بیابان‌زایی اطراف معادن صورت گرفت نشان داد که نمونه‌های خاک در منطقه مجاور معدن به عناصر سرب و آرسنیک آلوده هستند. برای مقایسه مناطق شاهد و آلوده از آزمون t استفاده کرد و همچنین یافته‌های او نشان داد که میزان تاج پوشش گیاهی در منطقه تحت اثر آلودگی‌های ناشی از اکسیداسیون باطله‌های سولفیدی معدن حدود ۱۷ درصد کمتر از منطقه شاهد می‌باشد که نشان دهنده تخریب خاک و کاهش پتانسیل زمین است. در نتیجه می‌توان گفت انتشار ضایعات و باطله‌های حاصل از معدنکاری از جمله دلایل اصلی افزایش غلظت آلاینده‌های فلزی در خاک‌های مناطق مجاور معدن است که باعث تخریب خاک و در نهایت موجب پدیده بیابان‌زایی تکنوزنیک شده است.

همبستگی بین غلظت فلزات سنگین بر اساس ضریب همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. همبستگی بالا بین غلظت فلزات سنگین خاک می‌تواند بیانگر آن باشد که احتمالاً منبع این فلزات یکسان بوده و عناصری که دارای همبستگی کمی باشند رفتار ژئوشیمی متفاوتی نسبت به عناصر دیگر از خود نشان می‌دهند (Sharma and Raju, 2013; Shamsadin et al., 2015; Haghparsat and Torshizian, 2019).

آرسنیک با مقدار $12/71$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمد. در منطقه شاهد بیشترین میانگین متعلق به عنصر آهن با مقدار 29110 و کمترین عنصر آرسنیک با مقدار $8/57$ می‌باشد. مقدار متوسط غلظت عناصر مورد مطالعه در نمونه‌ها با میانگین غلظت آنها در شیل (مقیاس) جهانی که قبلاً به آن اشاره شده است، مقایسه شد. عنصر سرب در منطقه مجاور معدن با مقدار متوسط $48/6$ میلی‌گرم بر کیلوگرم بالاتر از حداکثر استاندارد خاکهای جهان یا شیل جهانی (Turekian and Wedepohl, 1961) با مقدار 20 میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌باشد و عنصر آرسنیک با مقدار $12/7$ میلی‌گرم بر کیلوگرم در آستانه حداکثر استاندارد جهانی خاک با مقدار 13 در منطقه مجاور معدن قرار دارد، مقدار غلظت سایر عناصر در منطقه مجاور معدن و منطقه شاهد پایین‌تر از حداکثر استاندارد خاک‌های جهان (شیل جهانی) است. طبق نتایج بدست آمده جدول‌های ۳ و ۴ میانگین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک منطقه مجاور معدن را می‌توان به ترتیب به صورت آرسنیک > مس > نیکل > سرب > آهن نشان داد و میانگین غلظت فلزات سنگین در نمونه‌های خاک منطقه شاهد نیز از این روند پیروی می‌کند. از آنجایی که معدن مورد مطالعه از نوع سنگ آهن بود، این نتیجه که غلظت عنصر آهن در هر دو منطقه شدت داشته باشد قابل پیش‌بینی بود. یانگمین و همکاران (Yangmin et al., 2006) گزارش دادند ضریب تغییرات فلزات سنگین که تحت عوامل طبیعی کنترل می‌شوند، تقریباً کم و بیانگر محدود بودن عوامل دخیل در تغییرات آنها است؛ در حالی که برای فلزات سنگین متأثر از منابع انسانی، این ضریب زیاد است. مقایسه ضریب تغییرات (معیار پراکندگی) فلزات سنگین نشان داد که بیشترین ضریب تغییرات در بین فلزات متعلق به عنصر سرب در منطقه مجاور معدن با مقدار $42/8$ درصد و کمترین متعلق به عنصر آرسنیک در منطقه شاهد با مقدار 7 درصد می‌باشد. همچنین میزان ضریب تغییرات برای سایر فلزات در منطقه مجاور معدن نیز پراکندگی نسبتاً بالایی را نشان می‌دهد که می‌توان آن را تحت تأثیر عوامل خارجی، نظیر فعالیت‌های صنعتی منطقه (معدنکاری) دانست. همانند نتایج بدست آمده از این تحقیق در مطالعات زیادی از افزایش ضریب تغییرات فلزات سنگین، برای نشان دادن عوامل متأثر از منابع انسانی به ویژه فعالیت‌های معدنکاری معرفی شده است (Ravankhah et al., 2015; Shamsadin et al., 2015). یانگ و همکاران (Yang et al., 2009) مشاهده کردند که افزایش غلظت بالای فلز سرب در منطقه مجاور معادن تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد. بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف اسمیرنوف برای کلیه متغیرهای مورد مطالعه نشان داد که

جدول ۵- آزمون t برای تعیین معنی دار بودن اختلاف غلظت میانگین عناصر سنگین در مناطق مجاور معدن (گروه آزمایش) و منطقه شاهد (گروه کنترل)

Table 5- t-test to determine the significance of the difference in the average concentration of heavy metals in the adjacent (experiment group) and witness (control group) areas

گروه Group	عناصر Elements	آزمون T مستقل Independent samples T-test					
		T	درجه آزادی Df	معنی داری Significant	میانگین تفاوت Mean difference	تفاوت خطای استاندارد Std. Error Difference	اختلاف فاصله اطمینان ۹۵٪ Confidence interval difference at the 95% level پایین Lower بالا Upper
آزمایش و کنترل Experiment and control	آرسنیک As	9.512	31.548	*0.000	3.754	3947	2.949 4.558
	مس Cu	8.633	54	*0.000	7.596	87996	5.832 9.361
	نیکل Ni	1.231	58	0.223	2.459	1.997	-1.540 6.458
	سرب Pb	8.367	29.579	*0.000	31.938	3.817	24.137 39.73
	آهن Fe	7.781	55	*0.000	7778.88	999.667	5775.492 9782.28

در این مطالعه همبستگی بین سرب با متغیرهای نیکل، مس و آرسنیک از نوع معکوس است بدین معنی که با افزایش سرب کاهش در سایر متغیرها مشاهده می‌شود و نشان از منبع متفاوت آنها می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه حضور سرب در باطله‌های معدن سنگان خواف ثبت شده است (Saadati, 2016; Sanjari, 2017) لذا این عنصر آلایندگی در محیط از خود نشان می‌دهد که می‌توان آن را تحت تأثیر عوامل خارجی (فعالیت‌های معدنکاری) دانست. ضریب تغییرات بالا برای سرب نیز مؤید این نتیجه‌گیری است. مقادیر ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر سنگین در منطقه مجاور معدن (گروه آزمایش) نشان داده شده است (جدول ۶).

بررسی شاخص‌های آلودگی خاک

با استفاده از فاکتور آلودگی در میان نمونه‌های معدنی، عنصر مس و نیکل فاقد آلودگی (کد A) و یا آلودگی پایین (کد B) بوده و عنصر آرسنیک و آهن دارای آلودگی پایین تا متوسط و عنصر سرب آلودگی متوسط تا قابل توجه (کد C) را نشان دادند. در منطقه شاهد، به غیر از دو نمونه با آلودگی متوسط (کد B) در عنصر سرب، سایر عناصر فاقد آلودگی را نشان می‌دهد. در شکل ۲، متوسط فاکتور آلودگی برای عناصر آرسنیک، مس، نیکل، سرب و آهن ترسیم شد. در شکل زیر متوسط فاکتور آلودگی برای عناصر سرب با میانگین ۲/۵ و آهن ۱/۲ در منطقه مجاور معدن دارای آلودگی می‌باشد و عنصر آرسنیک نیز با مقدار ۰/۹۸ از نزدیک شدن بروی خط شاخص، بیانگر خطر آلودگی در منطقه مجاور معدن است.

نتایج آزمون ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی همبستگی خطی بین متغیرهای مختلف در گروه آزمایش، ۷ همبستگی معنی دار را نشان داد. به طوریکه همبستگی معنی دار و مثبتی بین آرسنیک و مس وجود دارد که نشان از منشأ مشترک در ورود عناصر فوق به خاک است. علاوه بر آن مشخص شد که همبستگی مثبت و بسیار قوی بین آهن با مس و نیکل به ترتیب با مقدار ضریب همبستگی ۰/۸ و ۰/۷۶ است که به خاطر خصوصیات شیمیایی و منشأ مشترک بین این سه عنصر می‌باشد. آهن از نظر شیمیایی بسیار فعال و رفتار شیمیایی آن مشابه دیگر فلزات می‌باشد (Garavand et al., 2012) و شرایط طبیعی و زمین‌زاد در منطقه می‌تواند هم منشأ بودن این عناصر را در نمونه‌های خاک و رسوب اطراف معدن توجیه نماید (مواد مادی). این همبستگی بالا بین عناصر ذکر شده نشان داد که در اکثر مواقع می‌توان از غلظت مشاهده شده یک عنصر حضور و میزان غلظت دیگر عناصر را نیز با دقت بالایی تخمین زد. مطالعه خاک‌های جنوب شرقی چین نشان داد که بین آهن، مس و نیکل همبستگی بالایی وجود دارد (Wang and Wu, 2008). همبستگی مثبت و قوی بین نیکل با مس با مقدار ۰/۸۲ وجود دارد که با مطالعه سعادت (Saadati, 2016) در بررسی غلظت فلزات سنگین در خاک اطراف معدن سنگان خواف کاملاً مطابقت دارد. مقدار ضریب تغییرات عنصر نیکل و مس را می‌توان دلیلی بر غالب بودن تأثیر منبع زمین شناسی در تعیین پراکنش این عناصر در منطقه دانست. بین آرسنیک با آهن و نیکل همبستگی معنی داری وجود نداشت. نتایج راسمنش و همکاران (Rastmanesh et al., 2010) در منطقه مس سرچشمه کرمان همبستگی ضعیف آرسنیک با دیگر عناصر را نشان داده است.

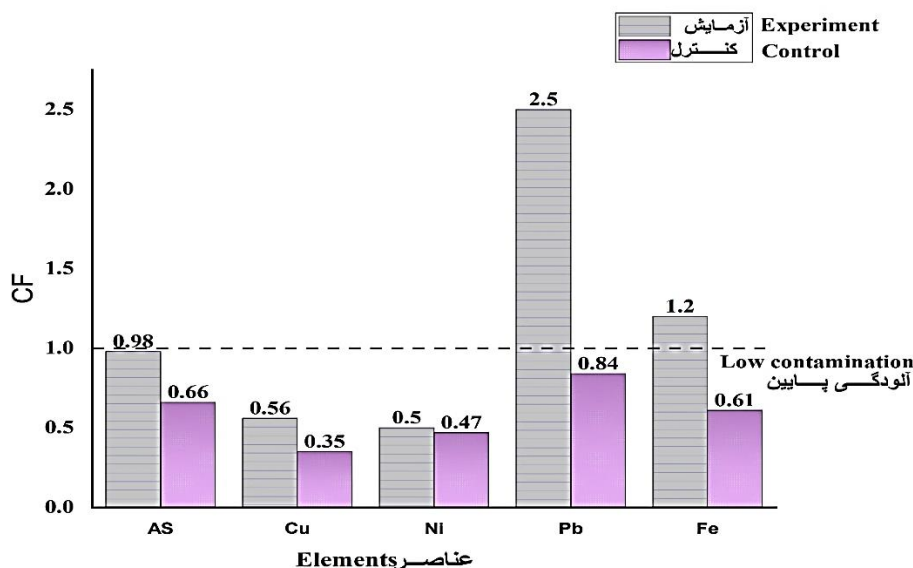
جدول ۶- ضریب همبستگی خطی بین متغیرهای در گروه آزمایش

Table 6- Linear correlation coefficient between variables in the experiment group

	آرسنیک As	مس Cu	نیکل Ni	سرب Pb	آهن Fe
آرسنیک As	1				
مس Cu	0.428*	1*			
نیکل Ni	0.254	0.825*	1		
سرب Pb	-0.475*	-0.512**	-0.409*	1	
آهن Fe	0.315	0.800**	0.764**	-0.296	1

*Correlation is significant at the 0.05 level. معنادار است. ۰/۰۵ سطح

**Correlation is significant at the 0.05 level. معنادار است. ۰/۰۱ سطح



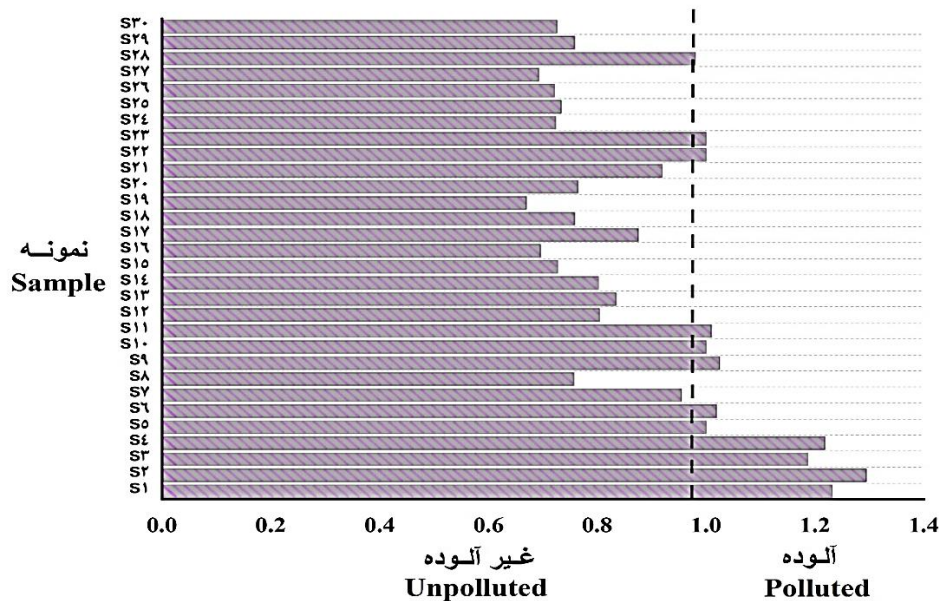
شکل ۲- متوسط فاکتور آلودگی در مناطق مجاور (گروه آزمایش) و شاهد (گروه کنترل)

Figure 2- The Average Contamination factor in the soil samples of the adjacent (experiment group) and witness (control group) areas

مجاور معدن را نشان می‌دهد. نمونه‌ها با مقادیر ۱ حاکی از آلودگی می‌باشند (Adomako et al., 2008). در منطقه مجاور معدن نمونه‌هایی که مسافت کمتری به مناطق معدنی دارند بار آلودگی را نشان می‌دهند. نتایج حاصل از مقدار شاخص بار آلودگی در مطالعه سعادت (Saadati, 2016) نشان داد که بار آلودگی اغلب نمونه‌ها مقادیر بالاتر از یک است همچنین نقشه پهنه‌بندی بار آلودگی حاکی از آلودگی خاک در اطراف معدن سنگان می‌باشد.

مطالعات انجام شده توسط سیستانی و همکاران (Sistani et al., 2017) در اطراف مجتمع فولاد کرمان عنصر سرب را دارای آلودگی متوسط تا قابل توجه گزارش دادند، همچنین در مطالعه‌ای که توسط سعادت (Saadati, 2016) انجام شد فاکتور آلودگی محاسبه شده نشان داد که خاک اطراف معدن سنگان خواف در نتیجه فعالیت‌های معدنکاری آلوده به آرسنیک (آلودگی قابل توجه) و آهن (آلودگی متوسط) بوده است.

شکل ۳ نمودار شاخص بار آلودگی متعلق به نمونه‌های منطقه



شکل ۳- نمودار محاسبه شده برای نمونه‌های مناطق مجاور معدن
Figure 3- Calculated PLI diagram for the samples of the adjacent area's mine

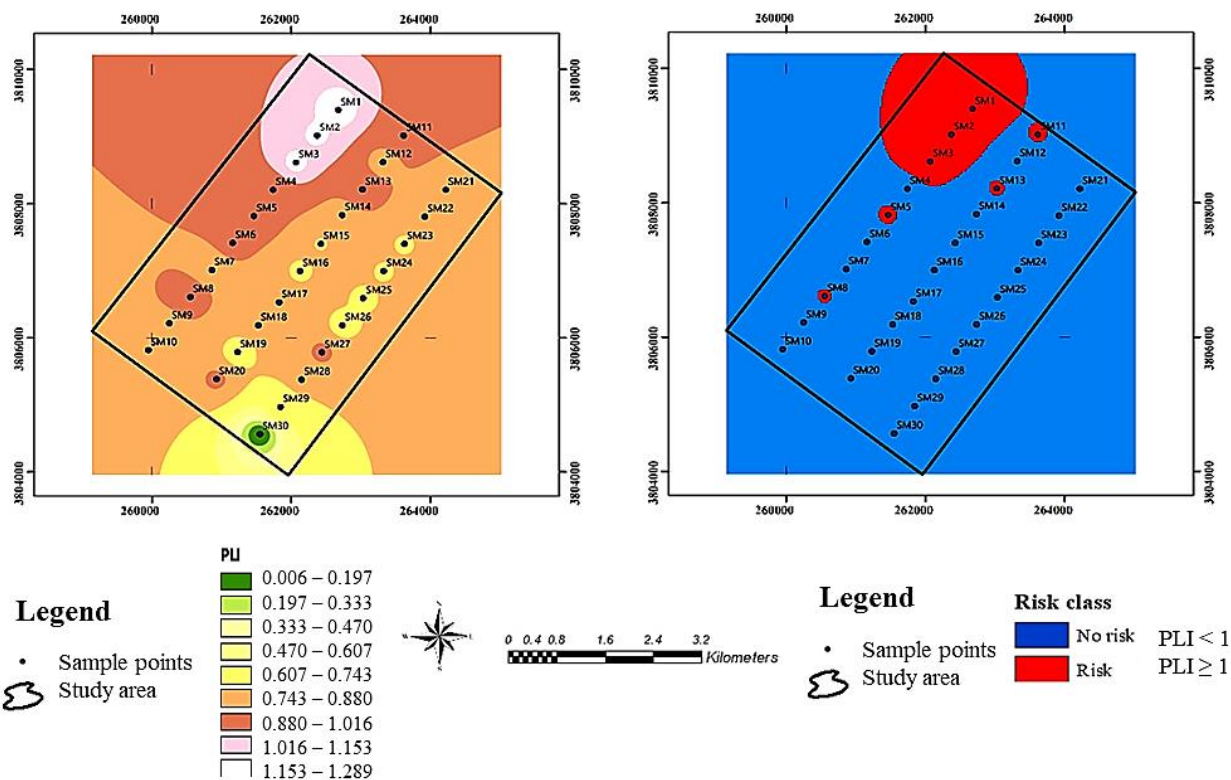
معدن غنی‌شدگی متوسط (کد B) تا قابل ملاحظه (کد C) و نسبتاً شدید (کد D) را نشان داده است و عنصر آرسنیک غنی‌شدگی قابل ملاحظه (کد C) و نسبتاً شدید (کد D) داشته است. در منطقه شاهد همه عناصر به غیر از آرسنیک که غنی‌شدگی حداقل تا متوسط را نشان دادند. سایر عناصر دیگر دارای غنی‌شدگی حداقل (کد A) هستند این بدین معنا است که در منطقه شاهد غلظت تمام عناصر منشأ در لیتوژنیک منطقه دارد. در شکل ۵ متوسط غنی‌شدگی عناصر در منطقه مجاور معدن و شاهد نشان داده شده است. نتایج نشان داد که نیکل و مس در رده غنی‌شدگی حداقل است و عنصر سرب دارای غنی‌شدگی حداقل در منطقه شاهد و غنی‌شدگی متوسط و قابل توجه در منطقه مجاور معدن می‌باشد. به دلیل این که عنصر آهن به عنوان عنصر مرجع انتخاب شد، بنابراین محاسبه ضریب غنی‌شدگی برای عنصر آهن در تمامی نمونه‌ها عدد ۱ بوده است. بر این اساس سرب و آرسنیک با منشأ آنتروپوژنیک در منطقه مشخص شده است که نشان از فعالیت معدنکاری در منطقه است. غنی‌شدگی آرسنیک را می‌توان به وجود کانی‌های سولفیدی از قبیل پیریت و اکسید پیریت در باطله‌های معدنی و هوازدگی سنگ‌های منطقه و همچنین مورفولوژی بهم ریخته منطقه که باعث بهم ریختگی خاک شده، نسبت داد. بقیه عناصر در منطقه غنی‌شدگی نشان نداده‌اند که حضور آنها با منشأ لیتوژنیک را توجیه می‌نماید. دبیری و همکاران (Dabiri et al., 2017)، آلودگی فلزات سنگین و تعیین منشأ آنها در خاک‌های اطراف ناحیه معدن آهن سنگان، شمال شرق ایران را بررسی نمودند. آنها با بهره‌گیری از فاکتور آلودگی (Cf) و فاکتور غنی‌شدگی (Ef) نشان

در شکل ۴ نقشه پهنه‌بندی PLI، نشان داد خاک در اطراف مناطق معدنی از آلودگی برخوردار است. در واقع این نقشه حاکی از تخریب خاک منطقه در مناطق با بار آلودگی است که شمال منطقه و قسمت‌هایی از غرب منطقه را در بر می‌گیرد (نقشه سمت چپ بار آلودگی منطقه مجاور معدن را به روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله نشان می‌دهد و نقشه سمت راست نقشه کلاس‌بندی شده منطقه مجاور معدن بر اساس کلاس خطر شاخص بار آلودگی می‌باشد). در مطالعه‌ای که توسط حسین‌زایی و همکاران (Hosseinniaee et al., 2021) انجام شد شاخص PLI محاسبه شده نشان داد که خاک اطراف معدن آلوده، و باعث کاهش کیفیت خاک شده است در هماهنگی با یافته‌های سایر محققان (Saadati, 2016; Hosseinniaee et al., 2021). در این مطالعه نمونه‌هایی که مسافت کمتری به مناطق معدنی دارند بار آلودگی بالاتر از ۱ را نشان می‌دهند در نتیجه تأثیر عوامل انسان‌زاد (معدنکاری) علاوه بر عوامل طبیعی باعث افزایش غلظت عناصر در نمونه‌های مجاور با معدن است که نشان از کاهش کیفیت خاک و در نهایت شروع پدیده بیابان‌زایی می‌باشد (Das, 2014).

نتایج بدست آمده از ارزیابی شاخص غنی‌شدگی نیز نشان داد که هر چه مقدار فاکتور غنی‌سازی بیش‌تر باشد بیانگر آن است که سهم عامل انسانی در افزایش آلودگی فلز مورد نظر در خاک منطقه بیشتر است (Nikolaidis et al., 2010). استفاده از این شاخص عناصر نیکل و مس را با حداقل غنی‌شدگی و غنی‌شدگی اندک (کد A) را در منطقه مجاور معدن نشان داد. در مورد عنصر سرب در منطقه مجاور

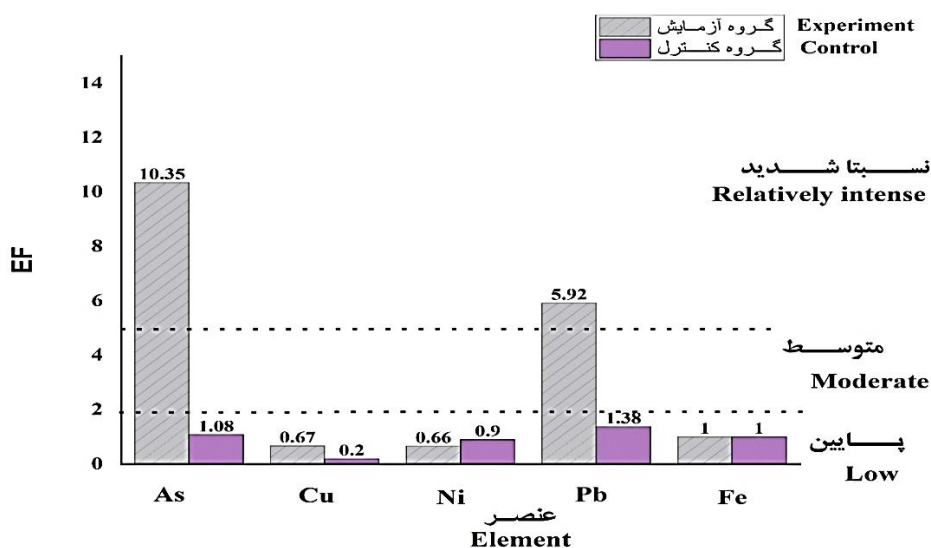
می‌باشند و غلظت عناصر آهن و مس توسط منشأ انسان زاد (فعالیت های معدنی) کنترل می‌شود، این در حالی است که بنظر می‌رسد عناصر دیگر همچون سرب و روی عمدتاً منشأ زمین‌زاد دارند.

دادند که غنی‌شدگی قابل توجهی از فلزات سنگین در ناحیه معدنی رخ داده است. داده‌های به دست آمده نشان داد که خاک‌های منطقه به لحاظ عناصر آهن و مس در مقایسه با توزیع نرمال آن‌ها دارای آلودگی



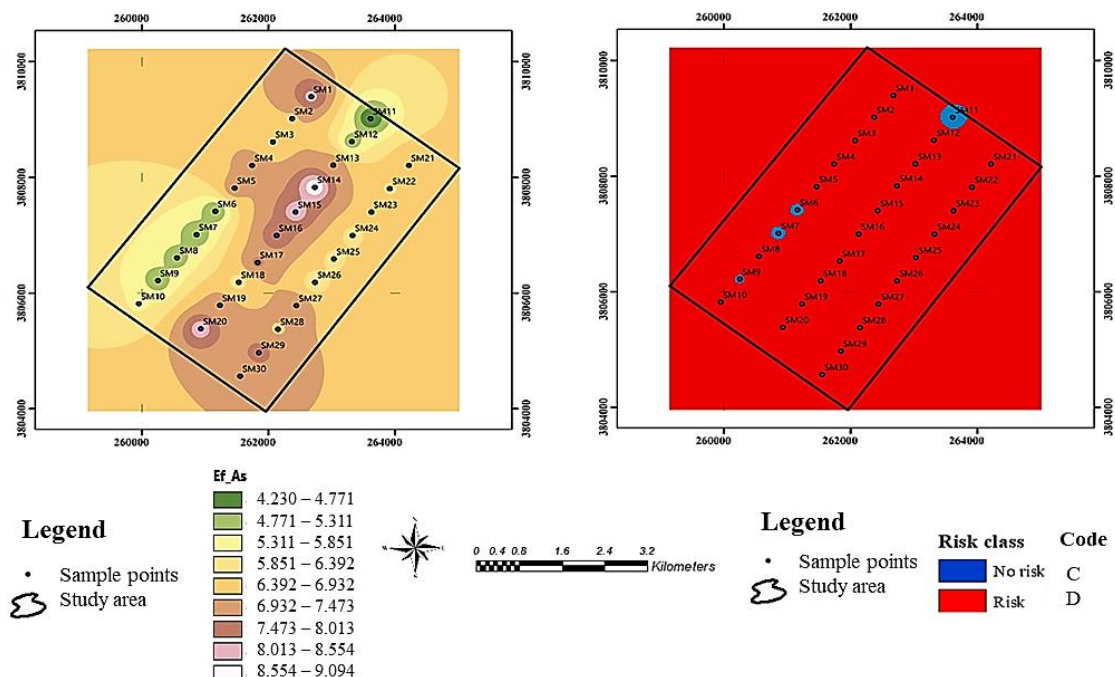
شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی بار آلودگی در مناطق مجاور معدن

Figure 4- Pollution load zoning map in the adjacent area's mine



شکل ۵- میانگین فاکتور غنی‌شدگی در مناطق مجاور (گروه آزمایش) و شاهد (گروه کنترل)

Figure 5- The average enrichment factor in the adjacent (experiment group) and witness (control group) areas



شکل ۶- نقشه پهنه بندی میانگین فاکتور غنی سازی عنصر آرسنیک در منطقه مجاور معدن

Figure 6- Zoning map of the average enrichment factor of the arsenic element in the adjacent area's mine

پدیده بیابان زایی می شود را فراهم کند (Samuel and Christiana, 2012; Das, 2014).

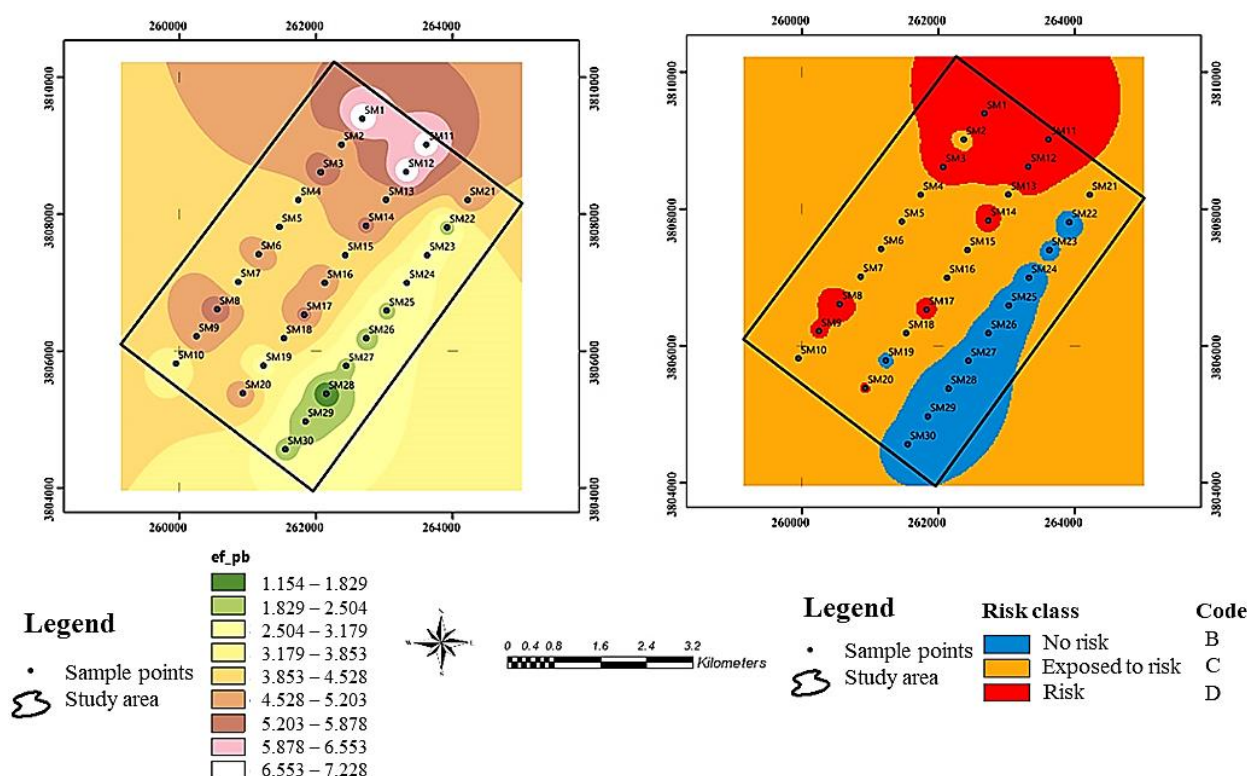
از بررسی تمامی شاخص های آلودگی استفاده شده در این تحقیق (Sutherland, 2000; Hankason, 1980)، همچنین همبستگی مثبت و بسیار قوی بین مس و نیکل می توان نتیجه گرفت که مقدار مس و نیکل در محدوده استاندارد مقدار زمینه آنها قرار دارد و حضور این دو عنصر در خاک منطقه بیشتر تحت تأثیر عوامل طبیعی و زمین زاد است.

نتیجه گیری

این مطالعه در پیوند با مسأله آلودگی های محیط زیست به عنوان یکی از شاخص ها و معیارهای تخریب خاک و توسعه بیابان زایی انجام شد. نتایج بدست آمده از آنالیز نمونه های خاک و شاخص های آلودگی در دو منطقه شاهد و مجاور معدن سنگ آهن سنگان شهرستان خواف نشان داد که وجود سایت های صنعتی و معدنی سنگ آهن (عبور ماشین آلات حمل و نقل سنگ آهن، وجود سنگ شکن، گودبرداری بی رویه ی شرکت های خصوصی از منطقه و غربال کردن خاک برای دستیابی به منافع بیشتر) در منطقه مورد مطالعه و انتشار ضایعات و باطله های آن توسط بادهای فصلی و محلی از جمله دلایل اصلی افزایش غلظت آلاینده های فلزی در خاک های این منطقه بوده است.

در شکل ۶ نقشه پهنه بندی غنی شدگی خاک برای عنصر آرسنیک در منطقه مجاور معدن نشان داده شده است. طبق نقشه پهنه بندی، غنی شدگی خاک برای عنصر آرسنیک به غیر از چندین نقطه غنی شدگی متوسط (کد C)، در کلیه منطقه غنی شدگی قابل ملاحظه (کد D) را نشان داد که بر اساس طبقه بندی ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2007) زمانی که مقدار EF بیشتر از ۱/۵ است، خود غنی سازی را می توان به انسان زایی نسبت داد و همچنین با توجه به مواد استخراج شده از معادن و فراوانی آن در خاک های اطراف منطقه مورد مطالعه نشان از منشأ آنتروپوژنیک (فعالیت معدنی) آن دارد.

در شکل ۷ نقشه پهنه بندی غنی شدگی خاک برای عنصر سرب در منطقه مجاور نشان داده شده است طبق نقشه پهنه بندی، غنی شدگی خاک برای عنصر سرب در رده غنی شدگی اندک (کد B)، غنی شدگی متوسط (کد C) و غنی شدگی نسبتاً شدید (کد D) می باشد. شمال منطقه و قسمتی از جنوب غربی منطقه غنی شدگی نسبتاً شدید (کد D) را نشان داد. در قسمت جنوب شرقی غنی شدگی اندک (کد B) و در سایر نقاط منطقه مجاور معدن غنی شدگی متوسط (کد C) نمایان است. غنی سازی (تجمع) این عنصر با توجه به فعالیت های معدنی منطقه مورد مطالعه قابل انتظار است. استخراج منابع و فعالیت های معدنی ممکن است منجر به انتشار، جابه جایی و تجمع (غنی شدگی) فلزات اطراف معادن شود و توزیع ژئوشیمیایی فلزات سنگین را بیش از منابع سنگ زایی تغییر دهد و همچنین زمینه را برای تخریب و کاهش کیفیت خاک به مرور در آینده که در نهایت منجر به



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی میانگین شاخص فاکتور غنی سازی عنصر سرب در منطقه مجاور معدن

Figure 7- Zoning map of the average enrichment factor index of the lead element in the adjacent area's mine

تحلیل مکانی به درستی نشان داد. تحلیل مکانی داده‌ها و ارزیابی ریسک خطر هریک از عناصر از نقاط قوت این پژوهش نسبت به دیگر مطالعات انجام شده می‌باشد. در منطقه مجاور معدن نمونه‌هایی که مسافت نزدیکی به مناطق معدنی دارند، دارای بارآلودگی قابل توجه بوده که نشان دهنده تخریب خاک در این مناطق است. برای حفظ سلامت و اکوسیستم منطقه و جلوگیری از آلودگی و تخریب خاک و همچنین توسعه پدیده بیابان‌زایی ناشی از آن، جلوگیری از ورود فلزات به چرخه زیستی، رفع آلودگی‌های صنعتی با اجرای برنامه‌های بلند مدت و روش‌های کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست ضروری به نظر است.

با توجه به محدودیت‌های زمانی و مالی در این پژوهش و سمیت عناصر سنگین به ویژه سرب توصیه می‌شود، مطالعات بیشتری به منظور بررسی شدت تخریب خاک در اطراف مناطق معدنی، نرخ شدت فرسایش خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد و همچنین بررسی ریزگردها در منطقه جهت تعیین آلودگی به عناصر سنگین و پتانسیل توسعه بیماری‌های زیستی و بهداشتی همچون بیماری‌های ریوی، گوارشی، چشمی و ... در مناطق اطراف معدن انجام شود.

خاک مناطق مجاور معدن، آلوده به عنصر سرب گزارش شد که با توجه به بالاتر بودن میانگین غلظت این عنصر نسبت به شیل (مقیاس جهانی، ضریب تغییرات بالا، مقادیر فاکتور آلودگی و غنی‌شدگی با منشأ آنتروپوژنیک (فعالیت‌های معدنکاری) کنترل می‌شود. با بررسی شاخص‌های آلودگی، حضور دو عنصر مس و نیکل در خاک منطقه مجاور معدن هیچگونه آلودگی را نشان ندادند که می‌توان آن را تحت تأثیر عوامل طبیعی و ساختار زمین‌شناختی منطقه دانست. مقدار فاکتور آلودگی و متوسط غلظت عنصر آرسنیک در آستانه حداکثر مقیاس جهانی قرار دارد و فاکتور غنی‌شدگی، حد قابل ملاحظه تا نسبتاً شدید را نشان داد. غنی‌شدگی آرسنیک را می‌توان به وجود کانی‌های سولفیدی از قبیل پیریت و اکسید پیریت در باطله معدنی و هوازدگی سنگ‌های منطقه و همچنین مورفولوژی بهم ریخته منطقه که باعث بهم‌ریختگی خاک شده، نسبت داد (در نتیجه فعالیت‌های معدن‌کاری). میانگین غلظت عنصر آهن در منطقه مجاور معدن به حد سمیت نرسیده اما با توجه به مقادیر به دست آمده از شاخص‌های آلودگی علاوه بر منشأ زمین‌شناسی به وضوح تحت تأثیر فعالیت صنعتی و معدنی قرار گرفته که احتمال بروز سمیت در آینده را هشدار می‌دهد. در این پژوهش استفاده از داده‌های زمینی و تحلیل آنها در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی، نقش کاربردی این نرم افزار را در

سپاسگزاری

لازم می‌دانیم از همکاری و حمایت تمام کسانی که به منت ما را در به سرانجام رساندن این پژوهش یاری نمودند کمال تشکر و سپاسگزاری را داشته باشیم. همچنین از همکاری و زحمات کارشناسان محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد نیز تشکر و قدردانی می‌شود.

این پژوهش ارائه نتایج بخشی از پایان نامه کارشناسی ارشد در گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد و با کد ۵۱۳۸۹ بوده است. لذا، بر خود

منابع

1. Adomako, D., Nyarko, B.J.B., Dampare, S.B., Serfor Armah, Y., Osae, S., Fianko, J.R., & Akaho, E.H. (2008). Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the Ashanti Region of Ghana". *Environmental Monitoring Assessment* 141: 165-175.
2. Aggarwal, C.C. (2017). *An Introduction to Outlier Analysis*. In: *Outlier Analysis*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3_1.
3. Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016). Soil erosion risk assessment using the CORINE model (Case study: Semiarid region in Golestan Province). *Desert Ecosystem Engineering Journal* 12(5): 63-78. (In Persian with English abstract)
4. Akbari, M., Jafari Shalamzari, M., Memarian, H., & Gholami, A. (2020a). Monitoring desertification processes using ecological indicators and providing management programs in arid regions of Iran. *Ecological Indicator* 111: 106011. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.106011>.
5. Akbari, M., Feyzi Koushki, F., Memarian, H., Azamirad, M., & Noughani, M. (2020b). Prioritizing effective indicators of desertification hazard using factor-cluster analysis, in arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13(8): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05296-9>.
6. Aluko, T.S., Njoku, K.L., Adesuyi, A.A., & Akinola, M.O. (2018). Health risk assessment of heavy metals in soil from the iron mines of Itakpe and Agbaja, Kogi State, Nigeria. *Pollution* 4(3): 527-538. <https://doi.org/10.22059/poll.2018.243543.330>.
7. Chen, F.W., & Liu, C.W. (2012). Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environment* 10: 209-222 <https://doi.org/10.1007/s10333-012-0319->.
8. Cochechi, R.M., Iano, I., Sârbu, C.N., Sorensen, A., Saghin, I., & Secăreanu, G. (2019). Assessing environmental fragility in a mining area for specific spatial planning purposes. *Moravian Geographical Reports* 27(3): 169-182. <https://doi.org/10.2478/mgr-2019-0013>.
9. Dabiri, R., Bakhshi Mazdeh, M., & Mollai, H. (2017). Heavy metal pollution and identification of their sources in soil over Sangan iron-mining region, NE Iran. *Journal of Mining & Environment* 8(2): 277-289. <https://doi.org/10.22044/jme.2016.820>.
10. Damian, G., Lanzerstorfer, C., Damian, F., & Lepure, G. (2018). Distribution of Heavy Metals and Minerals in the Various Size Fractions of Soil from Copșa Mică România. *Water, Air & Soil Pollution* 229: 202. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3862-6>.
11. Darwish, T., Khater, C., Jomaa, I., Stehouwer, R., Shaban, A., & Hamze, M. (2011). Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degradation & Development* 22: 345-358. <https://doi.org/10.1002/ldr.1011>.
12. Das, B. (2014). Environmental impact due to iron ore mining in Chhattisgarh. *Recent Research in Science and Technology* 6(1): 27-29.
13. Dashti Amirabad, J., Akhvan ghalibaf, M., & khodaparast, R. (2012). *The effect of sulphide tailings (pyrite) in desertification around mines and its role in soil contamination with heavy elements*. The first national desert conference science, technology and sustainable development. Tehran. (In Persian with English abstract)
14. FAO/UNEP. (2001). *Land Degradation Assessment in Dry land (LAND)*, United Nations Environment Program, Global Environment Facility (GEF). p.67
15. Feyzi Koushki, F., Akbari, M., Memarian, H., & Azamirad, M. (2019). Identifying and Ranking Important Factors of Desertification in Khorasan Razavi Province using Delphi Method, *Geography and Environmental Hazards* 8(31): 205-225. <https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.84127>.
16. Garavand, M., Ghasemi, H., & Hafezi Moghddas, N. (2012). Geochemical and Environmental Assessment of the Heavy Metals in the Soils Derived from the Gorgan Schists. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES* 8(22): 35-46.
17. Golmohammadi, A., Karimpour, M H., Haidarian Sahahri, M.R., Mazaheri, S.A., & Rahimi, B. (2017). Interpretation of the magnetic anomalies of the western mines of Sangan Ironstone using geology and borehole data. *Iranian Journal of Geophysics* 11(2): 87-109.

18. Golmohammadi, A., Karimpour, M.H., Malekzadeh Shafaroudi, A., & Mazaheri, S.A. (2015). Alteration mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangam iron skarn deposit, northeastern Iran. *Ore Geology Reviews* 65(2): 545–563. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.07.005>.
19. Haghparast, M., & Torshizian, H. (2019). Assessment of heavy metals concentrations and pollution in sediments of Almejogh Ophiolite Region (North-East of Iran). *Journal of Environmental Science and Technology* 21(4). (In Persian with English abstract)
20. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach, *Water Research* 14(8): 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
21. Hosseinniaee, S., Jafari, M., Tavili, A., & Zar, S. (2021). Geochemical and ecological assessment of some heavy metals in the soil around the lead and zinc mine in northwestern of Iran. Iran. *Journal of Health and Environment* 14(1): 159-172. (In Persian with English abstract)
22. Hubert, H., Akimpaya, B., & Bazimenye, J. (2019). Evaluation of soil contamination in mining area of RWANDA. *American Journal of Water Science and Engineering* 5(1): 9-15. <https://doi.org/10.11648/j.ajwse.20190501.12>.
23. Jorfi, S., Maleki, R., Jaafarzadeh, N., & Ahmadi, M. (2017). Pollution load index for heavy metals in Mian-Ab plain soil, Khuzestan, Iran. *Data in Brief* 15: 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.10.017>.
24. Khashtabeh, R., Akbari, M., Heydari, A., & Najafpoor, A. (2021). Investigation of changes in heavy metal concentrations and ecological indicators of soil pollution in the areas around Sangam Khaf mine and its effect on human health risk and increase soil degradation. M.Sc Thesis. Faculty of Natural Resources and Environment. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian with English abstract)
25. Khashtabeh, R., Akbari, M., Kolahi, A., & Talebanfard, A. (2020). Assessing the effects of desertification control projects using socio-economic indicators in the arid regions of eastern Iran. *Environment, Development and Sustainability* 23: 10455–10469. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-0106-6>.
26. Kowalska, J.B., Mazurek, R., Gasiorek, M., & Zaleski, T. (2018). Pollution indices as useful tools for the comprehensive evaluation of the degree of soil contamination—A review. *Environmental Geochemistry and Health* 40: 2395–2420. <https://doi.org/10.1007/s10653-018-0106-z>.
27. Mazhari, N. (2016). *Geology, mineralization, geochemistry, geochronology and isotope studies in eastern anomalies of Sangam mine, Khaf, Khorasan Razavi province*. Ph.D. Dissertation. Ferdowsi University of Mashhad Faculty of Sciences. 20-23
28. Mbaya, R.P. (2013). Land Degradation Due to mining: The gunda scenario. *International Journal of Geography and Geology* 2(12): 144-158. <https://doi.org/10.18488/journal.10/2013.2.12/10.12.144.158>.
29. Nikolaidis, C., Zafariadis, I., Mathioudakis, V., & Constantinidis, T. (2010). Heavy metal pollution associated with an abandoned Lead- Zinc Mine in the Kirki region, NE Greece. *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology* 85: 307-312. <https://doi.org/10.1007/s00128-010-0079-9>.
30. Rajeshkumar, S., Liu, Y., Zhang, X., Ravikumar, B., Bai, G., & Li, X. (2018). Studies on seasonal pollution of heavy metals in water, sediment, fish and oyster from the Meiliang Bay of Taihu Lake in China. *Chemosphere* 191: 626-638. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.078>.
31. Rakesh Sharma, M.S., & Raju, N.S. (2013). Correlation of Heavy Metal contamination with Soil properties of Industrial areas of Mysore, Karnataka, India by Cluster analysis. *International Research Journal of Environment Sciences* 2(10): 22-27.
32. Rastmanesh, F., Moore, F., Kharratikopaei, M., Keshavarzi, B., & Behrouz, M. (2010). Heavy metal enrichment of soil in Sarcheshmeh copper complex, Kerman, Iran. *Environmental Earth Sciences* 62(2): 329-336.
33. Ravankhah, N., Mirzaei, R., & Masoum, S. (2015). Evaluation of Geoaccumulation Index, Contamination Factor, and Principal Component Analysis for Estimating Soil contamination. *Iranian Journal of Health & Environment* 8(3). (In Persian with English abstract)
34. Rezaei-pour Baghdar, A., Vagarfard, H., Azimzadeh, H.R., Gholami, H., & Esmaeilpour, Y. (2015). Study of Pollution of Waste Water Caused by Iron Ore Processing in Desert Areas (Case Study: Bafgh Area). *Iranian Scientific Association of Desert Management and Control* 4: 14-25. (In Persian with English abstract)
35. Saadati, E. (2016). *Investigating the environmental effects of the extraction of placer iron ore mines in Sangam Khaf region on water and soil resources*. Master's thesis. Department of Geology - Environmental Geology. International Campus of Ferdowsi University of Mashhad.
36. Sahu, H B., & Dash, S. (2011). *Land Degradation due to Mining in India and its Mitigation Measures*. Second International Conference on Environmental Science and Technology, February 26-28, 2011, Singapore.
37. Salman, T. (2019). *Mapping the Distribution of Heavy Metals in Soils and Plants in Alluvial Plain of the Tigris River, Southern Baghdad*. Master's thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Basic Sciences, Department of Geology, 5:7.
38. Samuel, K., & Christiana, M.A.O. (2012). Heavy metal pollution around Itakpe mine, Kogi State, Nigeria. *International Journal of Physical Sciences* 7: 5062-5068.
39. Sanjari, M. (2017). *Determination of Heavy Elements and Environmental Pollution in the Area of Dardvey Iron*

- Mine. Master's thesis. Ferdowsi University of Mashhad, Faculty of Basic Sciences, Department of Geology. 64-65.
40. Shamsadin, H., Jalali, V., & Jafari, A. (2015). Application of multivariate statistical methods and environmental pollution indices in evaluation of distribution of heavy metals. *Journal of Water and Soil Resources Protection* 4(3). (In Persian with English abstract)
41. Shamsaddin, H., Jafari, A., Jalali, V., & Schulin, R. (2020). Spatial distribution of copper and other elements in the soils around the Sarcheshmeh copper smelter in southeastern Iran. *Atmospheric Pollution Research* 11(10): 1681-1691. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.07.002>.
42. Sistani, N., Moeinaddini, M., Khorasani, N., Hamidian, A.H., Taleshi, M.S., & Azimi Yancheshmeh, R. (2017). Heavy metal pollution in soils adjacent to Kerman steel industry: evaluation of metal richness and degree of pollution. *Iranian Journal of Health and Environment* 10(1): 75-86. (In Persian with English abstract)
43. Sutherland, R.A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology* 39(6): 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>.
44. Taylor, S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8): 1273-1285. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(64\)90129-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(64)90129-2).
45. Taylor, S.R., & McLennan, S.M. (1995). The geochemical evolution of the continental crust. *Advancing Earth and Space Science* 33(2): 241-265. <https://doi.org/10.1029/95RG00262>.
46. Tepanosyan, G., Sahakyan, L., Belyaeva, O., & Asmaryan, S.H. (2018). Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. *Science of The Total Environment* 639: 900-909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.211>.
47. Teplická, K., Khouri, S., Beer, M., & Rybárová, J. (2021). Evaluation of the Performance of Mining Processes after the Strategic Innovation for Sustainable Development. *Processes* 9: 1374. <https://doi.org/10.3390/pr9081374>.
48. Thomilson, D.C., Wilson, D.J., Harris, C.R., & Jeffrey, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunters* 33: 566-575. <https://doi.org/10.1007/BF02414780>.
49. Turekian, K.K., & Wedepohl, K.H. (1961). Distribution of elements in some major units of the earth crust. *The Geological Society of America* 72(2): 175-192. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175).
50. Wang, L., & Wu, J. (2008). Spatial variability of heavy metals in soils across a valley plain in Southeastern China. *Environmental Geology* 55(6): 1207-1217.
51. Wiel, H.J. (2003). *Determination of elements by ICP-AES and ICP-MS" (RIVM) Bilthoven*, The Netherlands. National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) 4-46.
52. Xiao, Y., Gu, X., & Yin, S. (2016). Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, Northwest China. *SpringerPlus* 5(425). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2073-0>.
53. Xiaoa, R., Wangc, S.H., Lia, R., Wangb, J.J., & Zhanga, Z. (2017). Soil heavy metal contamination and health risks associated with artisanal gold mining in Tongguan, Shaanxi, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 141: 17-24. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.002>.
54. Yang, P., Mao, R., Shao, H., & Gao, Y. (2009). An investigation on the distribution of eight hazardous heavy metals in the suburban farmland of China. *Journal of Hazardous Materials* 167(1): 1246-1251. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.127>.
55. Yongming, H., Peixuan, D., Junji, C., & Posmentier, E.S. (2006). Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment* 355(1-3): 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.026>.
56. Zanganeh, F., Heidari, A., Sepehr, A., & Rohani, A. (2022). Bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation of heavy metal contaminated soil by a synergistic effect of cyanobacteria inoculation, biochar, and purslane (*Portulaca oleracea* L.). *Environmental Science and Pollution Research* 29: 6040-6059. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16061-0>.
57. Zhang, X.Y., Feng, Y., Jing, T., Ouyang, X.Y., Liang, C., & Weiqi, C. (2007). Heavy metal contamination in western Xiamen Bay sediments and its vicinity, China Luoping. *Marine Pollution Bulletin* 54(7): 974-982.



The Effect of Wetting and Drying Cycles on Selected Physical Indicators of Biochar- and Rockwool-Based Growth Media

S. Shahmansouri¹, M.R. Mosaddeghi^{2*}, H. Shariatmadari³

Received: 13-11-2022

Revised: 03-01-2023

Accepted: 04-01-2023

Available Online: 04-01-2023

How to cite this article:

Shahmansouri, S., Mosaddeghi, M.R., & Shariatmadari, H. (2023). The Effect of Wetting and Drying Cycles on Selected Physical Indicators of Biochar- and Rockwool-Based Growth Media. *Journal of Water and Soil* 37(1): 95-112. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79577.1226>

Introduction

Monitoring the changes in physical and hydraulic properties and stability of growth media due to root growth effects and wetting and drying cycles is important. Wetting and drying cycles can probably change physical characteristics, availability of water, air and nutrients for the plant and, as a result, might affect the growth and yield of the greenhouse plants. The growth period greatly affects the physical characteristics of the growth substrates; therefore, the watering of growth substrates should be managed according to these changes to avoid improper irrigation.

Materials and Methods

In this study, 14 growth media were prepared from individual substrates with different volumetric ratios. In order to evaluate the changes of growth media over the time (i.e., during consecutive irrigation events) in the greenhouse, 10 wetting and drying cycles were applied on the growth media in the lab. Several physical indicators including easily available water (EAW), air after irrigation (AIR), water buffering capacity (WBC) and water holding capacity (WHC) of the growth media were determined before and after the wetting and drying cycles. Besides, the subsidence, decrease of mass and decomposition of the growth media were determined over the time. Total porosity (TP), bulk density (BD), particle density (PD), pH and electrical conductivity of the mixtures were measured as well.

Results and Discussion

The pH values in the growth media varied from 5.72 to 6.94. The maximum pH value was related to sawdust-sugarcane bagasse biochar produced at 300°C vermiculite-zeolite, and wheat straw-vermiculite substrates, and the minimum value was related to the cocopeat-perlite substrate. The values of EC in the growth media varied from 0.21 to 1.43 dS m⁻¹. The highest and lowest EC values among the growth substrates were related to date palm bunches-vermiculite-rockwool and rockwool (0.2)-perlite substrates, respectively. The bulk density (BD) values of the growth media varied in the range of 0.163–0.401 Mg m⁻³. The values of total porosity (TP) of the growth media varied in the range of 64.8–82.8%v/v. The highest TP was related to the cocopeat-perlite substrate. The TP values of most of the substrates were greater than 70%v/v. The average values of EAW in the growth substrates ranged from 0.123 to 0.272 cm³ cm⁻³. The highest EAW was related to the sawdust-sawdust biochar produced at 500 °C vermiculite-zeolite substrate. The application of wetting and drying cycles increased EAW in most of the growth media. Therefore, it can be stated that the time had a positive effect on the EAW in most of the growth media. The average values of AIR before and after the application of wetting and drying cycles for the growth media varied in the range of 0.063–0.240 cm³ cm⁻³. The highest value of this indicator was observed in the sawdust-date palm bunches biochar produced at 300°C vermiculite substrate. In all substrates (with the exception of the sawdust-sawdust biochar produced at 500°C vermiculite-zeolite), the AIR increased after wetting and drying

1, 2 and 3- Graduated M.Sc. and Professors, Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran, respectively.

(* - Corresponding Author Email: mosaddeghi@iut.ac.ir)

cycles. The range of WHC values before and after applying wetting and drying cycles was $0.453\text{--}0.699\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$. The highest WHC belonged to the wheat straw-vermiculite substrate. The WHC values of five growth media, including cocopeat-perlite, decreased due to the application of wetting and drying cycles, and the WHC values of nine growth media decreased. The most stable substrate after the wetting and drying cycles was rockwool-sawdust-vermiculite. The effect of time on the quantity of WBC was positive, so that with the application of wetting and drying cycles, the WBC values of most of the substrates increased. In all substrates, subsidence and dry weight reduction were observed after the wetting and drying cycles. These changes were low for the substrates with a high volumetric ratio of inorganic materials. The least change among the growth substrates in terms of decomposition (dry weight reduction) was related to the completely inorganic substrate rockwool (0.1)-perlite (%0.17). The most stable substrate in terms of subsidence after wetting and drying cycles was the rockwool-sawdust-vermiculite, which has a large volumetric ratio of individual inorganic substrates. The highest subsidence was observed in the substrates containing wheat straw (wheat straw-vermiculite and date palm bunches biochar produced at 300°C wheat straw-vermiculite). The organic matter content in all the growth substrates decreased over time (after wetting and drying cycles). The decrease of organic matter in the substrates can be related to the decomposition of organic materials as a result of wetting and drying cycles.

Conclusion

The BD, TP, EAW and WHC of the majority of growth media were in the optimal ranges and for some mixtures even better than cocopeat-perlite. Wetting and drying cycles could affect the growth media through several processes such as decomposition of organic compounds, displacement and rearrangement of particles, fragmentation of particles, shrinkage, hardening and subsidence. The growth media with a high percent of organic substrates were unstable as compared with those containing a high proportion of inorganic substrates. In general, the wetting and drying cycles increased the frequency of micropores in the growth media. The wetting and drying cycles positively affected EAW, WHC, AIR and WBC of most growth media. These findings imply that wetting and drying cycles may improve the growth media according to the studied extensive variables. However, it is necessary to study the intensive variables such as hydraulic conductivity, oxygen diffusion and pore tortuosity in the growth media for better evaluation of the impact of wetting and drying cycles as well.

Keywords: Air after irrigation, Easily available water, Growth medium, Water retention, Wetting and drying cycles

اثر دوره‌های تر و خشک‌شدن بر برخی شاخص‌های فیزیکی بسترهای رشد بر پایه بیوپار و پشم‌سنگ

شاهرخ شاهمنصوری^۱ - محمد رضا مصدقی^{۲*} - حسین شریعتمداری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴

چکیده

بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و پایداری بسترها در حین کشت گیاه به دلیل تغییراتی که در اثر رشد ریشه و دوره‌های تر و خشک شدن رخ می‌دهد، ضروری است. در این پژوهش ۱۴ بستر رشد ترکیبی با نسبت‌های مختلف حجمی از مواد جداگانه تهیه شدند. در ابتدا تخلخل کل (TP)، چگالی ظاهری (BD)، چگالی حقیقی (PD)، pH و رسانایی الکتریکی (EC) در بسترهای رشد اندازه‌گیری شده و در قالب طرح کاملاً تصادفی بررسی شد. به منظور بررسی تغییرات بسترهای رشد با گذشت زمان (آبیاری‌های متوالی) در کشت‌های گلخانه‌ای، ۱۰ دوره متوالی تر و خشک شدن (حدود ۸۰ روز) بر بسترهای رشد اعمال شد. پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن و پس از اعمال آخرین دوره، شاخص‌های متعدد فیزیکی و هیدرولیکی شامل آب به آسانی قابل دسترس (EAW)، گنجایش هوایی پس از آبیاری (AIR)، گنجایش بافری آب (WBC) و گنجایش نگهداشت آب (WHC) در بسترها تعیین شد. همچنین میزان نشست، در صد کاهش جرم و میزان تجزیه مواد آلی بسترها با گذشت زمان تعیین شد. این بخش آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده در زمان با طرح پایه کاملاً تصادفی تجزیه و تحلیل شد. مقادیر BD، TP، EAW و WHC در اکثر بسترهای رشد در دامنه‌های مطلوب بود و حتی در برخی از موارد از بستر کوکوپیت-پرلیت (به عنوان شاهد) بهتر بودند. اعمال دوره‌های تر و خشک شدن بر بسترهای رشد سبب تجزیه مواد آلی، به هم خوردگی و تغییر آرایش ذرات، خرد شدن ذرات آلی و معدنی، انقباض، سخت شدن و نشست آن‌ها شد. نتایج نشان داد بسترهای با مقدار قابل توجه مواد آلی ناپایدارتر از بسترهای معدنی یا غالباً معدنی بودند. به طور کلی اعمال دوره‌های تر و خشک شدن سبب افزایش معنی‌دار تخلخل و فراوانی منافذ ریز در بسترهای رشد شد. این دوره‌ها اثر مثبتی بر ویژگی‌های EAW، WHC، AIR و WBC اکثر بسترهای رشد داشته و سبب افزایش آن‌ها شد. این یافته بیانگر بهبود بسترهای رشد با گذشت زمان (دوره‌های تر و خشک شدن) بر اساس متغیرهای مقداری مذکور بود اگرچه برای ارزیابی بهتر، بررسی اثر این دوره‌ها بر متغیرهای شدتی مانند هدایت هیدرولیکی، پخشیدگی اکسیژن و اعوجاج منافذ در بسترهای رشد نیز ضروری است.

واژه‌های کلیدی: آب به آسانی قابل دسترس، بستر رشد، دوره‌های تر و خشک شدن، گنجایش نگهداشت آب، گنجایش هوایی پس از آبیاری

مقدمه

دوره‌های تر و خشک شدن رخ می‌دهد، کاملاً ضروری است. دوره‌های تر و خشک شدن احتمالاً می‌تواند منجر به تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، فراهمی آب، هوا و عناصر غذایی برای گیاه و در نتیجه، کاهش رشد و عملکرد گیاه و یا محصول شود. پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که دوره رشد تا حد زیادی بر ویژگی‌های فیزیکی بسترهای رشد تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین، باید در مدیریت آبیاری بسترهای رشد با

مدیریت آبیاری برای جلوگیری از خفگی ریشه، آبشویی عناصر غذایی، بیماری‌های گیاه در اثر آبیاری بیش از حد، کمبود آب و عناصر غذایی و سپس تنش فیزیولوژیک گیاه، در بسترهای کشت اهمیت حیاتی دارد. بنابراین، بررسی تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی بسترها در حین کشت گیاه به دلیل تغییراتی که در اثر رشد ریشه و

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد و استادان گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

(Email: mosaddeghi@iut.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

توجه به این تغییرات تجدید نظر شود تا از آبیاری نامناسب جلوگیری شود (Michel and Kerloch, 2017). کیفیت و پایداری بستر رشد مرتبط با ویژگی‌های فیزیکی آن مانند توزیع اندازه ذرات و منافذ بوده که بر ذخیره و تبادل آب و هوا اثر می‌گذارد. به طور کلی انتظار می‌رود کیفیت بسترهایی که برای رشد گیاه مناسب هستند، در اثر گذشت زمان به دلیل چندین فرآیند کاهش یابد. با گذشت زمان از کاربرد بستر رشد، ذخیره هوای بستر کاهش یافته که می‌تواند به دلیل خردشدن ذرات به اندازه‌های ریزتر (Bures et al., 1993)، تجزیه مواد آلی و جداسازی فیزیکی فیبرهای مواد آلی (Nash and Laiche, 1981) و انقباض و خشک شدن بسترها (Brückner, 1996) باشد؛ در نهایت این فرآیندها عموماً منجر به کاهش اندازه‌ی منافذ می‌شوند. با کاهش اندازه‌ی منافذ بسترهای رشد، تخلخل تهویه‌ای کاهش یافته و نگهداشت آب افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج دی‌بودت و وردانک (De Boodt and Verdonck, 1971)، مقدار تخلخل تهویه‌ای در بسترهای رشد، با گذشت زمان سه ماه از شروع آزمایش به کم‌تر از مقادیر بهینه برای رشد گیاه کاهش یافت. چون تخلخل تهویه‌ای کم با کاهش رشد گیاه همراه است، کاهش تخلخل تهویه‌ای و افزایش نگهداشت آب نشان‌دهنده زوال کیفیت بستر است.

میشل و کرلوچ (Michel and Kerloch, 2017) اثر دوره‌های تر و خشک شدن را بر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی چند بستر رشد بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دوره‌های تر و خشک شدن نقش اصلی در تغییر ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی بسترهای رشد ایفا می‌کنند. دوره‌های تر و خشک شدن علی‌رغم کاهش حجم بستر و اندازه منافذ، سبب بهبود نگهداشت و جریان آب و هوا به دلیل بهبود اتصال منافذ، بهبود جریان آب و هوا و کاهش اعوجاج منافذ بسترهای رشد در مقایسه با زمان ابتدایی، شدند. کرون و همکاران (Caron et al., 2010) نشان دادند که تخلخل تهویه‌ای بستر با گذشت زمان کاهش می‌یابد. این تغییر می‌تواند به دلیل تراکم، نشست^۱ بستر و بازآرایی ذرات در گلدان در اثر دوره‌های تر و خشک شدن باشد. آلایر و همکاران (Allaire-Leung et al., 1999) و کرلوچ و میشل (Kerloch and Michel, 2015) افزایش نگهداشت آب در مکش ماتریک ۱۰ hPa را در اثر دوره‌های تر و خشک شدن برای بسترهای رشد بر پایه پیت گزارش کردند، ولی مواد درشت مانند پوست درخت کاج، الیاف چوب و الیاف نارگیل تغییر قابل‌توجهی نداشتند.

تیورنن و همکاران (Turunen et al., 2019) پس از اعمال چهار دوره تر و خشک شدن بر بسترهای پیت ماس، پیت روشن و پیت تیره بیان کردند که ارتفاع همه بسترهای مورد بررسی در مکش ماتریک ۱۰۰ hPa، کاهش یافت. به طور میانگین، کاهش ارتفاع نمونه در پیت ماس، پیت روشن و پیت تیره به ترتیب ۳/۱، ۳/۹ و ۲/۵ درصد بود.

1- Subsidence

کاناوو و همکاران (Cannavo et al., 2011) اثر گذر زمان و آبیاری را بر بستر رشد پیت اسفگنوم بررسی کردند. آن‌ها این پژوهش را در دو بخش با کشت و بدون کشت گیاه، انجام دادند. در پایان آزمایش، نگهداشت آب در بسترهای با کشت و بدون کشت گیاه به ترتیب ۱/۲۷ و ۱/۱۹ برابر بیش‌تر از مقادیر اولیه آن‌ها بود. میشل و همکاران (Michel et al., 2011) دو بستر رشد پیت با اندازه ذرات ۱۰-۰ و ۴۰-۲۰ میلی‌متر زیر کشت را در گذر زمان مورد بررسی قرار دادند. پس از گذشت ۱۱۰ روز منافذ درشت کم و منافذ ریز زیاد شدند که نتیجه‌ی آن افزایش رطوبت اشباع و کاهش آب قابل دسترس و تخلخل تهویه‌ای برای هر دو بستر بود. همچنین صفادوست و همکاران (Safadoust et al., 2012) مشاهده کردند که اعمال دوره‌های تر و خشک شدن سبب ایجاد درز و ترک و افزایش رطوبت اشباع در خاک شد.

بیوچار ماده‌ای جامد، متخلخل و کربن‌دار است که در اثر فرآیند ترموشیمیایی مواد آلی در محیط بدون اکسیژن تولید می‌شود. از مانده‌های آلی مختلف مانند چوب، باقی‌مانده‌های سبزی، کودهای دامی و باقی‌مانده‌های کشاورزی می‌توان برای تولید بیوچار استفاده کرد (Abrishamkesh et al., 2015). ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بیوچار تولیدی به نوع ماده خام اولیه مورد استفاده برای تهیه بیوچار و شرایط پیرولیز (دمای پیرولیز، نرخ افزایش دما و زمان) بستگی دارد. به طور کلی، اغلب بیوچارها در برابر تجزیه شیمیایی و بیولوژیک مقاوم بوده و بنابراین برای ترسیب کربن مناسب هستند. استفاده از بیوچارها فرصتی مناسب برای افزایش پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی بسترهای رشد بدون خاک با جایگزینی مواد تجدیدناپذیر مانند پیت است (Massa et al., 2019). افزودن بیوچار با بافت ریز باعث افزایش نگهداشت آب بسترهای رشد می‌شود، در حالی که افزودن بیوچار با بافت درشت، مشابه با کارکرد پرلیت باعث افزایش زهکشی و هوادهی بسترها می‌شود. علاوه بر این، بیوچار مزایای دیگری مانند افزایش گنجایش تبادل کاتیونی (CEC) و بافر نمودن pH بسترهای رشد مخلوط بر پایه پیت اسیدی دارد. علی‌رغم تمام مزایای آن، بیوچار هنوز یک بستر رشد بهینه نیست و ویژگی‌های آن بسته به منبع آن متفاوت است (Banitalebi et al., 2021; Banitalebi et al., 2019; Nemati et al., 2015).

به طور کلی بسترهایی برتری دارند که ویژگی‌های آن‌ها با گذشت زمان پایدار مانده و امکان استفاده مجدد از آن‌ها در کشت‌های بعدی گلخانه‌ای فراهم گردد. از ویژگی‌های مهم بسترهای رشد، شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه است. بنابراین در این پژوهش اثر دوره‌های تر و خشک شدن بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در بسترهای رشد رایج گلخانه‌ای بررسی شد. پشم‌سنگ ماده‌ای خنثی و معمولاً از

نهایی شامل ۱۴ بستر ترکیبی به شرح زیر بودند (اعداد درون پرانتز نسبت حجمی هر ماده در بستر رشد ترکیبی را نشان می‌دهد):

- ۱) کوکوپیت (Cocopeat) (۰/۸) + پرلیت (Perlite) (۰/۲) (بستر شاهد)
 - ۲) پشم‌سنگ (RW) (۰/۱) + پرلیت (Perlite) (۰/۹)
 - ۳) پشم‌سنگ (RW) (۰/۲) + پرلیت (Perlite) (۰/۸)
 - ۴) کاه گندم (WS) (۰/۴) + ورمیکولیت (V) (۰/۶)
 - ۵) پوسته شلتوک برنج (Rh) (۰/۱) + بیوجار خوشه خرما دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (PlmB300) (۰/۱) + ورمیکولیت (V) (۰/۸)
 - ۶) بیوجار کاه گندم دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس (WSB500) (۰/۱) + پوسته شلتوک برنج (Rh) (۰/۴۵) + ورمیکولیت (V) (۰/۴۵)
 - ۷) خاک اره (Sd) (۰/۳) + بیوجار خاک اره دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس (SdB500) (۰/۳) + ورمیکولیت (V) (۰/۲) + زئولیت (Z) (۰/۲)
 - ۸) خاک اره (Sd) (۰/۴) + بیوجار خوشه خرما دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (PlmB300) (۰/۲) + ورمیکولیت (V) (۰/۴)
 - ۹) بیوجار خوشه خرما دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (PlmB300) (۰/۲) + کاه گندم (WS) (۰/۳) + ورمیکولیت (V) (۰/۵)
 - ۱۰) خوشه خرما (Plm) (۰/۴) + بیوجار خاک اره دمای ۵۰۰ درجه سلسیوس (SdB500) (۰/۲) + ورمیکولیت (V) (۰/۴)
 - ۱۱) خاک اره (Sd) (۰/۲) + بیوجار باگاس نیشکر دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس (SCB300) (۰/۲) + ورمیکولیت (V) (۰/۳) + زئولیت (Z) (۰/۳)
 - ۱۲) خوشه خرما (Plm) (۰/۴) + ورمیکولیت (V) (۰/۲) + پشم‌سنگ (RW) (۰/۴)
 - ۱۳) پشم‌سنگ (RW) (۰/۲) + خاک اره (Sd) (۰/۴) + ورمیکولیت (V) (۰/۴)
 - ۱۴) خوشه خرما (Plm) (۰/۴) + ورمیکولیت (V) (۰/۲) + کوکوپیت (Cocopeat) (۰/۴)
- مکان تهیه نمونه و اندازه ذرات اجزاء برای تهیه بسترهای رشد در جدول ۱ ارائه شده است.

اندازه‌گیری ویژگی‌های معمول بسترهای رشد

مقادیر pH و EC بسترهای رشد در عصاره نسبت حجمی ۱/۵: ۱ آب مقطر: بستر رشد و به کمک دستگاه‌های pH متر و EC متر اندازه‌گیری شد. برای این منظور ابتدا نمونه بستر رشد تحت مکش ماتریک ۳۲ hPa در دستگاه جعبه شن قرار داده شد و سپس درون دو سیلندر که بر روی یکدیگر قرار گرفته بودند، ریخته شد.

گرمادهی سنگ آذرین (اغلب بازالت) به دست آمده و در عایق کاری و صنایع مهندسی استفاده می‌شود. تخلخل این ماده زیاد بوده و چگونگی آبدهی آن مشابه شن (آبدهی سریع با کاهش پتانسیل ماتریک) است. از این ماده هم به صورت جدا و هم در ترکیب با بسترهای رشد دیگر می‌توان استفاده نمود (Deepagoda et al., 2013). پشم‌شیشه از ذوب کردن و تبدیل شیشه (کوارتز) به الیاف ریز تولید شده و مشابه پشم سنگ یک عایق بسیار خوب در برابر گرما و صوت است ولی از نظر اقتصادی کاربرد پشم‌سنگ در بسترهای رشد صرفه اقتصادی بیشتری دارد.

بر اساس آمار وزارت کشاورزی ایران (۱۴۰۱)، حدود ۵/۳ میلیون هکتار از زمین‌های کشور به کشت گندم اختصاص یافته است و سالانه مقادیر زیادی بقایای گندم (کاه گندم) بدون استفاده بهینه (مانند سوزاندن یا دفن کردن) از بین می‌رود. قیمت کاه گندم نسبت به مواد رایج در گلخانه‌ها مانند کوکوپیت که از کشورهای خارجی مانند هند و سریلانکا با قیمت زیاد وارد می‌شود بسیار کمتر است. علاوه بر کاه گندم، مقادیر زیادی خاک اره^۱، باگاس نیشکر^۲، پوسته شلتوک برنج^۳ و خوشه خرما^۴ در کشور تولید می‌شود. ارزیابی این پسماندها و بیوجار آن‌ها می‌تواند داده‌های خوبی برای تولیدکنندگان گلخانه فراهم کند تا برای ساخت و انتخاب بسترهای بهتر بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی تصمیم‌گیری نمایند (Banitalebi et al., 2019). تناسب این مواد به عنوان بستر رشد، پایداری ویژگی‌های آن‌ها در طول زمان و مقایسه آن‌ها با بستر رایج کوکوپیت-پرلیت در پژوهش حاضر مد نظر بوده است. مقایسه بسترهای رشد بر پایه بیوجار و پشم سنگ از نظر پایداری ویژگی‌های آن‌ها در برابر دوره‌های متناوب تر و خشک شدن از جنبه‌های نوآوری این پژوهش است که در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، هدف از انجام این پژوهش بررسی پایداری شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه ۱۴ بستر رشد بر پایه بیوجار و پشم‌سنگ پس از اعمال ده دوره تر و خشک شدن است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، چهارده بستر رشد ترکیبی (از جمله کوکوپیت-پرلیت به عنوان بستر شاهد) با نسبت‌های مختلف حجمی از مواد متفاوت تهیه شدند. از ۱۴ بستر رشد ترکیبی، ۹ بستر بر اساس پژوهش‌های بنی‌طالبی و همکاران (Banitalebi et al., 2019) و ۵ بستر اغلب حاوی پشم سنگ نیز با توجه به اهمیت کاربرد پشم سنگ تولید داخلی در کشت‌های بدون خاک، تهیه شدند. تیمارهای انتخابی

جدول ۱- مکان تهیه و اندازه ذرات مواد مورد استفاده

Table 1- Sampling location and particle size of the used substrates

ماده	اندازه ذرات	مکان تهیه نمونه
Substrate	Particle size (mm)	Sampling location
پشم سنگ	—	ایران، اصفهان
Rockwool		Iran, Isfahan
زئولیت	1-2	ایران، سمنان
Zeolite		Iran, Semnan
ورمیکولیت	3-5	ایران، یزد
Vermiculite		Iran, Yazd
پرلیت	< 4	ایران، اصفهان
Perlite		Iran, Isfahan
کوکوپیت	اندازه طبیعی	هند
Cocopeat	Natural size	India
خاک اره	< 2	ایران، اصفهان
Sawdust		Iran, Isfahan
باگاس نیشکر	< 2	ایران، خوزستان
Sugarcane bagasse		Iran, Khuzestan
خوشه خرما	< 2	ایران، خوزستان
Date palm bunches		Iran, Khuzestan
پوسته شلتوک برنج	< 2	ایران، گیلان
Rice hull		Iran, Gilan
کاه گندم	< 2	ایران، اصفهان
Wheat straw		Iran, Isfahan

$$BD = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

چگالی حقیقی (PD) همه بسترها با روش نفت سفید^۱ اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه آون-خشک وزن شده، در درون پیکنومتر ریخته شده و حجم مواد خشک‌شده با استفاده از جابجایی حجم توسط نفت سفید تعیین شد (Gupta et al., 2002). تخلخل کل (TP) بسترهای رشد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بر بسترهای رشد و اندازه‌گیری شاخص‌های فیزیکی آن‌ها

به منظور بررسی تغییرات بسترهای رشد با زمان (آبیاری‌های متوالی) در کشت‌های گلخانه‌ای، ۱۰ دوره متوالی تر و خشک‌شدن (به مدت حدود ۸۰ روز) بر بسترهای رشد اعمال شد. ابتدا نمونه‌های بستر در سیلندرهای استیل با قطر ۵/۳ سانتی‌متر و ارتفاع ۴/۵ سانتی‌متر ریخته شده و به منظور جلوگیری از حبس حباب‌های هوا از زیر اشباع شدند. سپس نمونه‌ها در مکش ماتریک ۳۲ hPa در دستگاه جعبه شن قرار گرفته و پس از رسیدن به تعادل در این مکش، تحت فشار محوری محصور ۲۰۰ hPa قرار گرفته و نمونه‌ها مجدداً از کف اشباع

ارتفاع و قطر سیلندر پایینی به ترتیب ۴/۵ و ۵/۳ سانتی‌متر (حجم تقریباً ۱۰۰ سانتی‌متر مکعب) بود. مواد ریخته‌شده به مدت ۱۰ ثانیه تحت فشار محوری ۱۰۰ hPa فشرده شد، سپس به کمک یک تیغ تیز مواد در سیلندر رویی از سیلندر زیری جدا شد و محتوای سیلندر زیری با ۱/۵ برابر حجم این سیلندر با آب در یک ظرف آزمایشگاهی با حجم ۵۰۰ میلی‌لیتر ترکیب شد و به مدت ۱۵ دقیقه بر روی دستگاه شیکر قرار داده شد. در نهایت اجازه داده شد تا سوسپانسیون به مدت یک ساعت بر روی یک سطح صاف در حالت سکون قرار گیرد. سپس سوسپانسیون حاصله با کاغذ صافی صاف شده و مقادیر EC و pH آن اندازه‌گیری شد (Raviv and Lieth, 2008).

چگالی ظاهری (BD) بسترهای رشد با استفاده از یک ظرف با حجم یک لیتر و نسبت ارتفاع به قطر بین ۱۰/۹ : ۱ تا ۱ : ۱ اندازه‌گیری شد. نمونه‌های بستر در یک سیلندر استیل قرار داده شده و با استفاده از دستگاه تک‌محوری تحت فشار محوری محصور برابر ۹ hPa بارگذاری شدند (Raviv and Lieth, 2008). پس از متراکم نمودن نمونه‌ها، حجم آن‌ها محاسبه شده و از نسبت جرم (M_s) به حجم نمونه (V_t) مقدار چگالی ظاهری (BD) از رابطه زیر محاسبه شد:

اندازه‌گیری درصد ماده آلی (OM) و نشست بسترهای رشد

درصد ماده آلی از طریق سوزاندن یک گرم نمونه آون-خشک بستر رشد در کوره با دمای ۵۴۰ درجه سلسیوس و از رابطه زیر محاسبه شد (Abad et al., 2002):

$$\text{جرم خاکستر} - \text{جرم نمونه آون خشک} \\ \text{جرم نمونه آون خشک} \times 100 = (\%) \text{ ماده آلی} \quad (7)$$

میزان نشست یا کاهش طول نسبی (ε_a) بسترهای رشد با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Raviv and Lieth, 2008):

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \quad (8)$$

که در این رابطه ΔL کاهش طول نمونه آون-خشک پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن و L_0 و L به ترتیب طول نمونه آون-خشک پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن است.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

از نرم‌افزار SAS 9.6 برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. در این پژوهش از طرح کاملاً تصادفی برای بررسی اثر نوع بستر رشد (۱۴ سطح) بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی عمومی با سه تکرار استفاده شد. همچنین از طرح مرکب کرت‌های خرد شده در زمان در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی برای بررسی اثر نوع بستر رشد (۱۴ سطح) و زمان (۲ سطح) شامل پیش و پس از دوره‌های تر و خشک شدن بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه بسترهای رشد با سه تکرار استفاده شد. مقایسه میانگین‌ها به روش LSD در سطح احتمال ۵ درصد انجام گرفت. رسم نمودارهای مورد نیاز با استفاده از نرم‌افزارهای MS Excel و SigmaPlot 12.3 انجام شد.

نتایج و بحث

ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بسترهای رشد

در جدول ۲ نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در بسترهای رشد، ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تمامی ویژگی‌های معمول اندازه‌گیری شده بین بسترهای رشد تفاوت معنی‌دار دارند ($p < 0.01$).

شدند (Raviv and Lieth, 2008). در هر دوره تر-خشک شدن، ابتدا نمونه‌ها در دستگاه جعبه شن^۱ تحت مکش ماتریک صفر (مسیر تر شدن) قرار داده شد تا رطوبت آن‌ها به اشباع برسد. سپس نمونه‌ها تحت مکش ماتریک ۱۰۰ hPa (مسیر خشک شدن) قرار گرفتند. این مراحل برای ۱۰ دوره متوالی تکرار شد. پس از اعمال ۱۰ دوره تر و خشک شدن، نمونه‌ها در آون و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس قرار گرفته و میزان کاهش ارتفاع نمونه‌های بستر با کولیس اندازه‌گیری شد. پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن و پس از اعمال آخرین (دهمین) دوره، شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در بسترهای رشد محاسبه شد. میزان نشست نسبی، کاهش جرم نسبی بسترها و میزان تجزیه مواد آلی آن‌ها با اندازه‌گیری مقدار ماده آلی تعیین شد. همچنین پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بسترهای رشد شامل تخلخل کل، تخلخل تهویه‌ای، چگالی ظاهری، چگالی حقیقی، pH و EC در سه تکرار اندازه‌گیری شد.

$$TP = 1 - \frac{BD}{PD} \quad (2)$$

پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن، نگهداشت رطوبت بسترهای رشد در مکش‌های ماتریک ۰، ۱۰ و ۵۰ hPa با دستگاه جعبه شن و در مکش ماتریک ۱۰۰ hPa با دستگاه صفحه فشاری اندازه‌گیری شد (Raviv and Lieth, 2008). سپس در صد حجمی گنجایش هوایی پس از آبیاری (AIR)^۲، آب به آسانی قابل دسترس (EAW)^۳ و گنجایش بافری آب (WBC)^۴ با روابط زیر محاسبه شد. در این تعاریف، AIR بیانگر تفاضل بین رطوبت اشباع و مقدار رطوبت در مکش ماتریک ۱۰ hPa، EAW، بیانگر مقدار آب آزاد شده از بستر رشد در دامنه‌ی مکش ماتریک ۱۰ تا ۵۰ hPa (معمولاً حدود ۷۵-۹۰٪ مقدار کل آب قابل دسترس)، WBC برابر با مقدار آب آزاد شده از بستر در دامنه‌ی مکش ماتریک ۵۰ تا ۱۰۰ hPa و WHC گنجایش نگهداشت آب^۵ در مکش ماتریک ۱۰ hPa است (De Boodt and Verdonck, 1971):

$$AIR = \theta_0 - \theta_{10} \quad (3)$$

$$EAW = \theta_{10} - \theta_{50} \quad (4)$$

$$WBC = \theta_{50} - \theta_{100} \quad (5)$$

$$WHC = \theta_{10} \quad (6)$$

که در این روابط θ_0 ، θ_{10} ، θ_{50} و θ_{100} به ترتیب بیانگر مقادیر رطوبت در مکش‌های ماتریک صفر (رطوبت اشباع)، ۱۰، ۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال بر حسب $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ هستند.

4- Water buffering capacity

5- Water holding capacity

1- Sandbox

2- Air after irrigation

3- Easily available water

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در بسترهای رشد

Table 2- Results of analysis of variance for physical and chemical properties in the growth media

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares				
		pH	EC	BD	PD	TP
بستر رشد Growth medium	13	0.37**	0.30**	0.014**	0.173**	84.18**
خطا Error	28	0.04	0.0007	0.00004	0.0019	2.015
ضریب تغییرات CV (%)	-	3.54	21.6	2.98	4.96	1.92

** بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است؛ EC: رسانایی الکتریکی، BD: چگالی ظاهری، PD: چگالی حقیقی، TP: تخلخل کل.

** stands for significant effect in the probability level of 0.01; EC: electrical conductivity, BD: bulk density, PD: particle density, TP: total porosity.

۶ است (Awang et al., 2009). بنابراین استفاده از بسترهای رشد مورد بررسی برای کشت، از نظر pH محدودیتی ایجاد نمی‌کند. با این حال گلخانه‌داران pH بسترهای رشد را در هنگام استفاده با تنظیم pH محلول غذایی کنترل می‌کنند.

مقادیر EC در بسترهای رشد در دامنه ۰/۴۳-۰/۲۱ dS/m متغیر بود. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر EC در بین بسترهای رشد به ترتیب مربوط به بسترهای Plm-V-RW و RW(0.2)-Perlite بود. برای بسترهای رشد مقدار EC بهینه در محدوده ۰/۴-۰/۵ dS/m گزارش شده است (Awang et al., 2009).

مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بین بسترهای رشد در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر pH در بسترهای رشد در دامنه ۵/۷۲-۶/۹۴ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار pH به ترتیب مربوط به بسترهای WS-V و Sd-SCB300-V-Z و کم‌ترین مقدار مربوط به بستر Cocopeat-Perlite بود (جدول ۳) که با نتایج بنی‌طالی و همکاران (Banitalebi et al., 2021) هم‌خوانی دارد. مقادیر pH نسبتاً زیاد بسترهای رشد حاوی بیوچار به دلیل ماهیت قلیایی بیوچارهای تولید شده می‌تواند باشد که توسط سایر پژوهشگران از جمله بنی‌طالی و همکاران (Banitalebi et al., 2021; Banitalebi et al., 2019) نیز گزارش شده است. مقادیر بهینه pH بسترهای رشد برای جذب عناصر غذایی مورد نیاز گیاه در حدود

جدول ۳- مقایسه میانگین ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی بین بسترهای رشد

Table 3- Means' comparisons of physical and chemical properties among the growth medium

بستر رشد Growth medium	ویژگی‌ها Properties							
	pH (-)	EC (dS m ⁻¹)	BD (Mg m ⁻³)	PD (Mg m ⁻³)	TP (% v/v)			
Cocopeat-Perlite	5.73 e	0.43 g	0.166 h	0.973 c	82.8 a			
RW(0.1)-Perlite	6.45 b	0.28 j	0.163 h	0.464 j	64.8 j			
RW(0.2)-Perlite	6.57 b	0.21 k	0.178 fg	0.576 i	69.0 hi			
WS-V	6.93 a	0.70 d	0.183 f	0.900 de	79.6 b			
Rh-PlmB300-V	6.54 b	0.53 f	0.196 de	0.759 gh	74.1 g			
WSB500-Rh-V	6.48 b	0.44 g	0.168 gh	0.714 h	76.5 ef			
Sd-SdB500-V-Z	6.58 b	0.33 i	0.333 b	1.156 b	71.2 h			
Sd-PlmB300-V	6.37 bc	0.62 e	0.179 fg	0.848 ef	79.0 cd			
PlmB300-WS-V	6.66 ab	0.82 b	0.181 f	0.724 h	75.0 fg			
Plm-SdB500-V	6.58 b	0.75 c	0.188 ef	0.812 fg	76.8 def			
Sd-SCB300-V-Z	6.95 a	0.32 ij	0.401 a	1.251 a	67.9 i			
Plm-V-RW	6.47 b	1.43 a	0.235 c	1.298 a	81.8 ab			
RW-Sd-V	6.07 dc	0.39 h	0.196 de	0.769 gh	74.4 fg			
Plm-V-Cocopeat	5.85 de	0.79 b	0.204 d	0.921 cd	77.8 cde			

حروف متفاوت در هر ستون بیانگر تفاوت معنی‌دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است؛ EC: رسانایی الکتریکی، BD: چگالی ظاهری، PD: چگالی حقیقی، TP: تخلخل کل.

In each column, different letters indicate significant difference according to LSD test at the probability level of 0.05; EC: electrical conductivity, BD: bulk density, PD: particle density, TP: total porosity.

Cocopeat-Perlite بود. مقادیر TP اکثر بسترها از ۷۰ درصد حجمی بیش‌تر بوده (جدول ۳) که با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (Banitalebi *et al.*, 2021) همخوانی دارد. در بررسی این پژوهشگران بیش‌ترین مقدار TP مربوط به بستر Cocopeat-Perlite و مقادیر TP اکثر بسترهای رشد از ۷۰ درصد حجمی بیش‌تر بود. در پژوهش بنی‌طالبی و همکاران (Banitalebi *et al.*, 2019) در مورد بسترهای منفرد، اکثر بسترهای معدنی نسبت به بسترهای آلی و بیوجارهای تولیدی از بقایای آلی مقادیر TP کم‌تری داشتند. در این پژوهش افزودن بیوجارهای تولیدشده به بسترهای معدنی سبب افزایش TP بسترهای رشد ترکیبی شده است (جدول ۳).

اثر دوره‌های تر و خشک شدن بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه بسترهای رشد

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر بستر رشد، زمان (دوره‌های تر و خشک شدن) و برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه در سطح آماری ۰/۰۱ معنی‌دار شد (جدول ۴، $p < 0.01$). در جداول ۵ و ۶ مقایسه میانگین اثر تیمارهای مورد بررسی بر چهار شاخص EAW، WHC، AIR و WBC ارائه شده است. مقادیر میانگین EAW در بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه ۰/۱۲۳ تا $0.272 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار EAW مربوط به بستر Sd-SdB500-V-Z بوده در حالی که این بستر دارای گنجایش بافری آب (WBC) کمی بود ($0.038 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). کم‌ترین مقدار EAW مربوط به بستر RW(0.1)-Perlite بود که می‌توان آن را به تخلخل کم این بستر نسبت داد. به دلیل توزیع اندازه‌ی ذرات متفاوت بیوجار و سایر بسترهای منفرد مورد استفاده در تهیه بسترهای ترکیبی، ترکیب بیوجار با سایر مواد آثار متفاوتی بر ویژگی‌های فیزیکی بسترهای رشد می‌گذارد. ذرات با اندازه‌ی مختلف بر توزیع اندازه‌ی منافذ اثر گذاشته و بسته به مقدار رطوبت بر تعادل و فراهمی آب و هوای بسترهای رشد اثر می‌گذارد (Huang and Gu, 2019).

نتایج مقایسه میانگین اثر زمان و برهمکنش بستر رشد و زمان بر مقادیر EAW در جدول ۵ ارائه شده است. با گذشت زمان، میانگین شاخص EAW نسبت به پیش از اعمال دوره‌ها، تفاوت معنی‌دار داشت. به طور کلی دوره‌های تر و خشک شدن سبب افزایش معنی‌دار EAW در بسترهای رشد شده است که به تغییر توزیع اندازه‌ی ذرات و منافذ ارتباط داده می‌شود. افزایش در مقادیر EAW برای اکثر بسترهای رشد همراه با افزایش در مقدار گنجایش نگهداشت آب (WHC) آن‌ها بوده است (جداول ۵ و ۶).

علت EC زیاد بستر Plm-V-RW نسبت به سایر بسترهای رشد مورد بررسی، احتمالاً کاربرد نسبت حجمی زیاد از خوشه خرما در این بستر است زیرا خوشه خرما از مناطقی با خاک نسبتاً شور نمونه‌برداری شد (جدول ۱). در این پژوهش، مقادیر EC همه‌ی بسترهای رشد مورد بررسی کم‌تر از $1/5 \text{ dS/m}$ بوده (جدول ۳) که از لحاظ شوری برای استفاده از بسترها محدودیتی ایجاد نمی‌کند (Awang *et al.*, 2009).

مقادیر چگالی ظاهری (BD) بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه $0.163 - 0.401 \text{ Mg m}^{-3}$ متغیر بود. به طور کلی بیوجار ماده‌ی سبکی است و افزودن آن به بسترها باعث کاهش BD بسترها می‌شود (Banitalebi *et al.*, 2021; Banitalebi *et al.*, 2019; Brewer *et al.*, 2014). بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر BD در بین بسترهای رشد مورد بررسی به ترتیب مربوط به بسترهای Sd-SCB300-V-Z و RW(0.1)-Perlite بود (جدول ۳). وجود نسبت‌های حجمی زیاد از زئولیت و ورمی‌کولیت در بستر Sd-SCB300-V-Z باعث افزایش BD این بستر شده است. همچنین وجود مقدار زیاد (۹۰ درصد حجمی) پرلیت با وزن سبک در بستر RW(0.1)-Perlite باعث BD کم این بستر شده است. مقادیر BD بسترهای آلی در دامنه ۰/۰۵ تا 0.30 Mg m^{-3} گزارش شده است (Raviv *et al.*, 1999). بسیاری از تولیدکنندگان بسترهای رشد تمایل دارند بسترهایی با BD کم‌تر از 0.3 Mg m^{-3} تولید کنند (Cattivello, 2011). تمامی بسترهای رشد مورد بررسی به جز Sd-SdB500-V-Z و Sd-SCB300-V-Z دارای BD کم‌تر از 0.3 Mg m^{-3} بودند (جدول ۳). چگالی ظاهری کم بسترهای رشد گلخانه‌ای می‌تواند از تهویه ضعیف بستر در زمان آبیاری جلوگیری کند. علاوه بر این جابه‌جایی بسترهای رشد سبک آسان‌تر است. هرچند که مقادیر بسیار کم BD بستر رشد نیز مطلوب نبوده و نمی‌تواند حمایت مکانیکی لازم و مکان استقرار مناسبی برای گیاه فراهم کند.

مقادیر چگالی حقیقی (PD) بسترهای رشد مورد بررسی بین 0.464 تا $1/298 \text{ Mg m}^{-3}$ متغیر بوده که به ترتیب مربوط به بسترهای RW(0.1)-Perlite و Plm-V-RW بود (جدول ۳). به طور کلی ترکیبات آلی سبک‌تر از ترکیبات معدنی‌اند (Banitalebi *et al.*, 2021; Banitalebi *et al.*, 2019). بیش‌ترین مقادیر PD مربوط به بسترهایی بود که نسبت حجمی زیادی از ترکیبات معدنی داشتند (جدول ۳) که با یافته‌های بنی‌طالبی و همکاران (Banitalebi *et al.*, 2021) همخوانی دارد؛ آن‌ها بیش‌ترین مقادیر PD را برای بسترهایی با مقدار زیاد ورمیکولیت و زئولیت گزارش کردند.

مقادیر تخلخل کل (TP) بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه $64/8 - 82/8$ درصد حجمی متغیر بود. بیش‌ترین TP مربوط به بستر

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس اثر بستر رشد، زمان و اثر برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه

Table 4- Results of analysis of variance for the effect of the growth medium, time, and their interaction on water retention and aeration indicators

منابع تغییر Source of variation	درجه آزادی Df	میانگین مربعات Mean squares			
		EAW	WHC	AIR	WBC
بستر رشد Growth medium	13	0.012**	0.028**	0.014**	0.0029**
تکرار (بستر رشد) Replication (Growth medium)	28	0.0001	0.0007	0.0001	0.00005
زمان Time	1	0.0019**	0.003**	0.03**	0.0016**
زمان × بستر رشد Time × Growth medium	13	0.0009**	0.0014**	0.0018**	0.0003**
خطا Error	28	0.00007	0.00013	0.00007	0.00001
ضریب تغییرات CV (%)	-	4.09	1.85	6.91	6.81

** بیانگر اثر معنی‌دار در سطح احتمال ۰/۰۱ است؛ EAW: آب به آسانی قابل دسترس، WHC: گنجایش نگهداشت آب، AIR: گنجایش هوایی پس از آبیاری، WBC: گنجایش بافری آب.

** stands for significant effect in the probability level of 0.01; EAW: easily available water, WHC: water holding capacity, AIR: air after irrigation, WBC: water buffering capacity.

از بین ۱۴ بستر مورد بررسی مقادیر میانگین EAW شش بستر رشد در این دامنه نبودند (جدول ۳). مقدار EAW بسترهای Sd-SdB500-WS-V، V-Z و Rh-PlmB300-V بیش‌تر از حد بهینه (0.24 cm^3) بود. مقدار EAW پنج بستر ترکیبی در دامنه $0.24 - 0.20 \text{ cm}^3$ قرار داشت. مقدار EAW برای سه بستر از جمله کوکوپیت-پرایت در دامنه $0.20 - 0.16 \text{ cm}^3$ بود. اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن در اکثر بسترهای رشد باعث افزایش EAW شده است (جدول ۵). با توجه به این موضوع می‌توان بیان نمود که گذشت زمان اثر مثبتی بر کمیت EAW در اکثر بسترهای رشد داشت که با افزایش فراوانی منافذ متوسط و ریز مرتبط است. مقدار AIR به شمار زیادی از عوامل مانند اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر رشد، اندازه گلدان و تعداد دفعات آبیاری وابسته است. مقدار بهینه AIR برای یک بستر رشد در دامنه $0.30 - 0.10 \text{ cm}^3$ قرار دارد (Raviv et al., 1999). مقادیر میانگین AIR برای بسترهای رشد مورد بررسی تفاوت معنی‌دار داشت (جدول ۵). مقادیر میانگین AIR پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن برای بسترهای رشد مورد بررسی در دامنه $0.24 - 0.06 \text{ cm}^3$ متغیر بود. بیش‌ترین مقدار این ویژگی در بستر Sd-PlmB300-V مشاهده شد. کاربرد ۴۰ درصد حجمی ورمیکولیت با بیوپار خوشه خرما دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس به دلیل اندازه ذرات درشت‌تر می‌تواند دلیلی بر تهویه بهتر این بستر باشد. به نظر می‌رسد بهبود تهویه می‌تواند در اثر افزایش فراوانی منافذ درشت ناشی از وجود ترکیبی با ذرات درشت‌تر (ورمی‌کولیت) باشد.

پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر EAW به ترتیب مربوط به بسترهای WS-V و Plm-V-Cocopeat بود. بستر WS-V دارای بیش‌ترین مقدار WHC در بین بسترهای رشد پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بود که علت آن می‌تواند منافذ ریز کاه گندم باشد. بستر Plm-V-Cocopeat دارای نسبت حجمی زیاد از خوشه خرما و کوکوپیت و مقدار کم‌تری ورمیکولیت در مقایسه با سایر بسترها بود. این مسئله باعث شده است که این بستر مقدار آب کم‌تری نسبت به سایر بسترها در دامنه مکش ماتریک ۵۰-۱۰ kPa از دست بدهد. بیش‌ترین افزایش در مقادیر EAW پس از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن مربوط به بسترهای Plm-V-Cocopeat و Plm-SdB500-V بود. این دو بستر شامل مقدار زیادی خوشه خرما بوده و افزایش منافذ ریز خوشه خرما می‌تواند دلیل این یافته باشد. بیش‌ترین کاهش مقادیر EAW در اثر دوره‌های تر و خشک‌شدن مربوط به بستر Cocopeat-Perlite بوده که با افزایش AIR همراه بود. احتمالاً کاهش منافذ ریز این بستر سبب کاهش مقدار EAW شده است. پایدارترین بستر رشد از نظر شاخص EAW، بستر رشد WSB500-Rh-V بود. پس از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بیش‌ترین مقدار EAW مربوط به بستر Sd-SdB500-V-Z بوده که همراه با بیش‌ترین کاهش مقدار AIR در این بستر در بین بسترهای رشد بود. به طور کلی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که زیاده‌بودن مقدار EAW منجر به کاهش مقدار AIR می‌شود (Banitalebi et al., 2021; Banitalebi et al., 2019).

راویو و همکاران (Raviv et al., 1999) بیان کردند، یک بستر رشد بهینه باید EAW در دامنه $0.30 - 0.20 \text{ cm}^3$ داشته باشد.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثر بستر رشد، زمان و برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های نگهداشت آب و تهویه (EAW و AIR)

Table 5- Means' comparisons of the effect of the growth medium, time, and their interaction on water retention and aeration indicators (EAW and AIR)

بستر رشد Growth medium	EAW (cm ³ cm ⁻³)						AIR (cm ³ cm ⁻³)					
	Before-D/W		After-D/W		میانگین Average		Before-D/W		After-D/W		میانگین Average	
Cocopeat-Perlite	0.186	kl	0.154	op	0.170	G	0.139	de	0.198	b	0.168	BC
RW(0.1)-Perlite	0.129	q	0.117	qr	0.123	I	0.089	jk	0.095	ij	0.092	E
RW(0.2)-Perlite	0.147	p	0.164	no	0.155	H	0.081	klm	0.086	j/m	0.083	E
WS-V	0.259	b	0.237	def	0.248	B	0.049	n	0.077	klm	0.063	E
Rh-PlmB300-V	0.249	bcd	0.232	efg	0.240	B	0.074	lm	0.105	hi	0.089	E
WSB500-Rh-V	0.224	gh	0.225	fg	0.225	CD	0.155	c	0.203	b	0.179	B
Sd-SdB500-V-Z	0.252	bc	0.292	a	0.272	A	0.113	gh	0.055	n	0.084	E
Sd-PlmB300-V	0.153	op	0.180	lm	0.167	GH	0.205	b	0.275	a	0.240	A
PlmB300-WS-V	0.197	jk	0.221	gh	0.209	E	0.082	j/m	0.133	fe	0.108	D
Plm-SdB500-V	0.170	mn	0.204	ij	0.187	F	0.086	jkl	0.137	de	0.112	D
Sd-SCB300-V-Z	0.199	ijk	0.212	hi	0.205	E	0.090	jk	0.142	cde	0.116	D
Plm-V-RW	0.244	cde	0.230	fg	0.237	BC	0.072	m	0.118	gh	0.095	E
RW-Sd-V	0.196	jk	0.230	fg	0.213	DE	0.122	fg	0.199	b	0.160	C
Plm-V-Cocopeat	0.114	r	0.157	nop	0.136	I	0.088	jk	0.151	cd	0.120	D
اثر زمان The effect of time	0.194	B	0.204	A	—	—	0.103	B	0.141	A	—	—

حروف کوچک متفاوت برای هر شاخص بیانگر تفاوت آماری اثر برهمکنش تیمارها، حروف بزرگ متفاوت در ستون میانگین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین بسترهای رشد، و حروف بزرگ متفاوت در ردیف آخر برای هر شاخص نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین دو زمان پیش (Before-D/W) و پس (After-D/W) از دوره‌های تر و خشک شدن بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است؛ EAW و AIR به ترتیب بیانگر آب به آسانی قابل دسترس و مقدار گنجایش هوایی پس از آبیاری است.

Different lowercase letters for each indicator show the statistical difference for the interaction effect of the treatments, and different uppercase letters in the mean column indicate a significant difference between the growth media. Different uppercase letters in the last row for each indicator show the significant difference between the two times before (Before-D/W) and after (After-D/W) wetting and drying cycles based on the LSD test at the probability level of 0.05; EAW and AIR represent easily available water and air after irrigation, respectively.

تخلخل زیاد یک بستر می‌تواند بر مقدار تهویه آن نیز اثرگذار (افزاینده) باشد (Kim *et al.*, 2017). در تمامی بسترها (به جزء بستر Sd-SdB500-V-Z) با اعمال دوره‌های تر و خشک شدن و گذشت زمان مقدار کمیت AIR از روند افزایشی برخوردار بود که این تغییر معنی‌دار نیز بود (جدول ۵). این یافته با نتایج باکری و همکاران همخوانی دارد (Bakry *et al.*, 2013). بیش‌ترین افزایش در مقادیر AIR در بین بسترهای رشد پس از اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن مربوط به بسترهای Plm-V-Cocopeat، Plm-V-RW و RW-Sd-V بود. این بسترها دارای مقدار زیادی خوشه خرما و پشم سنگ بودند. مقدار AIR تنها در بستر Sd-SdB500-V-Z پس از اعمال دوره‌های تر و

بستر رشد WS-V دارای کم‌ترین مقدار AIR در بین بسترهای رشد بود که علت آن می‌تواند منافذ ریز کاه گندم در این بستر باشد؛ این یافته با نتایج بنی‌طالبی و همکاران همخوانی دارد (Banitalebi *et al.*, 2021).

به طور کلی افزایش مقدار EAW منجر به کاهش مقدار AIR می‌شود. برای نمونه بستر WS-V دارای تهویه کم ($0.063 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) و EAW زیادی ($0.248 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بود در حالی که برای ترکیب Sd-PlmB300-V عکس این گفته درست است یعنی این بستر دارای تهویه بهتری بود (جدول ۵) که این نتیجه با یافته‌های بنی‌طالبی و همکاران همخوانی دارد (Banitalebi *et al.*, 2021).

خشک شدن کاهش یافت که حاکی از افزایش شدید فراوانی منافذ ریز بوده و بر تهویه آن نیز تاثیر داشته است.

جدول ۶- مقایسه میانگین اثر بستر رشد، زمان و برهمکنش آن‌ها بر شاخص‌های نگهداشت آب (WHC و WBC)

Table 6- Means' comparisons of the effect of the growth medium, time, and their interaction on water retention indicators (WHC and WBC)

بستر رشد Growth medium	WHC (cm ³ cm ⁻³)						WBC (cm ³ cm ⁻³)					
	Before-D/W		After-D/W		میانگین Average		Before-D/W		After-D/W		میانگین Average	
Cocopeat-Perlite	0.620	fgh	0.603	hi	0.612	DE	0.033	lm	0.053	hi	0.043	FG
RW(0.1)-Perlite	0.450	o	0.455	o	0.453	I	0.053	hi	0.040	jk	0.046	FE
RW(0.2)-Perlite	0.503	n	0.520	mn	0.511	H	0.123	a	0.101	b	0.112	A
WS-V	0.686	b	0.711	a	0.699	A	0.044	j	0.064	f	0.054	DE
Rh-PlmB300-V	0.617	ghi	0.657	cd	0.637	CD	0.066	ef	0.058	gh	0.062	CD
WSB500-Rh-V	0.610	hi	0.575	j	0.592	FE	0.056	hi	0.057	gh	0.056	D
Sd-SdB500-V-Z	0.599	i	0.682	b	0.641	CD	0.032	lmn	0.044	j	0.038	FG
Sd-PlmB300-V	0.562	jk	0.573	j	0.568	FG	0.021	o	0.033	lm	0.027	H
PlmB300-WS-V	0.656	cd	0.640	de	0.648	BC	0.051	i	0.074	d	0.062	CD
Plm-SdB500-V	0.648	de	0.672	bc	0.660	BC	0.063	fg	0.067	ef	0.065	C
Sd-SCB300-V-Z	0.551	kl	0.535	lm	0.543	G	0.030	mn	0.041	jk	0.035	GH
Plm-V-RW	0.670	bc	0.677	b	0.673	AB	0.072	de	0.092	c	0.082	B
RW-Sd-V	0.632	efg	0.629	efg	0.631	CD	0.026	no	0.052	hi	0.039	FG
Plm-V-Cocopeat	0.638	def	0.683	b	0.661	BC	0.038	kl	0.052	hi	0.045	F
اثر زمان The effect of time	0.603	B	0.615	A	—	—	0.051	B	0.059	A	—	—

حروف کوچک متفاوت برای هر شاخص بیانگر تفاوت آماری اثر برهمکنش تیمارها، حروف بزرگ متفاوت در ستون میانگین نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین بسترهای رشد، و حروف بزرگ متفاوت در ردیف آخر برای هر شاخص نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار بین دو زمان پیش (Before-D/W) و پس (After-D/W) از دوره‌های تر و خشک شدن بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است؛ WHC و WBC به ترتیب بیانگر گنجایش نگهداشت آب و گنجایش یافری آب است.

Different lowercase letters for each indicator show the statistical difference for the interaction effect of the treatments, and different uppercase letters in the mean column indicate a significant difference between the growth media. Different uppercase letters in the last row for each indicator show the significant difference between the two times before (Before-D/W) and after (After-D/W) wetting and drying cycles based on the LSD test at the probability level of 0.05; WHC and WBC represent water holding capacity and water buffering capacity, respectively.

گنجایش نگهداشت آب (WHC) یک شاخص فیزیکی مهم بسترهای رشد است. مقدار این ویژگی بسته به نوع و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر رشد تغییر می‌کند (Banitalebi et al., 2019). مقادیر WHC بسترهای رشد دارای تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۶). دامنه تغییرات این ویژگی پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن $0.453-0.699 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. در بین بسترهای مورد بررسی بیش‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر WS-V بوده که با نتایج بنی‌طالابی و هم‌کاران هم‌خوانی دارد (Banitalebi et al., 2021). علت این یافته نگهداشت آب زیاد کاه گندم و ورمیکولیت است (Banitalebi et al., 2019). کم‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر RW(0.1)-Perlite بوده (جدول ۶) که علت آن را می‌توان به تخلخل کم این بستر نسبت داد. تفاوت در مقادیر WHC بین بسترهای رشد می‌تواند ناشی از متفاوت بودن تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ آن‌ها باشد (Bunt, 1988). بسترهای رشد تولید شده بر پایه بیوجار مقادیر WHC نسبتاً زیادی داشتند. پژوهشگران دیگر نیز افزایش WHC در اثر افزودن بیوجار به سایر بسترهای رشد را گزارش کردند (Banitalebi et al., 2021; Mendez et al., 2017; Zhang

et al., 2014). شاخص WHC یک ویژگی فیزیکی مهم بسترهای رشد است. مقدار این ویژگی بسته به نوع و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر رشد تغییر می‌کند (Banitalebi et al., 2019). مقادیر WHC بسترهای رشد دارای تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۶). دامنه تغییرات این ویژگی پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن $0.453-0.699 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. در بین بسترهای مورد بررسی بیش‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر WS-V بوده که با نتایج بنی‌طالابی و هم‌کاران هم‌خوانی دارد (Banitalebi et al., 2021). علت این یافته نگهداشت آب زیاد کاه گندم و ورمیکولیت است (Banitalebi et al., 2019). کم‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر RW(0.1)-Perlite بوده (جدول ۶) که علت آن را می‌توان به تخلخل کم این بستر نسبت داد. تفاوت در مقادیر WHC بین بسترهای رشد می‌تواند ناشی از متفاوت بودن تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ آن‌ها باشد (Bunt, 1988). بسترهای رشد تولید شده بر پایه بیوجار مقادیر WHC نسبتاً زیادی داشتند. پژوهشگران دیگر نیز افزایش WHC در اثر افزودن بیوجار به سایر بسترهای رشد را گزارش کردند (Banitalebi et al., 2021; Mendez et al., 2017; Zhang

gنجایش نگهداشت آب (WHC) یک شاخص فیزیکی مهم بسترهای رشد است. مقدار این ویژگی بسته به نوع و اندازه ذرات تشکیل‌دهنده بستر رشد تغییر می‌کند (Banitalebi et al., 2019). مقادیر WHC بسترهای رشد دارای تفاوت معنی‌دار بودند (جدول ۶). دامنه تغییرات این ویژگی پیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن $0.453-0.699 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود. در بین بسترهای مورد بررسی بیش‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر WS-V بوده که با نتایج بنی‌طالابی و هم‌کاران هم‌خوانی دارد (Banitalebi et al., 2021). علت این یافته نگهداشت آب زیاد کاه گندم و ورمیکولیت است (Banitalebi et al., 2019). کم‌ترین مقدار WHC متعلق به بستر RW(0.1)-Perlite بوده (جدول ۶) که علت آن را می‌توان به تخلخل کم این بستر نسبت داد. تفاوت در مقادیر WHC بین بسترهای رشد می‌تواند ناشی از متفاوت بودن تخلخل کل و توزیع اندازه منافذ آن‌ها باشد (Bunt, 1988). بسترهای رشد تولید شده بر پایه بیوجار مقادیر WHC نسبتاً زیادی داشتند. پژوهشگران دیگر نیز افزایش WHC در اثر افزودن بیوجار به سایر بسترهای رشد را گزارش کردند (Banitalebi et al., 2021; Mendez et al., 2017; Zhang

اثر دوره‌های تر و خشک شدن بر تجزیه و میزان نش‌ست بسترهای رشد

اعمال دوره‌های تر و خشک شدن منجر به تجزیه مواد آلی در بسترهای رشد و نش‌ست آن‌ها شد. در صد نش‌ست ($\Delta L/L_0$) در بسترهای رشد بیانگر کاهش نسبی ارتفاع آن‌ها است. کاهش وزن خشک نسبی ($\Delta W/W_0$) بسترها با گذشت زمان بیانگر کاهش وزن بخش جامد بسترها بوده که عمدتاً به دلیل تجزیه مواد آلی است. مقادیر درصد کاهش ارتفاع نمونه و تغییرات وزن خشک نسبی بسترهای رشد پس از اعمال دوره‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.

در تمامی بسترها پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن، نشست و کاهش وزن خشک مشاهده شد. این تغییرات برای بسترهایی که دارای نسبت حجمی زیاد از مواد معدنی بودند ناچیز بود (شکل ۱). کم‌ترین تغییر در بین بسترهای رشد از نظر تجزیه (کاهش وزن خشک) مربوط به بستر کاملاً معدنی RW(0.1)-Perlite بود (0.17%). پایدارترین بستر از نظر نشست پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن بستر RW-Sd-V بوده که دارای نسبت حجمی زیادی از مواد معدنی است. بیش‌ترین نشست در بسترهای حاوی کاه گندم مشاهده شد (WS-V و PlmB300-WS-V). نشست و یا تغییر مقدار ماده آلی بسترهای رشد در اثر اعمال دوره‌های تر و خشک شدن می‌تواند توجیهی برای تغییر توزیع اندازه منافذ بسترهای رشد و واکنش آن‌ها در برابر تر و خشک شدن باشد. بنابراین معدنی شدن و تجزیه مواد آلی سبب از دست رفتن بخشی از ماده خشک و نشست بسترها شده است. تجزیه مواد آلی و رسوب و خرد شدن ذرات با اندازه‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش بیش‌تر منافذ ریز در مقایسه با منافذ درشت شود. این نتیجه با یافته‌های میشل و کرلوچ (Michel and Kerloch, 2017)، آلایر و همکاران (Allaire-Leung et al., 1999)، تیورنن و همکاران (Turunen et al., 2019) و کاناوو و همکاران (Cannavo et al., 2011) همخوانی دارد. این پژوهشگران نیز نشست در بسترهای رشد و افزایش فراوانی منافذ ریز با گذشت زمان را گزارش کردند.

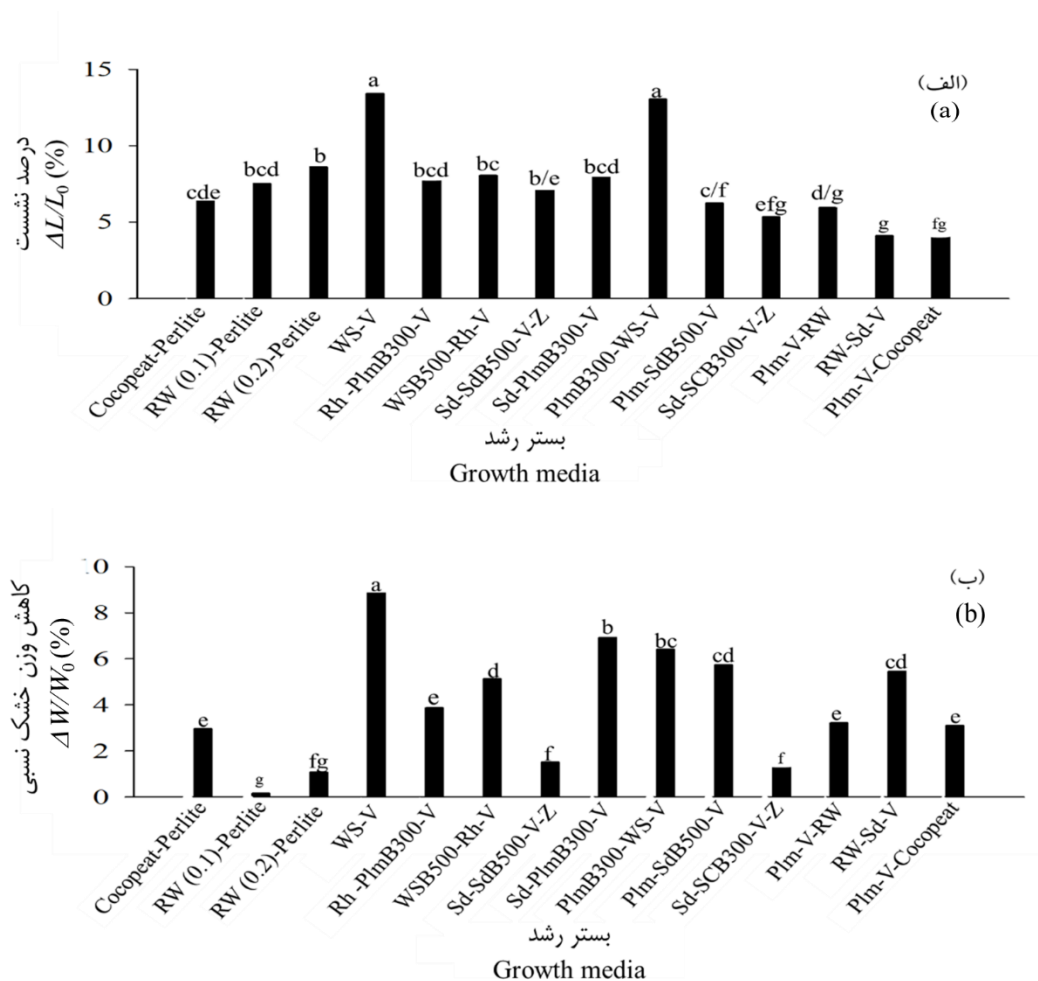
تغییرات درصد ماده آلی بسترهای رشد در اثر اعمال دوره‌های تر و خشک شدن

نتایج مقایسه میانگین اثر تیمارها بر درصد ماده آلی (OM) در شکل ۲ ارائه شده است. مقادیر OM بسترهای رشد تفاوت معنی‌دار داشتند ($p < 0.05$). بیش‌ترین مقادیر OM در بین بسترهای رشد مورد بررسی به ترتیب مربوط به بسترهای Plm-V-Cocopeat و Cocopeat-Perlite بود که وجود نسبت حجمی زیاد از کوکوپیت و خوسه خرما در این بسترها می‌تواند دلیل این یافته باشد.

تجزیه مواد آلی و تغییر آرایش ذرات می‌تواند باشد. بنابراین دوره‌های تر و خشک شدن باعث ریز تر شدن منافذ و افزایش نگهداشت آب بستر شده‌اند.

بیش‌ترین افزایش در مقدار WHC مربوط به بستر Sd-SdB500-V-Z بود که به افزایش فراوانی منافذ ریز مرتبط است. کاهش مقدار AIR (جدول ۵) این بستر را نش‌ست پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن این یافته را تایید می‌کند. مقادیر WHC پنج بستر رشد از جمله کوکوپیت-پرلیت در اثر اعمال دوره‌های تر و خشک شدن کاهش یافت (جدول ۶). پایدارترین بستر پس از اعمال دوره‌ها بستر RW-Sd-V بود. وجود مقدار زیادی از اجزای معدنی (پشم‌سنگ و ورمی‌کولیت) می‌تواند دلیل مهم پایداری این بستر باشد.

کاهش مقدار گنجایش بافوری آب (WBC) یک بستر می‌تواند منجر به کاهش سریع نگهداشت آب و در نتیجه هدایت هیدرولیکی غیراشاره با افزایش مکش ماتریک گردد (Raviv and Lieth, 2008). با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۶)، اکثر بسترهای رشد دارای مقادیر WBC در حد بهینه ($0.10 - 0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) بیش و پس از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن بودند (Raviv et al., 1999). بستر RW(0.2)-Perlite دارای مقدار WBC بیش‌تر از حد بهینه و بسترهای Sd-SdB500-V-Z، Sd-PlmB300-V و SCB300-V-Z که همگی دارای مقدار زیادی خاک اره بودند، مقادیر WBC کم‌تر از $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ داشتند. بیش‌ترین و کم‌ترین مقادیر WBC در بین بسترهای رشد به ترتیب مربوط به بسترهای RW(0.2)-Perlite و Sd-PlmB300-V بود (جدول ۶) که با نتایج بنی‌طالبی و همکاران (Banitalebi et al., 2021) همخوانی دارد. اثر زمان بر کمیت WBC مثبت بود به طوری که با اعمال دوره‌های تر و خشک شدن مقادیر WBC اکثر بسترهای مورد بررسی به طور معنی‌داری افزایش یافت (جدول ۶). همان‌طور که پیش از این بیان شد، دوره‌های تر و خشک شدن باعث تغییر در توزیع اندازه ذرات و منافذ و در نتیجه تغییر در WBC می‌شود. در اثر اعمال دوره‌های تر و خشک شدن، بیش‌ترین افزایش در مقدار WBC مربوط به بستر RW-Sd-V بود (جدول ۶). مقدار WBC این بستر پیش از اعمال دوره‌های تر و خشک شدن کم‌تر از حد بهینه بود ($0.026 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) اما پس از اعمال دوره‌ها به حد مطلوب رسید ($0.052 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). این نتیجه در چهار بستر دیگر نیز مشاهده شد (جدول ۶). بستر RW(0.2)-Perlite که در ابتدا دارای بیش‌تر از حد بهینه بود، پس از اعمال دوره‌ها به حد بهینه رسید ($0.101 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). بنابراین اثر مثبت دوره‌های تر و خشک شدن بر کمیت WBC به وضوح قابل مشاهده است. پایدارترین بستر از نظر کمیت WBC با گذشت زمان بستر WSB500-Rh-V بود. علت آن را می‌توان به وجود ورمیکولیت و پوسته شلتوک برنج با نسبت حجمی زیاد و پایداری این مواد در این بستر ترکیبی مرتبط دانست.



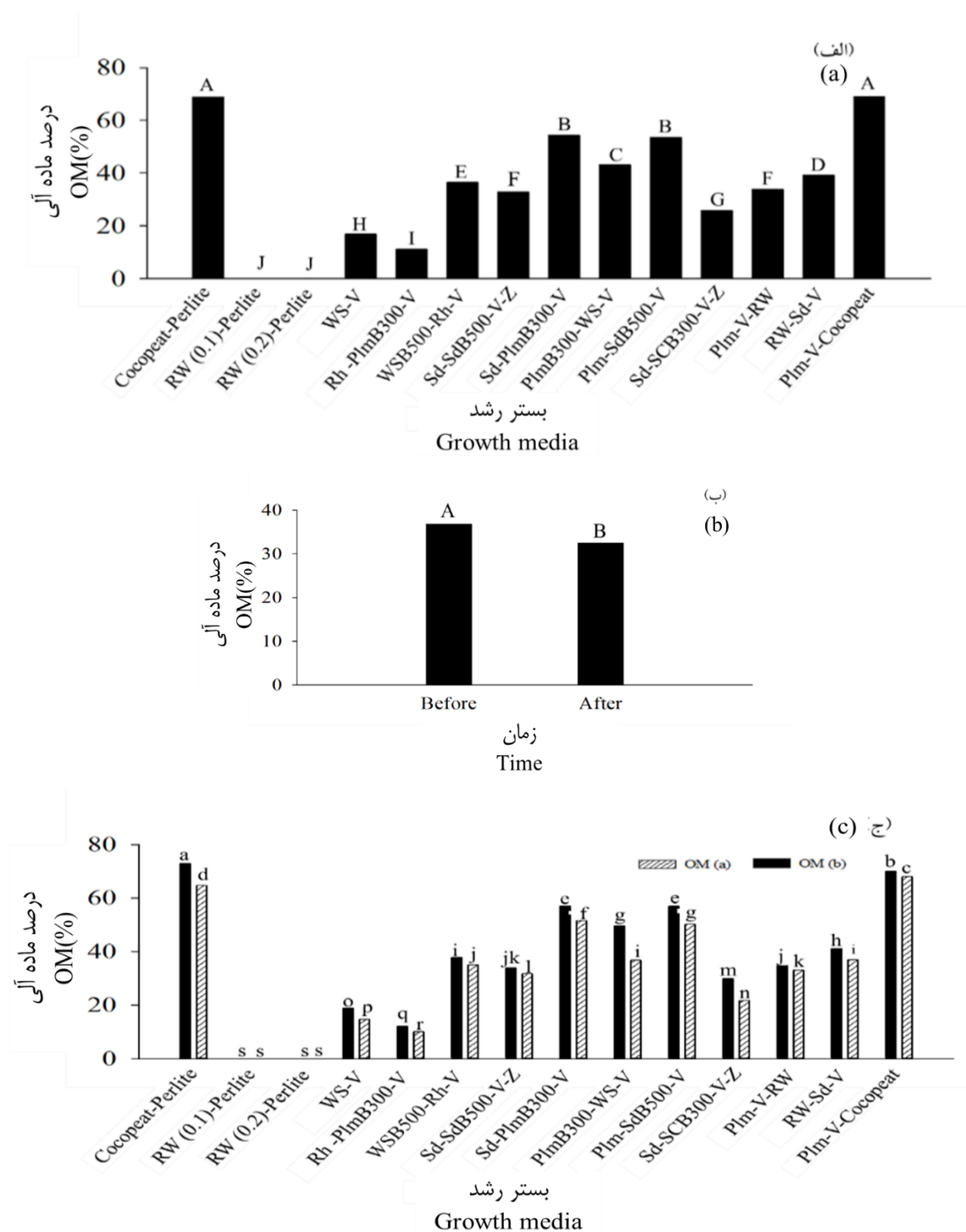
شکل ۱- مقایسه میانگین (الف) درصد نشست ($\Delta L/L_0$, %) و (ب) درصد تغییرات وزن خشک ($\Delta W/W_0$, %) بسترهای رشد در اثر اعمال دوره های تر و خشک شدن

حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی دار بر اساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است.

Figure 1- Means' comparisons of (a) subsidence percentage ($\Delta L/L_0$, %) and (b) percentage of changes in dry weight ($\Delta W/W_0$, %) of growth media due to the application of wetting and drying periods. Different letters indicate significant difference according to LSD test at the probability level of 0.05.

کاهش مقدار ماده آلی در این بسترها می تواند به دلیل تجزیه مواد آلی با گذشت زمان و در اثر دوره های تر و خشک شدن باشد. کاهش درصد ماده آلی برای بسترهای حاوی خاک اره و کاه گندم شدیدتر بود. در حالی که در بسترهای حاوی خوشه خرما این کاهش کمتر بود. بسترهای حاوی کاه گندم بیشترین نشست و کاهش وزن را نیز داشتند (شکل ۱). در تفسیر این نتایج می توان گفت چوب خوشه خرما غنی از فیبر و لیگنین و مقاوم به تجزیه میکروبی بوده و هنگامی که از آن در بسترهای رشد بدون خاک استفاده می شود در برابر تجزیه مقاوم است.

این نتیجه با یافته های بنی طالبی و همکاران (Banitalebi et al., 2021) همخوانی دارد که مقدار OM بستر کوکوپیت-پرلیت را زیاد گزارش دادند. بسترهای RW(0.1)-Perlite و RW(0.2)-Perlite کاملاً معدنی بودند. پس از این دو بستر، بستر Rh-PlmB300-V کمترین درصد OM را داشت چرا که حاوی ۸۰ درصد حجمی ورمیکولیت بود. نتایج مقایسه میانگین اثر زمان و برهمکنش بستر رشد و زمان بر درصد OM در شکل های ۲-ب و ۲-ج ارائه شده است. مقادیر ماده آلی تمام بسترهای رشد (به جز دو بستر RW(0.1)-Perlite و RW(0.2)-Perlite که کاملاً معدنی بوده و دارای ماده آلی نبودند)، با گذشت زمان (اعمال دوره های تر و خشک شدن) به طور معنی داری کاهش یافت ($p < 0.05$).



شکل ۲- مقایسه میانگین (الف) اثر نوع بستر رشد، (ب) اثر زمان (دوره‌های تر و خشک‌شدن) و (ج) اثر برهمکنش بستر رشد و زمان بر درصد ماده آلی (OM)

حروف متفاوت بیانگر تفاوت معنی‌دار براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۰/۰۵ است؛ حروف a و b در راهنمای شکل (ج) به ترتیب بیانگر زمان پیش و پس از دوره‌های تر و خشک‌شدن است.

Figure 2- Means' comparisons of (a) the effect of growth medium, (b) the effect of time (wetting and drying cycles), and (c) the interaction effect of the growth medium and time on the percentage of organic matter (OM)
Different letters indicate significant difference based on the LSD test at the probability level of 0.05; The letters b and a in the legend of graph (c) indicate the time before and after the wetting and drying cycles, respectively.

نتیجه گیری

(۱) بسترهای رشد مورد بررسی از ترکیبات و ضایعات تولیدی در کشور و بیوچار آن‌ها و مواد معدنی رایج در کشت‌های گلخانه‌ای ساخته شد. ویژگی‌های pH و EC بسترهای رشد مورد بررسی محدودیتی برای استفاده از آن‌ها در کشت‌های گلخانه‌ای ایجاد نمی‌کنند. ویژگی‌های فیزیکی اکثر بسترهای رشد در دامنه مطلوب قرار داشت. مقادیر WHC، EAW، TP، BD و WHC در اکثر بسترهای رشد در دامنه‌های مطلوب بود و حتی در برخی موارد از بستر کوکوپیت-پرلیت (به عنوان شاهد) بهتر بودند. اکثر بسترهای رشد مورد بررسی با مقادیر زیاد EAW و WHC و مقادیر کم EC و BD در کشت‌های گلخانه‌ای قابل استفاده خواهند بود. بنابراین به نظر می‌رسد استفاده از این بسترهای رشد می‌تواند جایگزین مناسبی برای بستر رایج کوکوپیت-پرلیت باشد.

(۲) اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بر بسترهای رشد سبب تغییر قابل توجه ویژگی‌های فیزیکی آن‌ها شد. از دلایل این تغییرات به تجزیه مواد آلی، به هم خوردگی و تغییر آرایش ذرات، خرد شدن ذرات، انقباض، سخت شدن و نشست آن‌ها می‌توان اشاره کرد. به طور کلی نتایج نشان داد اعمال دوره‌های تر و خشک‌شدن بر بسترهای رشد سبب افزایش فراوانی منافذ ریز شد. این دوره‌ها اثر مثبتی بر شاخص‌های EAW، WHC و AIR اکثر بسترهای رشد داشت. افزایش این شاخص‌ها ممکن است مزیتی برای این بسترهای رشد

منابع

- 1- Abad, M., Noguera, P., Puchades, R., Maquieira, A., & Noguera, V. (2002). Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for containerised ornamental plants. *Bioresource Technology* 82: 241-245. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00189-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00189-4).
- 2- Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G.H., & Pourbabaee, A.A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment* 61: 475-482. <https://doi.org/10.17221/117/2015-PSE>.
- 3- Allaire-Leung, S., Caron, J., & Parent, L. (1999). Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Canadian Journal of Soil Science* 79: 137-139. <https://doi.org/10.4141/S98-060>.
- 4- Awang, Y., Shazmi Shahron, A., Rosli, B.M., & Selamat, A. (2009). Chemical and physical characteristics of cocopeat-based media mixtures and their effects on the growth and development of *Celosia cristata*. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences* 4: 63-71. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2009.63.71>.
- 5- Bakry, M., Lamhamedi, M.S., Caron, J., Bernier, P.Y., El Abidine, A.Z., Stowe, D.C., & Margolis, H.A. (2013). Changes in the physical properties of two Acacia compost-based growing media and their effects on carob (*Ceratonia siliqua* L.) seedling development. *New Forests* 44: 827-847. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9368-6>.
- 6- Banitalebi, G., Mosaddeghi, M.R., & Shariatmadari, H. (2019). Feasibility of agricultural residues and their biochars for plant growing media: Physical and hydraulic properties. *Waste Management* 87: 577-589. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.034>.
- 7- Banitalebi, G., Mosaddeghi, M.R., & Shariatmadari, H. (2021). Evaluation of physico-chemical properties of biochar-based mixtures for soilless growth media. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 23: 950-964. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01181-z>.

- 8- Brewer, C.E., Chuang, V.J., Masiello, C.A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L.E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C.A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy* 66: 176-185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>.
- 9- Brückner, U. (1996). Physical properties of different potting media and substrate mixtures-especially air-and water capacity. *Acta Horticulturae* 450: 263-270. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1997.450.31>.
- 10- Bunt, A.C. (1988). *Media and Mixes for Container-Grown Plants*. 2nd Ed. Unwin Hymnan Ltd., London, Springer, London.
- 11- Bures, S., Pokorny, F.A., & Ware, G.O. (1993). Estimating shrinkage of container media mixtures with linear and/or regression models. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 24: 315-323. <https://doi.org/10.1080/00103629309368801>.
- 12- Cannavo, P., Hafidhi, H., & Michel, J. (2011). Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. *HortScience* 46: 1394-1399. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.10.1394>.
- 13- Caron, J., Morel, P., Rivière, L.M., & Guillemain, G. (2010). Identifying appropriate methodology to diagnose aeration limitations with large peat and bark particles in growing media. *Canadian Journal of Soil Science* 90: 481-494. <http://doi.org/10.4141/CJSS09015>.
- 14- Cattivello, C. (2011). Factors affecting the swelling capacity of peat-based substrates. *Acta Horticulturae* 1013: 123-130. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.13>.
- 15- De Boodt, M., & Verdonck, O. (1972). The physical properties of the substrates used in horticulture. *Acta Horticulturae* 26: 37-44. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.1972.26.5>.
- 16- Deepagoda, T.C., Chen Lopez, J.C., Møldrup, P., De Jonge, L.W., & Tuller, M. (2013). Integral parameters for characterizing water, energy, and aeration properties of soilless plant growth media. *Journal of Hydrology* 502: 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.08.031>.
- 17- Gupta, M., Yang, J., & Roy, C. (2002). Density of softwood bark and softwood char: procedural calibration and measurement by water soaking and kerosene immersion method. *Fuel* 81: 1379-1384. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00043-1).
- 18- Huang, L., & Gu, M. (2019). Effects of biochar on container substrate properties and growth of plants—A review. *Horticulturae* 5: 1-14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5010014>.
- 19- Kerloch, E., & Michel, J.C. (2015). Pore tortuosity and wettability as main characteristics of the evolution of hydraulic properties of organic growing media during cultivation. *Vadose Zone Journal* 14: 1-7. <http://doi.org/10.2136/v14.11.0162>.
- 20- Kim, H.S., Kim, K.R., Yang, J.E., Ok, Y.S., Kim, W.I., Kunhikrishnan, A., & Kim, K.H. (2017). Amelioration of horticultural growing media properties through rice hull biochar incorporation. *Waste and Biomass Valorization* 8: 483-492. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9588-z>.
- 21- Massa, D., Bonetti, A., Cacini, S., Faraloni, C., Prisa, D., Tuccio, L., & Petruccielli, R. (2019). Soilless tomato grown under nutritional stress increases green biomass but not yield or quality in presence of biochar as growing medium. *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 60: 871-881. <https://doi.org/10.1007/s13580-019-00169-x>.
- 22- Méndez, A., Cárdenas-Aguilar, E., Paz-Ferreiro, J., Plaza, C., & Gascó, G. (2017). The effect of sewage sludge biochar on peat-based growing media. *Biological Agriculture & Horticulture* 33: 40-51. <https://doi.org/10.1080/01448765.2016.1185645>.
- 23- Michel, J.C., Kerloch, E., Bozon, E., & Cannavo, P. (2011). Consequences of root development on the evolution of hydraulic properties of peat growing media under a constant and optimal water regime. *Acta Horticulturae* 1013: 159-165. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1013.18>.
- 24- Michel, J.C., & Kerloch, E. (2017). Evolution of hydraulic properties and wettability of organic growing media during cultivation according to irrigation strategies. *Scientia Horticulturae* 217: 28-35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.023>.
- 25- Nash, V.E., & Laiche, A.J. (1981). Changes in the characteristics of potting media with time. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 12: 1011-1020. <https://doi.org/10.1080/00103628109367213>.
- 26- Nemati, M.R., Simard, F., Fortin, J.P., & Beaudoin, J. (2015). Potential use of biochar in growing media. *Vadose Zone Journal* 14: 1-8. <http://doi.org/10.2136/vzj2014.06.0074>.
- 27- Raviv, M., Wallach, R., Silber, A., Medina, Sh., & Krasnovsky, A. (1999). The effect of hydraulic characteristics of volcanic materials on yield of roses grown in soilless culture. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 124: 205-209. <https://doi.org/10.21273/JASHS.124.2.205>.
- 28- Raviv, M., & Lieth J.H. (2008). *Significance of soilless culture in agriculture*. pp. 1-11. In: *Soilless Culture: Theory and Practice*. Raviv, M., & Lieth, J.H. (Eds.). Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 29- Safadoust, A., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., & Yousefi, G. (2012). Effects of wetting/drying, freezing/thawing and earth worm activities on soil hydraulic properties. *Journal of Water and Soil* 26: 340-348. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.14160>.
- 30- Sohi, S., Lopez-Capel, E., Krull, E., & Bol, R. (2009). Biochar, climate change and soil: A review to guide future

- research. *CSIRO Land and Water Science Report* 5: 17-31. <http://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.010>.
- 31- Turunen, M., Hyväluoma, J., Heikkinen, J., Keskinen, R., Kaseva, J., Koestel, J., & Rasa, K. (2019). Quantifying physical properties of three Sphagnum-based growing media as affected by drying-wetting cycles. *Vadose Zone Journal* 18: 1-10. <http://doi.org/10.2136/vzj2019.04.0033>.
- 32- Zhang, L., Sun, X., Tian, Y., & Gong, X. (2014). Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*. *Scientia Horticulturae* 176: 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.06.021>.



Selectivity and Adsorption of Potassium by Bentonites Saturated with Calcium, Magnesium and Sodium

S. Jalilian¹, F. Ranjbar^{2*}

Received: 13-11-2022

Revised: 29-12-2022

Accepted: 07-01-2023

Available Online: 07-01-2023

How to cite this article:

Jalilian, S., & Ranjbar, F. (2023). Selectivity and Adsorption of Potassium by Bentonites Saturated with Calcium, Magnesium and Sodium. *Journal of Water and Soil* 37(1): 113-127. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79586.1227>

Introduction

The relative preference and the cation exchange capacity of the exchanger are among the important and determining factors in the adsorption and retention of cations. Studies have shown that factors such as valency, the size of the hydrated radius or the relative hydration energy of ions, the type of clay mineral, the concentration of the solution phase, the amount of organic matter, the structural characteristics, and the charge density of the exchanger determine the preferential adsorption of cations in the soil. The aims of this study were: 1) to investigate the effect of contact time, adsorbent dose, and pH on potassium selectivity by bentonite in binary systems including K-Ca, K-Mg, and K-Na based on Gapon, Vanslow, and Gaines-Thomas equations and 2) to investigate the potassium adsorption isotherms by bentonites saturated with calcium, magnesium, and sodium.

Materials and Methods

To saturate bentonite, 1 M solutions of calcium, magnesium, and sodium chloride were separately used. The effects of contact time (10-1440 min), adsorbent dose (0.1-2 g), and pH (3-9) on potassium adsorption and selectivity by bentonites saturated with calcium, magnesium, and sodium in binary systems were investigated. In these experiments, 20 mL of a solution containing 24 meq L⁻¹ of potassium and 6 meq L⁻¹ of the competing cation (Ca, Mg, or Na) were added to the adsorbent. The selectivity coefficients of Gapon, Valselow, and Gaines-Thomas were calculated. Isotherm experiments were also performed to evaluate the effect of different equivalent fractions of potassium (0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 0.9, and 1) and the competing cation in the solution phase on potassium adsorption. Simple linear, Freundlich, and Temkin equations were fitted to the isotherm data.

Results and Discussion

This study results showed that the adsorption of potassium by Ca-, Mg-, and Na-bentonites increased with increasing contact time and reached its highest value in 24 hours. The pseudo-second-order kinetic equation was better able to describe the process of potassium adsorption by bentonites over time than the pseudo-first-order equation. Potassium adsorption by Mg- and Na-bentonites had a downward trend with increasing the adsorbent dose in the range of 0.1-2 g, while Ca-bentonite showed the highest adsorption of potassium in the dose of 0.2 g. With increase in pH, the percentage of potassium adsorbed from the solution phase increased; and reached its maximum value at pH 9. The amount of potassium adsorption by Mg- and Na-bentonite in all pHs was almost the same and at the same time more than Ca-bentonite. The interesting result of this research was that the behavior of Mg-bentonite was more similar to Na-bentonite than to Ca-bentonite. An increase in the negative charge of aluminosilicates with an increase in pH can occur due to the loss of protons by silanol and aluminol groups. The selectivity coefficients of Gapon, Vanslow, and Gaines-Thomas changed under the influence of contact time, adsorbent dose, and pH. Comparing the results of the investigation of the mentioned factors with the results of the selectivity coefficients showed that these coefficients cannot be a definitive criterion for judging the preference of

1 and 2- Master's Degree in Soil Chemistry and Fertility and Assistant Professor, Department of Soil Science, College of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: f_ranjbar1980@yahoo.com)

one cation over another cation for adsorption in exchange sites. The isotherm experiment indicated that the amount of potassium adsorption in the solid phase increased with the increase of the potassium equivalent fraction in the solution phase; so the maximum adsorption was observed at the highest initial concentration of potassium (30 meq L⁻¹, which corresponded to the equivalent fraction of 1). The linear adsorption coefficient in the simple linear equation (K_d) showed that potassium adsorption by Na-bentonite was higher than the two others. The highest amount of K_d , 56.0 L kg⁻¹, and the lowest value, 11.9 L kg⁻¹, were obtained for bentonites saturated with sodium and calcium, respectively. The parameter b_T , the heat of exchange in the Temkin equation, was estimated to be 4.5, 5.0, and 19.1 (J mol⁻¹) for bentonites saturated with sodium, magnesium, and calcium, respectively. Three simple linear equations, Freundlich, and Temkin were able to describe the adsorption process well. However, based on the highest value of the coefficient of determination (R^2) and the lowest value of the standard error (SE), it can be said that the Freundlich equation showed the best fit to the data.

Conclusion

The highest adsorption of potassium occurred at a contact time of 24 h, a dose of 0.1 g for Mg- and Na-bentonite and 0.2 g for Ca-bentonite and pH 9. The pseudo-second-order equation described well the kinetics of potassium adsorption by bentonites over time. The results showed that the behavior of Mg-bentonite was more similar to Na-bentonite than Ca-bentonite. The selectivity coefficients of Vanslow, Gaines-Thomas, and Gapon changed under the influence of contact time, adsorbent dose, and pH. The results revealed that it is not possible to definitely determine the preference or non-preference of a cation based only on selectivity coefficients. The isotherm experiment showed that the amount of potassium adsorption increased with the increase of the initial equivalent fraction of potassium in the solution. The highest value of R^2 and the lowest value of SE were obtained for simple linear and Freundlich equations, respectively.

Keywords: Cation exchange, Gapon, Gaines-Thomas, Isotherm, Vanselow

انتخاب پذیری و جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های اشباع شده با کلسیم، منیزیم و سدیم

شبنم جلیلیان^۱ - فرانک رنجبر^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۷

چکیده

انتخاب‌گری نسبی و ظرفیت تبادل کاتیونی تبادله‌گر از جمله عوامل مهم و تعیین‌کننده در جذب و نگهداشت کاتیون‌ها محسوب می‌گردند. در این پژوهش، تأثیر مقدار جاذب، pH و زمان تماس بر انتخاب‌پذیری پتاسیم توسط بنتونیت‌های اشباع شده با کلسیم، منیزیم و سدیم در سیستم‌های دوتایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، به منظور ارزیابی تأثیر نسبت‌های اکیوالانی مختلف پتاسیم محلول (۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۰/۹ و ۱) و کاتیون همراه بر مقدار جذب پتاسیم، آزمایش‌های ایزوترم پتاسیم در حضور این جاذب‌ها انجام شد. نتایج نشان داد که جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های کلسیمی، منیزیمی و سدیمی با افزایش زمان تماس، افزایش پیدا کرد و در زمان ۲۴ ساعت به بیشترین مقدار خود رسید. معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم نسبت به معادله شبه مرتبه اول بهتر توانست روند جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌ها را با گذشت زمان توصیف نماید. جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های اشباع شده با منیزیم و سدیم، با افزایش مقدار جاذب در دامنه ۲-۰/۱ گرم، روند نزولی داشت، در حالی که، بنتونیت کلسیمی بیشترین جذب پتاسیم را در مقدار ۰/۲ گرم نشان داد. با افزایش pH، در صد جذب پتاسیم از فاز محلول افزایش یافت؛ به گونه‌ای که در pH برابر ۹ به بیشترین مقدار خود رسید. میزان جذب پتاسیم توسط بنتونیت سدیمی و منیزیمی در تمام pHها، تقریباً به یک اندازه و در عین حال، بیشتر از بنتونیت کلسیمی صورت گرفت. نتیجه جالب توجه این پژوهش در شباهت بیشتر رفتار بنتونیت منیزیمی به بنتونیت سدیمی نسبت به بنتونیت کلسیمی بود. ضرایب انتخاب‌پذیری وانسلو، گینز-توماس و گاپون تحت تأثیر زمان تماس، مقدار جاذب و pH تغییر کردند. مقایسه نتایج بررسی اثر فاکتورهای اشاره شده با نتایج ضرایب انتخاب‌پذیری نشان داد که این ضرایب نمی‌توانند ملاک قطعی برای قضاوت در مورد ترجیح‌پذیری یک کاتیون نسبت به کاتیون دیگر برای جذب در مکان‌های تبادلی باشند. بررسی ایزوترم جذب پتاسیم نشان داد که میزان جذب پتاسیم در فاز جامد با افزایش کسر اکیوالانی پتاسیم محلول، روند صعودی داشت؛ به گونه‌ای که حداکثر جذب پتاسیم، در بالاترین غلظت اولیه پتاسیم (۳۰ میلی اکیوالان در لیتر، معادل کسر اکیوالانی ۱)، مشاهده شد. بیشترین مقدار ضریب جذب خطی (K_d)، ۱۵۱/۳ لیتر در کیلوگرم و کمترین آن، ۱۱/۹ لیتر در کیلوگرم، به ترتیب در بنتونیت سدیمی و بنتونیت کلسیمی به دست آمد. پارامتر گرمای تبادل در معادله تمکین، به ترتیب برای بنتونیت‌های سدیمی، منیزیمی و کلسیمی برابر ۴/۵، ۵/۰ و ۱۹/۱ ($J \text{ mol}^{-1}$) به دست آمد. هر سه معادله خطی ساده، تمکین و فروندلیچ به خوبی به داده‌های جذب پتاسیم برازش شدند. بیشترین مقدار ضریب تعیین برای معادله خطی ساده و کمترین خطای استاندارد برای معادله فروندلیچ برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: ایزوترم، تبادل کاتیونی، گاپون، گینز-توماس، وانسلو

۱ و ۲- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد شیمی و حاصلخیزی خاک و استادیار، گروه علوم و مهندسی خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران
(*) - نویسنده مسئول: (Email: f_ranjbar1980@yahoo.com)

مقدمه

انتخاب‌گری نسبی و ظرفیت تبادل کاتیونی تبادله‌گر از جمله عوامل مهم و تعیین‌کننده در جذب و نگهداشت کاتیون‌ها محسوب می‌گردند. به طور کلی، بررسی‌ها نشان داده‌اند که عواملی مانند ظرفیت، اندازه شعاع آب‌پوشی یا انرژی نسبی آب‌پوشی یون‌ها، نوع کانی رسی، غلظت فاز محلول، مقدار ماده آلی و نیز ویژگی‌های ساختاری و بار تبادل‌گرها، جذب ترجیحی کاتیون‌ها در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (Khalilirad and Towfighi, 2017). شاهین و همکاران (Shaheen et al., 2013) نیز گزارش کردند که ترجیح برای جذب عناصر در خاک ممکن است بر اساس ثابت هیدرولیز، شعاع یونی و شعاع آب‌پوشی آنها باشد. رنجبر و جلالی (Ranjbar and Jalali, 2016) با بررسی جذب سدیم توسط جاذب‌های معدنی شامل کائولینیت، بنتونیت و زئولیت، گزارش کردند که بیشترین مقدار سدیم جذب‌شده در زئولیت با بالاترین سطح ظرفیت تبادل کاتیونی مشاهده شد.

تبادل کاتیونی یکی از فرآیندهای جذب سطحی و یکی از پدیده‌های مهم در جذب و نگهداری کاتیون‌های مختلف به شمار می‌رود (Khalilirad and Towfighi, 2017). واکنش‌های تبادل کاتیونی، برگشت‌پذیر یا تقریباً برگشت‌پذیر می‌باشند. اما، تبادل‌گرها معمولاً به صورت غیر ایده‌آل رفتار می‌کنند، زیرا دارای مکان‌های جذبی با انتخاب‌پذیری متفاوت برای کاتیون‌های یکسان هستند. تغییر در میزان انتخاب‌پذیری، معرف غیر یکنواخت بودن مکان‌های جذب در سطح تبادل‌گر می‌باشد (Khalilirad and Towfighi, 2017). بررسی‌ها نشان داده‌اند که عواملی مانند ظرفیت، اندازه شعاع آب‌پوشی یا انرژی نسبی آب‌پوشی یون‌ها، نوع کانی رسی، غلظت فاز محلول، مقدار ماده آلی، انرژی آب‌پوشی یون و نیز ویژگی‌های ساختاری و بار تبادل‌گرها، جذب ترجیحی کاتیون‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

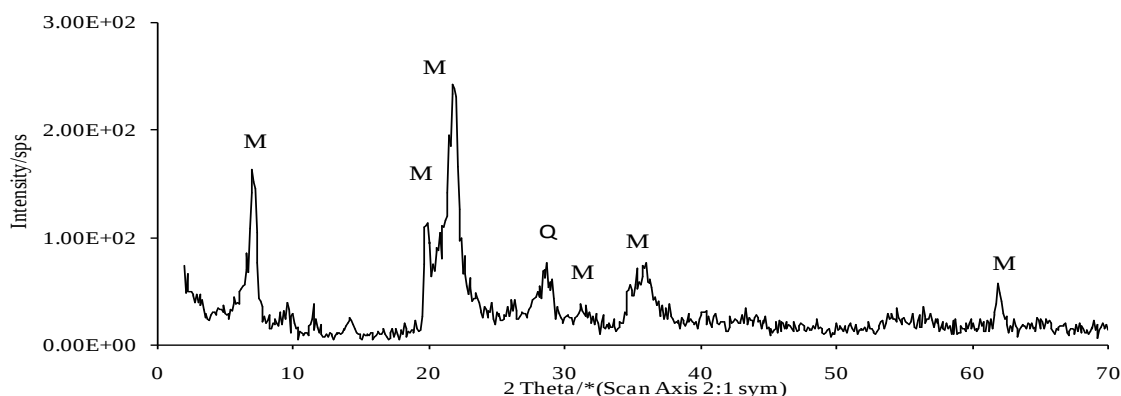
ترجیح‌پذیری یک کاتیون نسبت به کاتیون‌های دیگر می‌تواند با ضریب اثر جرم توصیف شود که به آن ضریب انتخاب‌پذیری گفته می‌شود. این ضریب نسبت کاتیون‌های جذب شده را به فعالیت آنها در فاز محلول خاک بیان می‌کند (Malakouti et al., 2016). محققین مختلفی در تلاش هستند که با تعیین این ضرایب بتوانند به یک ثابت واکنش که قادر به توصیف و وضعیت تعادل یک سیستم در محدوده وسیعی از ترکیبات فاز تبادلی باشد، دست یابند. اما از آنجا که این ضرایب برای هر واکنش با ترکیب بخش تبادلی، تغییر می‌کنند، می‌توان گفت که ضرایب ثابتی نیستند. بنابراین، از واژه ضریب انتخاب‌پذیری به جای ثابت تعادل ترمودینامیکی استفاده می‌شود. باید توجه داشت که مطالعات تبادل کاتیونی بیشتر در سیستم‌های دوگانه، بعضاً سه‌گانه و به ندرت نیز در سیستم‌های چهارگانه صورت گرفته‌اند،

زیرا چنین مطالعاتی با افزایش تعداد کاتیون‌ها، دشوار و در مواردی غیر عملی می‌شوند. در نتیجه، معمولاً این‌گونه بررسی‌ها در سیستم‌های دوگانه صورت گرفته‌اند (Evangelou and Lumbanraja, 2002). ایزوترم‌های جذب، رابطه‌ای خاص بین غلظت ماده جذب‌شونده در محلول و مقدار جذب شده روی سطح فاز جامد در دمای ثابت می‌باشند (Rafatullah et al., 2009; Braz et al., 2013). جلالی و همکاران (Jalali et al., 2020) با بررسی ضرایب انتخاب‌پذیری K، Na، Ca و Mg در سیستم‌های تبادل دوتایی و ایزوترم آن‌ها بیان کردند که مقادیر ضریب جذب خطی (K_d) برای کاتیون‌های مختلف با افزایش غلظت اولیه کاتیون‌ها افزایش یافت. علاوه بر این، تمایل کاتیون‌ها برای جذب توسط خاک از این ترتیب پیروی نمود: $K > Ca > Mg > Na$ که با سری لیوتروپیک کلاسیک متفاوت بود. انتخاب‌پذیری قابل توجه پتاسیم، نسبت به کاتیون‌های دوظرفیتی توسط خاک توسط ویسکانتی و همکاران (Visconti et al., 2012) و تاکاهاشی و همکاران (Takahashi et al., 2018) نیز گزارش شده است. ترجیح غیر عادی پتاسیم به کاتیون‌های دوظرفیتی مانند کلسیم و منیزیم را می‌توان به وجود ایلیت در ترکیب کانی‌شناسی خاک نسبت داد. علاوه بر این، بخشی از کلسیم و منیزیم در محلول خاک به صورت گونه‌های تک‌ظرفیتی $CaCl^+$ و $MgCl^+$ وجود دارد که ترجیح پتاسیم را برای جذب در مکان‌های تبادل افزایش می‌دهند. همچنین، عامل دیگری که ممکن است بر انتخاب‌پذیری پتاسیم نسبت به کلسیم تأثیر بگذارد، انرژی آب‌پوشی پتاسیم است که تقریباً سه برابر کوچک‌تر از کلسیم است.

این مطالعه با هدف بررسی تأثیر زمان تماس، مقدار جاذب و pH بر ضرایب انتخاب‌پذیری پتاسیم در بنتونیت در سیستم‌های دوتایی K-Na و K-Mg، K-Na و K-Ca بر اساس معادلات گاپون، گینز-توماس و وانسلو و همچنین، بررسی ایزوترم‌های جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های اشباع شده با کلسیم، منیزیم و سدیم انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

ذره معدنی بنتونیت از معادن اسلتان مرکزی تهیه و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شد. سپس، ظرفیت تبادل کاتیونی آن به روش اشباع با استات سدیم یک مولار با $pH = 8/2$ (Bower et al., 1952) اندازه‌گیری گردید که برابر ۱۲۶ سانتی‌مول بار در کیلوگرم بود. نتایج پراش اشعه ایکس (XRD) نشان داد که بنتونیت مورد استفاده در این مطالعه عمدتاً حاوی مونت موریلونیت (۶۹/۳ درصد) و کوآرتز (۳۰/۷ درصد) بود (شکل ۱).



شکل ۱- آنالیز پراش پرتو ایکس بنتونیت (M: مونت موریلونیت؛ Q: کوآرتز)
Figure 1- XRD analysis of bentonite (M: montmorillonite; Q: quartz)

اشباع سازی بنتونیت با کلسیم، منیزیم و سدیم

نمونه های ۴۰۰ گرمی از جاذب با یک لیتر از محلول های کلرید کلسیم، منیزیم و سدیم یک مولار به طور جداگانه به مدت ۷ روز در حالت اشباع قرار داده شدند. در این مدت، جاذب ها روزانه به طور متناوب در طی سه مرحله و هر مرحله به مدت ۲ ساعت (جمعاً ۶ ساعت در روز) روی دستگاه شیکر دورانی با ۱۵۰ دور در دقیقه قرار گرفتند. سپس، جاذب های اشباع شده چندین بار با آب مقطر شسته شدند تا زمانی که مقدار کلراید قابل تشخیص با نیترات نقره صفر شد. در نهایت، نمونه ها در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت در آون خشک شدند (Lin et al., 2011).

اثر زمان تماس

به یک گرم از هر کدام از بنتونیت های اشباع شده، ۲۰ میلی لیتر از محلول های حاوی ۲۴ میلی اکیوالان در لیتر پتاسیم و ۶ میلی اکی والان در لیتر کاتیون همراه (کلسیم، منیزیم یا سدیم) اضافه شد. به این ترتیب کسر اکی والانی پتاسیم و کاتیون همراه در محلول های اولیه به ترتیب برابر ۰/۸ و ۰/۲ بود. برای تهیه محلول ها از نمک های کلریدی کاتیون های مورد نظر استفاده شد. pH اولیه محلول ها با استفاده از اسید کلریدریک ۰/۲ نرمال و سود ۰/۲ نرمال روی ۷ تنظیم شد. کاتیون همراه پتاسیم در محلول اضافه شده به هر بنتونیت با کاتیون اشباع کننده آن، یکسان بود. زمان های تماس برای بررسی سینتیک جذب شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۶۰ و ۱۴۴۰ دقیقه بودند. پس از هر زمان، سوپانسیون ها به مدت ۵ دقیقه با ۳۰۰۰ دور در دقیقه، سانتریفیوژ و سپس، محلول های رویین صاف شدند. پتاسیم و سدیم عصاره ها با دستگاه فلیم فوتومتر و کلسیم و منیزیم به روش کمپلکس سنجی با تیتراسیون اندازه گیری شدند. شدت جذب پتاسیم با گذشت زمان با استفاده از معادلات سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم مورد بررسی قرار گرفت. سینتیک

جذب، ارتباط بین غلظت جذب شونده توسط جاذب را نسبت به زمان نشان می دهد.

معادلات سینتیک شبه مرتبه اول (Ho and McKay, 1998) و دوم (Ho, 1995) به ترتیب به صورت زیر بیان می شوند:

$$\ln(q_f - q_t) = \ln q_f - k_1 t \quad (1)$$

$$t/q_t = 1/k_2 q_f^2 + t/q_f \quad (2)$$

در این معادلات، k_1 (min^{-1}) و k_2 ($\text{kg cmol}^{-1} \text{min}^{-1}$) به ترتیب سرعت جذب در معادلات شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم، q_t مقدار پتاسیم جذب شده توسط جاذب در زمان t و q_f حداکثر پتاسیم جذب شده (cmol kg^{-1}) می باشند.

اثر مقدار جاذب

برای بررسی اثر مقدار جاذب، مقادیر ۰/۱، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۱، ۱/۴ و ۲ گرم از هریک از بنتونیت های اشباع شده، وزن شد و به هر کدام ۲۰ سی سی محلول حاوی ۲۴ میلی اکی والان در لیتر پتاسیم و ۶ میلی اکی والان در لیتر کاتیون همراه (کلسیم، منیزیم و سدیم) با pH = ۷ اضافه شد. بعد از زمان تماس ۲۴ ساعت و سانتریفیوژ کردن سوپانسیون ها، مقدار پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در عصاره های به دست آمده، اندازه گیری شدند.

اثر pH

تأثیر pH بر ضریب انتخاب پذیری پتاسیم در دامنه ۳ تا ۹ مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تنظیم pH از اسید کلریدریک ۰/۲ نرمال و سود ۰/۲ نرمال استفاده شد. محلول اولیه حاوی ۲۴ میلی اکی والان در لیتر پتاسیم و ۶ میلی اکی والان در لیتر کاتیون همراه (کلسیم، منیزیم و سدیم)، نسبت جذب به محلول، ۱ به ۲۰ و زمان تماس، ۲۴ ساعت بود. پس از سانتریفیوژ و صاف کردن عصاره ها، مقدار پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در آن ها اندازه گیری شد.

ضرایب انتخاب پذیری

در محاسبه ضرایب انتخاب پذیری پتاسیم، فعالیت کاتیون های محلول از طریق حاصل ضرب ضریب فعالیت در غلظت آن ها در محلول رویین تعیین گردید. ضرایب فعالیت با استفاده از معادله دبای-هاکل توسعه یافته محاسبه شدند:

$$\text{Log } \gamma = -AZ^2 (\sqrt{I}/1 + Ba\sqrt{I}) \quad (3)$$

در این معادله، γ ، ضریب فعالیت یون، I ، قدرت یونی، Z بار ظرفیت یون، a پارامتر اختصاصی یون ($\text{\AA}$) و A و B به ترتیب برابر با 0.509 و 0.328 در دمای 25 درجه سانتی گراد هستند.

مقدار پتاسیم جذب شده (تبادلی) از رابطه زیر محاسبه شد:

$$Q_e = (C_0 - C_e) \times 2/S \quad (4)$$

مقدار کاتیون های همراه (کلسیم، منیزیم و سدیم) در فاز تبادلی با استفاده از رابطه زیر محاسبه شدند:

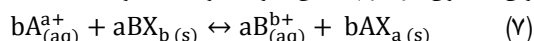
$$[cat]_{ex} = CEC - Q_e \quad (5)$$

درصد جذب (حذف) پتاسیم از فاز محلول از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{Adsorption (\%)} = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100 \quad (6)$$

Q_e مقدار پتاسیم تبادلی ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)، C_0 غلظت پتاسیم اولیه (meq L^{-1})، C_e غلظت پتاسیم تبادلی در فاز محلول (meq L^{-1})، S جرم جاذب (g) هستند.

با فرض این که جذب کاملاً برگشت پذیر است، تبادل کاتیونی را می توان با قانون اثر جرم به این صورت توصیف نمود:

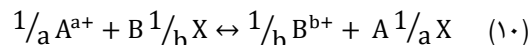


بر این اساس، ضرایب انتخاب پذیری گینز-توماس (K_{GT}) و وانسلو (K_V) با استفاده از روابط زیر به دست آمدند:

$$K_{GT} = (E_A)^b (m_B \times \gamma_B)^a / (E_B)^a (m_A \times \gamma_A)^b \quad (8)$$

$$K_V = (M_A)^b (m_B \times \gamma_B)^a / (M_B)^a (m_A \times \gamma_A)^b \quad (9)$$

ضریب انتخاب پذیری گاپون (K_G) بر اساس واکنش تبادلی زیر به دست آمد:



$$K_G = (E_A) (m_B \times \gamma_B)^{1/b} / (E_B) (m_A \times \gamma_A)^{1/a} \quad (11)$$

در معادلات بالا، M و E به ترتیب کسر مولی و کسر اکی والانی کاتیون های جذب شده در فاز تبادلی و m (مول در لیتر) و γ به ترتیب غلظت مولی و ضریب فعالیت کاتیون ها در فاز محلول هستند.

آزمایش هم دماهای جذب پتاسیم

آزمایش های ایزوترم پتاسیم در سیستم های دوتایی K-Ca، K-Mg و K-Na در دمای 25 درجه سانتی گراد انجام گرفتند. غلظت اولیه پتاسیم در محلول های مورد استفاده، 3 ، 6 ، 12 ، 18 ، 24 ، 27 و 30

میلی اکی والان در لیتر و غلظت کاتیون های همراه (کلسیم، منیزیم و سدیم) به ترتیب 27 ، 24 ، 18 ، 12 ، 6 و 3 میلی اکی والان در لیتر در نظر گرفته شد. به این ترتیب، کسر اکی والانی پتاسیم در محلول های مذکور به ترتیب برابر $1/8$ ، $1/4$ ، $1/6$ ، $1/8$ ، $1/9$ و 1 بود. pH اولیه این محلول ها روی 7 تنظیم شد. به $1/10$ گرم از جاذب های اشباع شده، 20 میلی لیتر از محلول های حاوی نسبت های مختلف پتاسیم و کاتیون همراه اضافه شد و بعد از 24 ساعت زمان تماس و سانتریفیوژ، محلول رویین، صاف و پتاسیم و سدیم با فلیم فوتومتر و کلسیم منیزیم با تیتراسیون قرائت شدند. سپس، منحنی ایزوترم پتاسیم رسم گردید و پارامترهای معادلات برازش شده، استخراج شدند.

معادلات ایزوترم مورد استفاده شامل خطی ساده (12)، فروندلیچ (13) و تمکین (14) بودند:

$$Q_e = K_d C_e \quad (12)$$

$$\log Q_e = \log K_f + 1/n \log C \quad (13)$$

$$Q_e = B \ln C_e + B \ln K_T \quad (14)$$

Q_e مقدار جذب پتاسیم در واحد جرم خاک (mmol kg^{-1})، K_d شیب معادله خطی ساده است غلظت تعادلی پتاسیم (mmol L^{-1})، K_f ثابت تعادل، n و K_T ثابت تعادلی ایزوترم تمکین و B ثابت های معادله فروندلیچ، K_T ثابت تعادلی ایزوترم تمکین و B ثابت مربوط به گرمای تبادل است که به صورت زیر محاسبه می شود:

$$B = RT/b_T \quad (15)$$

که در آن R ثابت گاز جهانی با مقدار $8.314 \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ، T دمای مطلق ($^\circ\text{K}$) و b_T گرمای تبادل (J mol^{-1}) است.

خطای استاندارد (SE) برازش معادلات ایزوترم به داده های آزمایشگاهی بر اساس رابطه زیر محاسبه شد:

$$SE = [\sum (q - q^*)^2 / (n - 2)]^{0.5} \quad (16)$$

q و q^* به ترتیب، مقادیر اندازه گیری شده و پیش بینی شده جذب پتاسیم و n تعداد داده مورد بررسی می باشند.

تجزیه واریانس داده ها بر اساس آزمایش فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم افزار SAS انجام گرفت. لازم به ذکر است جداول تجزیه واریانس در بخش نتایج ارائه نشده اند، اما معنی دار یا غیر معنی دار بودن اثرات فاکتورها در متن گزارش شده است.

نتایج و بحث

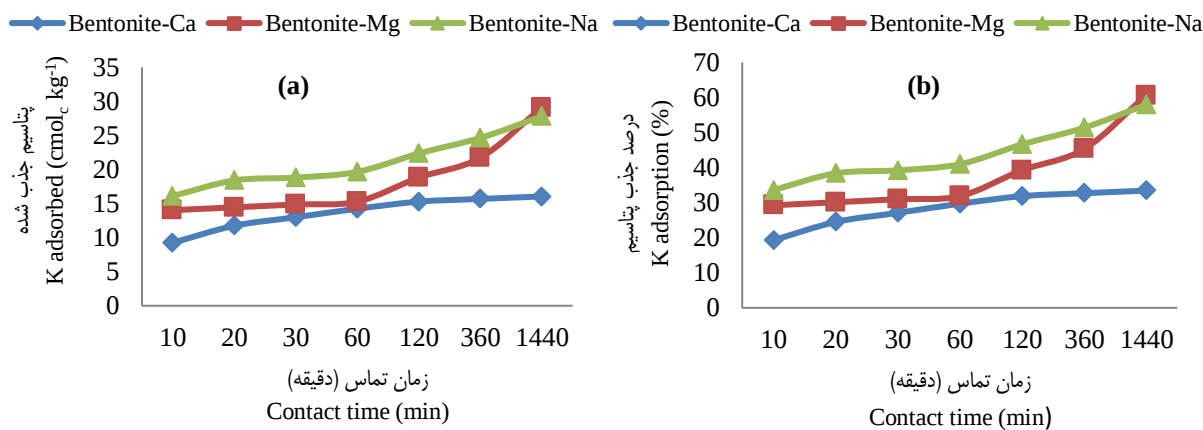
شکل ۲(ا) تأثیر زمان تماس بر مقدار جذب پتاسیم توسط بنتونیت را نشان می دهد. با افزایش زمان، مقدار جذب پتاسیم روند صعودی داشت؛ بدین صورت که در زمان تماس 24 ساعت، مقدار جذب پتاسیم حداکثر بود. جذب پتاسیم توسط بنتونیت سدیمی، در مقایسه با بنتونیت های منیزیمی و کلسیمی، در تمام زمان های تماس به استثنای زمان 24 ساعت بیشتر بود. نتیجه تجزیه واریانس نشان داد که اثرات

سدیمی کمتر از معادله شبه مرتبه دوم بود. با این حال، با توجه به ضریب تعیین (R^2) بالاتر و مقایسه نتایج حاصل از برازش مدل‌ها و نتایج آزمایشگاهی می‌توان گفت که معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم تطابق بهتری با داده‌ها داشت. باید توجه داشت که مقدار SE می‌تواند تابع مقیاس داده‌ها باشد. مقیاس داده‌ها در معادله شبه مرتبه اول، لگاریتمی است. بنابراین، مقدار SE نسبت به شرایطی که مقیاس داده‌ها غیر لگاریتمی باشد (مانند معادله شبه مرتبه دوم) می‌تواند کمتر محاسبه شود. به عبارت دیگر، مقایسه SE زمانی مناسب‌تر است که مقیاس داده‌ها برای برازش معادلات یکسان باشد. رنجبر و جلالی (Ranjbar and Jalali, 2016) نیز گزارش کردند که سینتیک جذب سدیم توسط بنتونیت، کاتولینیت و زئولیت اشباع شده با کلسیم و پتاسیم به خوبی با معادله شبه مرتبه دوم توصیف شد.

اشکال ۳(a) و ۳(b) به ترتیب تغییرات پتاسیم جذب شده و درصد جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های کلسیمی، منیزیمی و سدیمی را در دامنه ۰/۱-۲ گرم جاذب نشان می‌دهند. در بنتونیت اشباع شده با منیزیم و سدیم، روند نزولی در جذب پتاسیم با افزایش مقدار جاذب مشاهده شد؛ بدین صورت که در حضور ۰/۱ گرم جاذب، بیشترین مقدار جذب رخ داد. با این حال، بنتونیت کلسیمی بیشترین جذب پتاسیم را در مقدار ۰/۲ گرم جاذب نشان داد. نتیجه تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده مقدار جاذب و کاتیون اشباع کننده و اثر متقابل آنها بر جذب پتاسیم در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم جذب شده به ترتیب در حضور ۰/۱ گرم بنتونیت سدیمی و ۲ گرم بنتونیت کلسیمی برآورد شد.

ساده زمان تماس و کاتیون اشباع کننده و اثر متقابل آنها بر جذب پتاسیم در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم جذب شده به ترتیب مربوط به بنتونیت منیزیمی در زمان ۲۴ ساعت و بنتونیت کلسیمی در زمان ۱۰ دقیقه بود. شیب افزایش جذب پتاسیم با گذشت زمان در بنتونیت سدیمی و منیزیمی، به ویژه در زمان‌های ۲ تا ۲۴ ساعت، بیشتر از بنتونیت کلسیمی بود که می‌تواند بیانگر تأثیر بیشتر زمان تماس برای جذب پتاسیم در سیستم‌های تبادل Na-K و Mg-K نسبت به سیستم Ca-K باشد. شکل ۲(b) نشان می‌دهد که درصد جذب پتاسیم از فاز محلول در زمان تماس ۲۴ ساعت از این ترتیب تبعیت کرد: بنتونیت منیزیمی (۶۰/۶٪) > بنتونیت سدیمی (۵۷/۹٪) > بنتونیت کلسیمی (۳۳/۴٪). کسر اکی‌والانی پتاسیم جذب شده توسط بنتونیت کلسیمی، منیزیمی و سدیمی در زمان تماس ۲۴ ساعت به ترتیب برابر ۰/۱۲، ۰/۲۳ و ۰/۲۲ بود. رنجبر و جلالی (Ranjbar and Jalali, 2016) زمان ۲۴ ساعت را به عنوان زمان بهینه در ارزیابی جذب سدیم توسط جاذب‌های معدنی و آلی طبیعی و نانوذرات عامل‌دار شده به دست آوردند.

به منظور بررسی سینتیک جذب پتاسیم، از دو معادله سینتیکی شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم استفاده شد که پارامترهای آنها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. مقادیر جذب پتاسیم در زمان ۲۴ ساعت (q_t) که از برازش معادله شبه مرتبه دوم به دست آمد، نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده در این زمان بود. مقدار SE محاسبه شده برای برازش معادله شبه مرتبه اول به جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های منیزیمی و



شکل ۲- اثر زمان تماس بر مقدار (a) و درصد جذب (b) پتاسیم توسط بنتونیت

Figure 2- Effect of contact time on the amount of adsorbed K (a) and adsorption percentage (b) by bentonite

جدول ۱- پارامترهای معادلات سینتیک شبه مرتبه اول و شبه مرتبه دوم

Table 1- Parameters of pseudo-first-order and pseudo-second-order kinetic equations

جاذب Adsorbent	شبه مرتبه اول Pseudo-first-order				شبه مرتبه دوم Pseudo-second-order			
	k_1 (min ⁻¹)	q_f (cmol _c kg ⁻¹)	R^2	SE	k_2 (kg cmol _c ⁻¹ min ⁻¹)	q_f (cmol _c kg ⁻¹)	R^2	SE
Ca-bentonite	0.0075	3.96	0.805*	0.547	0.00803	16.1	1**	0.076
Mg-bentonite	0.0021	15.0	0.948**	0.072	0.00068	29.7	0.994**	1.524
Na-bentonite	0.0034	10.1	0.929**	0.142	0.00162	28.1	0.999**	0.582

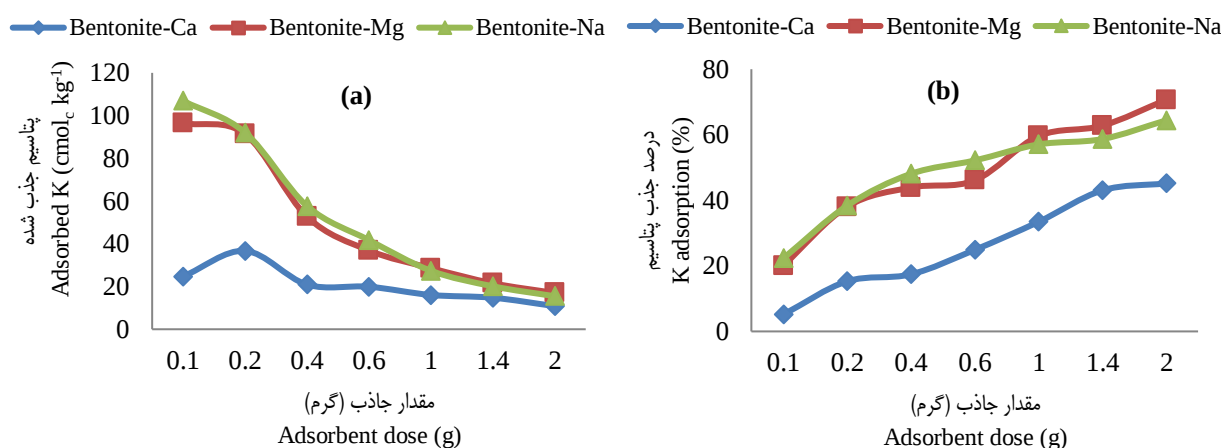
* و **: به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵ و ۱ درصد

*and **: significant at $p \leq 0.05$ and $p \leq 0.01$, respectively

مانند منیزیم در فاز تبادلی، کاهش پیدا می‌کند. بنابراین، از تمایل فاز تبادل گر برای جذب منیزیم نسبت به کاتیون‌های یک ظرفیتی کاسه می‌شود (Shainberg *et al.*, 1980). مقایسه ۱ شکل (a) و ۳(b)، رابطه عکس بین روند تغییرات مقدار پتاسیم جذب شده و درصد جذب پتا سیم را نشان می‌دهد. با افزایش مقدار جاذب، مقدار پتا سیم جذب شده به ازای جرم بزرگتری از جاذب محاسبه می‌شود و در نتیجه، عدد محاسبه شده نسبت به زمانی که جرم کوچکتری از جاذب در نظر گرفته شده است، کوچکتر خواهد شد. شکل ۳(b) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار جاذب، درصد بیشتری از پتاسیم اولیه توسط جاذب، جذب شده است.

یکی از تأثیرگذارترین پارامترها بر جذب یون‌های فلزی، pH می‌باشد. اشکال (a) و ۴(b) به ترتیب تأثیر pH را بر پتاسیم جذب شده و درصد جذب پتا سیم در دامنه ۹-۳ نشان می‌دهند. در هر سه حالت اشباع، با افزایش pH، مقدار پتاسیم جذب شده افزایش یافت؛ به گونه‌ای که در pH برابر ۹ به بیشترین مقدار خود رسید. این نتایج با یافته‌های پاگانلی و همکاران (Pagnanelli *et al.*, 2003) و رنجبر و جلالی (Ranjbar and Jalali, 2016) مطابقت دارد.

با کاهش مقدار جاذب، امکان پراکنش آن در سو سپانسیون و در نتیجه، در دسترس قرار گرفتن مکان‌های جذب، افزایش پیدا می‌کند. در مقابل، با افزایش مقدار جاذب، امکان برخورد ذرات و همآوری آن‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، سطح ویژه و تعداد مکان‌های جذب کاهش پیدا می‌کند. بیشترین میزان جذب پتاسیم در هر سه حالت اشباع، در بنتونیت سدیمی و کمترین آن در بنتونیت کلسیمی رخ داد. از آنجا که کلسیم قدرت جذب بالاتری نسبت به منیزیم، سدیم و پتا سیم دارد. بنابراین، سخت‌تر آزاد می‌شود. در مقابل، سدیم قدرت جذب پایین‌تری نسبت به پتا سیم دارد. به عبارت بهتر، سدیم سهولت جایگزینی بالاتری نسبت به پتا سیم دارد، زیرا سدیم با شعاع آب‌پوشی بزرگ‌تر، با نیروی ضعیف‌تری جذب می‌شود. بنابراین، پتا سیم آسان‌تر می‌تواند جایگزین سدیم شود. نتیجه جالب توجه در شباهت بیشتر رفتار بنتونیت منیزیمی به بنتونیت سدیمی نسبت به بنتونیت کلسیمی بود. این نتیجه را می‌توان با تشکیل گونه کمپلکس یونی $MgCl^+$ و افزایش رقابت پتا سیم با آن برای جذب روی مکان‌های تبادلی و شعاع آب‌پوشی بزرگ منیزیم مرتبط دانست. از سوی دیگر، پتانسیل منفی در لایه پخشیده دوگانه در حضور مقادیر بالای کاتیون‌های دو ظرفیتی



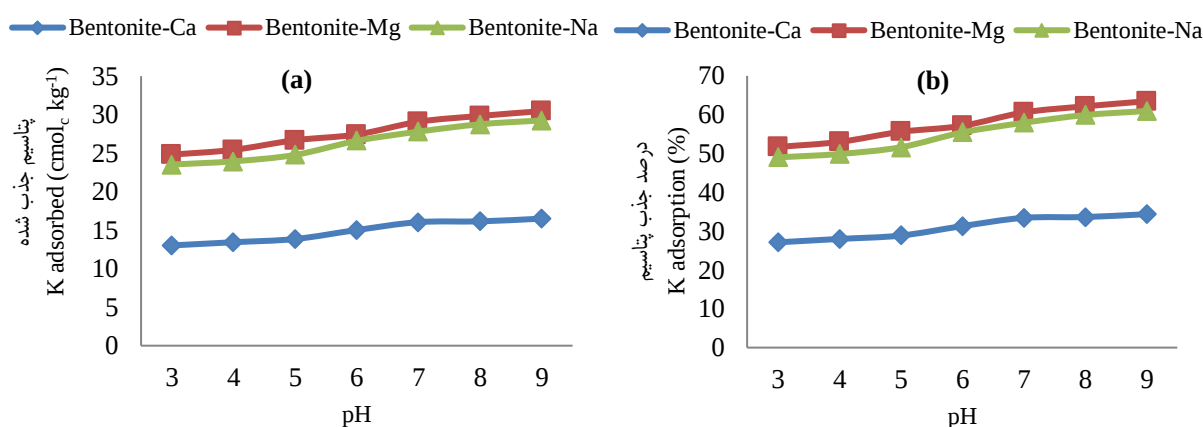
شکل ۳- اثر مقدار جاذب بر مقدار (a) و درصد جذب (b) پتاسیم توسط بنتونیت

Figure 3- Effect of adsorbent dose on the amount of adsorbed K (a) and adsorption percentage (b) by bentonite

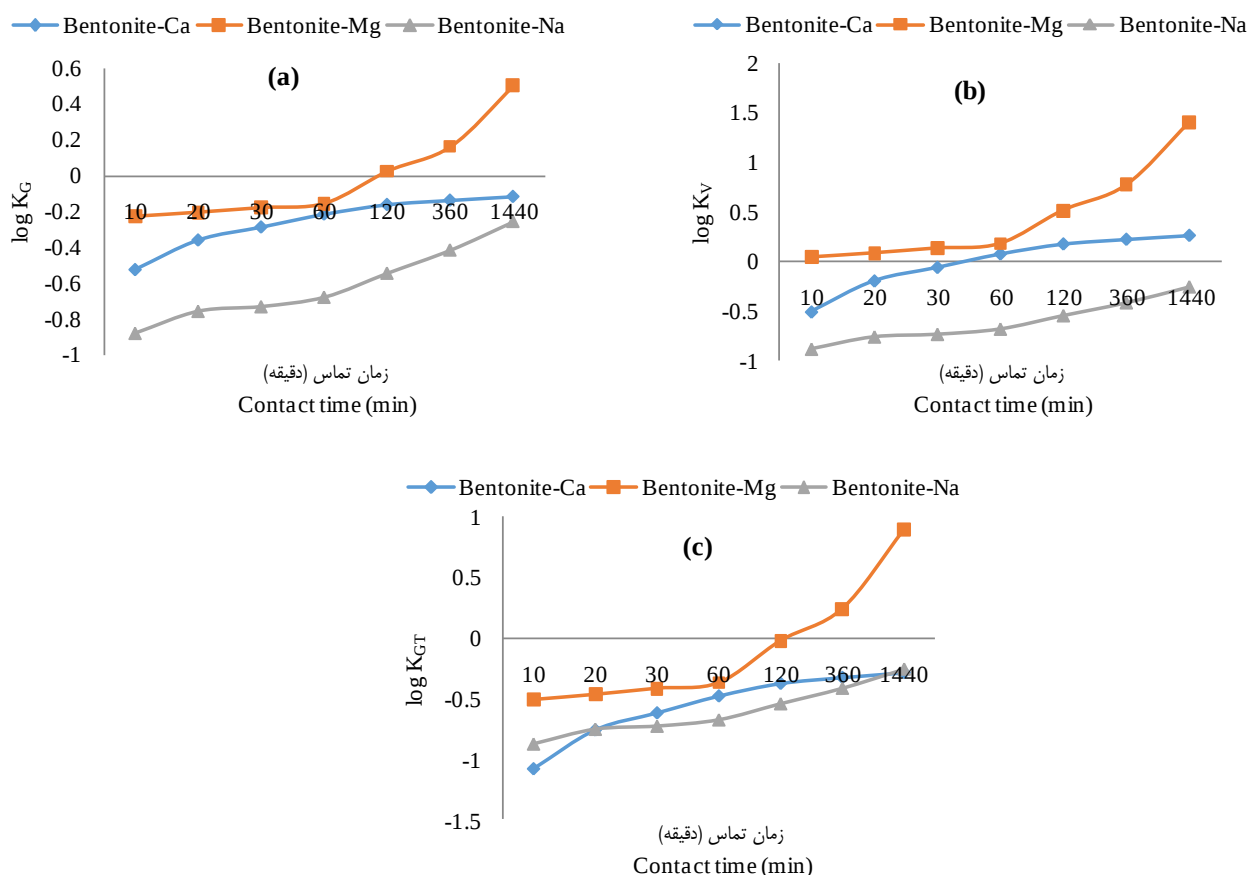
جاذب و زمان تماس ۲۴ ساعت انجام شد (شکل ۴). با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر زمان تماس (شکل ۲) و مقدار جاذب (شکل ۳)، جذب پتاسیم توسط ۱ گرم بنتونیت منیزیمی در زمان تماس ۲۴ ساعت، کمی بیشتر از ۱ گرم بنتونیت سدیمی در همان زمان بود. نتایج بررسی اثر pH بر جذب پتاسیم نیز این موضوع را تأیید نمود (شکل ۴).

شکل ۵ روند تغییرات ضرایب انتخاب‌پذیری گاپون (K_G)، وانسلو (K_V) و گینز-توماس (K_{GT}) را برای پتاسیم در زمان‌های تماس مختلف نشان می‌دهد. با افزایش زمان تماس، مقدار ضرایب برای تمام جاذب‌ها افزایش یافت. نتایج بیانگر این است که زمان تماس جاذب و محلول نیز می‌تواند بر انتخاب‌پذیری کاتیون‌ها توسط فاز جامد مؤثر باشد. نکته قابل توجه این است که مقادیر این ضرایب در تبادل هم‌ظرفیت (Na-K) را نمی‌توان با مقادیر به دست آمده در تبادل ناهم‌ظرفیت (Ca-K و Mg-K) مقایسه کرد. مقادیر بزرگتر ضرایب در سیستم تبدیلی Mg-K نسبت به سیستم Ca-K بیانگر ترجیح‌پذیری بیشتر پتاسیم در حضور منیزیم نسبت به کلسیم است. با مقایسه نتایج مربوط به جذب پتاسیم در زمان‌های تماس مختلف (شکل ۲) و ضرایب انتخاب‌پذیری محاسبه شده (شکل ۵) می‌توان گفت ضرایب گاپون و گینز-توماس بهتر از ضریب وانسلو، ترجیح‌پذیری پتاسیم با گذشت زمان را نشان دادند. مقادیر مثبت لگاریتم ضرایب انتخاب‌پذیری بیانگر ترجیح پتاسیم نسبت به کاتیون‌های اشباع‌کننده و مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم ترجیح‌پذیری پتاسیم است. بر این اساس، پتاسیم در هیچ‌کدام از زمان‌های تماس، به سدیم ترجیح داده نشده است، در حالی که، نتایج، جایگزینی سدیم تبدیلی توسط پتاسیم با گذشت زمان را نشان دادند (شکل ۲).

نتیجه تجزیه واریانس نشان داد که اثرات ساده pH و کاتیون‌های اشباع‌کننده بر جذب پتاسیم در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود، اما اثر متقابل آنها معنی‌دار نشد. بیشترین و کمترین مقدار پتاسیم جذب شده به ترتیب مربوط به بنتونیت منیزیمی در pH ۹ و بنتونیت کلسیمی در pH ۳ بود. افزایش جذب پتاسیم با شیب ملایم نشان می‌دهد که بار سطحی در این جاذب معدنی عمدتاً از نوع بار دائمی ناشی از جایگزینی هم‌شکل است و بارهای وابسته به pH کمی دارد. در نتیجه، افزایش بارهای منفی و به دنبال آن، افزایش جذب پتاسیم، کمتر تحت تأثیر تغییر pH قرار می‌گیرد (Jalali, 2012). بر اساس نتایج XRD (شکل ۱)، کانی غالب در بنتونیت، رس ۲:۱ مونت موریلونیت بود که عمدتاً دارای بار منفی دائم است. افزایش بار منفی آلومینوسیلیکات‌ها با افزایش pH می‌تواند در اثر از دست دادن پروتون توسط گروه‌های سیلانول ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) و آلومینول ($\equiv\text{Al}-\text{OH}_2\text{OH}$) لایه‌ای رخ دهد (Sparks, 2003). لگاریتم منفی ثابت اسیدی (pK_a) گروه‌های مذکور برای مونت موریلونیت به ترتیب ۷ و ۸/۳ گزارش است (Liu et al., 2013). میزان جذب پتاسیم توسط بنتونیت سدیمی و منیزیمی در تمام pH‌ها، تقریباً به یک اندازه و در عین حال، بیشتر از بنتونیت کلسیمی صورت گرفت. تمایل یکسان مکان‌های جذب بنتونیت برای سدیم و منیزیم، تشکیل گونه یک ظرفیتی MgCl^+ در فاز محلول و شعاع آب‌پوشی بزرگ منیزیم را می‌توان از عوامل مؤثر بر شباهت رفتار منیزیم و سدیم در سیستم‌های تبدیلی مورد مطالعه دانست. همچنین، به دلیل شعاع هیدراته بزرگ منیزیم، حضور این کاتیون به عنوان کاتیون اشباع‌کننده فاز تبدیلی بنتونیت، می‌تواند موجب پراکنش جاذب در سو سیانسیون و افزایش دسترسی مکان‌های جذب برای پتاسیم شود. لازم به ذکر است که بررسی تأثیر pH در حضور ۱ گرم



شکل ۴- اثر pH بر مقدار (a) و درصد جذب (b) پتاسیم توسط بنتونیت
Figure 4- Effect of pH on the amount of adsorbed K (a) and adsorption percentage (b) by bentonite



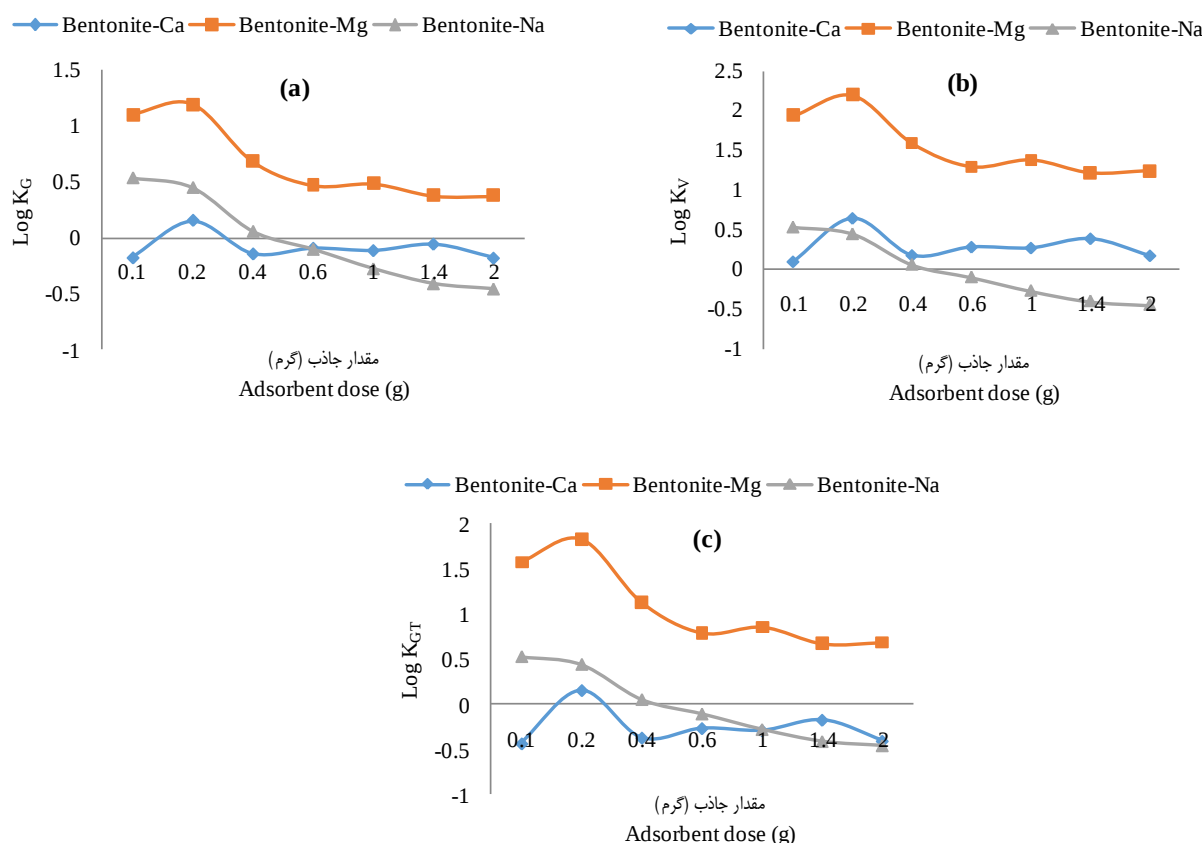
شکل ۵- تغییرات ضرایب انتخاب پذیری گاپون (a)، وانسلو (b)، گینز-توماس (c) با تغییر زمان تماس

Figure 5- Variation in Gapon (a), Vanselow (b), and Gaines-Thomas selectivity coefficients by changing contact time

رخ داد، در حالی که، بیشترین مقدار ضرایب انتخاب پذیری برای ۰/۲ گرم از این جاذب به دست آمد. لگاریتم هر سه ضریب برای تمام مقادیر بنتونیت منیزیمی، مثبت بود که بیانگر ترجیح پتاسیم نسبت به منیزیم است. ضرایب انتخاب پذیری پتاسیم در حضور مقادیر ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۴ گرم بنتونیت سدیمی بزرگتر از یک بودند که نشان دهنده ترجیح پتاسیم به سدیم در این شرایط است. لگاریتم ضریب وانسلو در تمام مقادیر بنتونیت کلسیمی، مثبت بود، در حالی که، لگاریتم ضرایب گاپون و گینز-توماس فقط در مقدار ۰/۲ گرم این جاذب مثبت بود و برای سایر مقادیر جاذب، منفی شد. مقایسه نتایج بررسی اثر پارامتر مقدار جاذب (شکل ۳) با نتایج ضرایب انتخاب پذیری (شکل ۶) نشان می دهد که این ضرایب نمی توانند ملاک قطعی برای قضاوت در مورد ترجیح پذیری یک کاتیون نسبت به کاتیون دیگر برای جذب در مکان های تبادلی باشند.

بنابراین، تنها با ساس ضرایب انتخاب پذیری نمی توان به نتیجه قطعی در مورد ترجیح پذیری یا عدم آن در سیستم های تبادل کاتیونی رسید. به دلیل استفاده از کسر مولی در محاسبه ضریب وانسلو، مقدار عددی این ضریب در تبادل ناهم ظرفیت نسبت به ضرایب گینز-توماس و گاپون بالاتر است. از این رو، مقادیر ضریب وانسلو برای زمان های تماس ۱، ۲، ۶ و ۲۴ ساعت در بنتونیت کلسیمی، بزرگتر از یک بود، در حالی که، مقادیر ضرایب گاپون و گینز-توماس در این زمان ها کوچکتر از یک بودند.

شکل ۶ روند تغییرات ضرایب انتخاب پذیری پتاسیم را با تغییر مقدار جاذب نشان می دهد. بیشترین ترجیح پذیری پتاسیم در بنتونیت سدیمی در مقدار ۰/۱ گرم و در بنتونیت های کلسیمی و منیزیمی در مقدار ۰/۲ گرم جاذب مشاهده شد. با افزایش مقدار جاذب، این ضرایب روند نزولی را نشان دادند. بررسی اثر مقدار جاذب (شکل ۳) نشان داد که بیشترین مقدار جذب پتاسیم در حضور ۰/۱ گرم بنتونیت منیزیمی



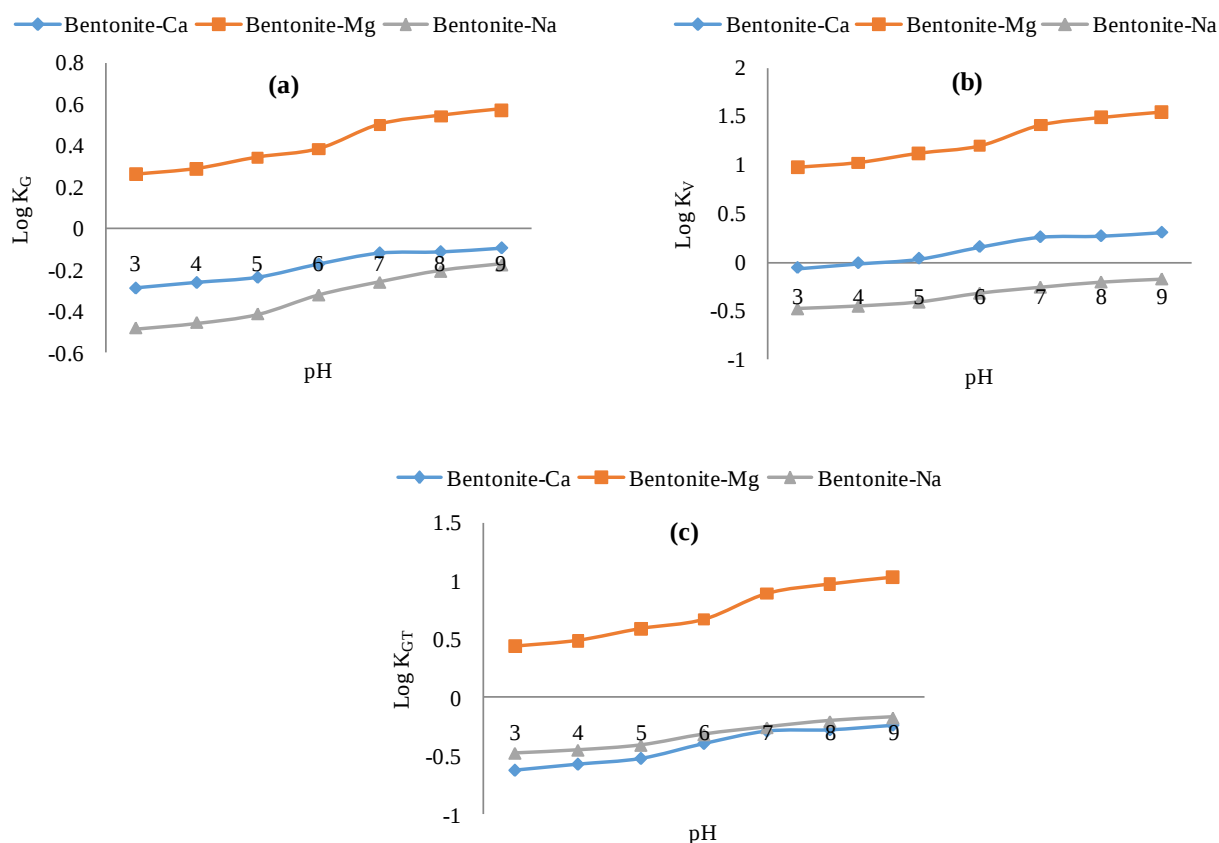
شکل ۶- تغییرات ضرایب انتخاب پذیری گاپون (الف)، وانسلو (ب)، گینز-توماس (ج) با تغییر مقدار جاذب
Figure 6- Variation in Gapon (a), Vanselow (b), and Gaines-Thomas selectivity coefficients by changing adsorbent dose

pH قرار دارد.

نتایج ایزوترم‌های تبادلی پتا سیم در سیستم‌های دوتایی K-Ca، K-Mg و K-Na در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش غلظت اولیه پتا سیم، مقدار جذب پتا سیم روند صعودی داشت؛ به گونه‌ای که حداکثر جذب پتا سیم، در بالاترین غلظت اولیه پتا سیم، یعنی ۳۰ میلی اکسی‌والان در لیتر پتاسیم (معادل کسر اکسی‌والانی ۱)، مشاهده شد. جلالی و همکاران (Jalali et al., 2020) با بررسی ضرایب انتخاب پذیری پتاسیم، سدیم، کلسیم و منیزیم در سیستم‌های دوتایی در برخی خاک‌های آهکی، افزایش جذب کاتیون‌ها با افزایش غلظت اولیه آن‌ها در خاک را گزارش کردند.

نتایج برازش معادلات خطی ساده، فروندلیچ و تمکین به داده‌های ایزوترم پتاسیم در جدول ۲ ارائه شده است. بیشترین مقدار جذب پتا سیم در بنتونیت سدیمی و کمترین آن در بنتونیت کلسیمی رخ داد. ضریب جذب خطی در معادله خطی ساده (K_d) به خوبی نشان داد که جذب پتاسیم در بنتونیت سدیمی نسبت به دو حالت اشباع دیگر بیشتر بود. بیشترین مقدار K_d ۵۶/۰ لیتر در کیلوگرم و کمترین آن، ۱۱/۹ لیتر در کیلوگرم، به ترتیب در بنتونیت سدیمی و بنتونیت کلسیمی به دست آمد.

شکل ۷ نشان می‌دهد لگاریتم ضرایب انتخاب پذیری پتا سیم با افزایش pH، روند صعودی داشت. لگاریتم هر سه ضریب انتخاب پذیری در بنتونیت منیزیمی در دامنه pH ۳-۹، مثبت بود که بیان‌کننده ترجیح پتا سیم نسبت به منیزیم است. بر اساس ضرایب گاپون و وانسلو، بنتونیت کلسیمی در هیچ بازه‌ای از pH، ترجیحی برای جذب پتاسیم نشان نداد، در حالی که مقدار مثبت لگاریتم ضریب وانسلو در دامنه pH ۵-۹ بیانگر ترجیح پذیری پتاسیم نسبت به کلسیم در این شرایط است. لگاریتم هر سه ضریب انتخاب پذیری برای بنتونیت سدیمی در دامنه pH مورد مطالعه منفی بود. این نتیجه شاید به دلیل ناکافی بودن غلظت اولیه پتاسیم و یا کم بودن تعداد مکان‌های ترجیحی برای جذب پتاسیم نسبت به سدیم در بنتونیت باشد. با این حال، مقایسه نتایج اثر pH بر جذب پتا سیم (شکل ۴) نشان داد که جذب پتاسیم توسط بنتونیت سدیمی تقریباً مشابه بنتونیت منیزیمی رخ داده است. بنابراین، تنها بر اساس نتایج ضرایب انتخاب پذیری نمی‌توان ترجیح پذیری یا عدم ترجیح پذیری یک کاتیون را مشخص نمود. بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ترجیح پذیری پتا سیم در بنتونیت، تحت تأثیر شعاع آب‌پوشی کاتیون‌های موجود در سیستم تبادلی، مقدار جاذب، نوع کاتیون اشباع‌کننده، زمان تماس و



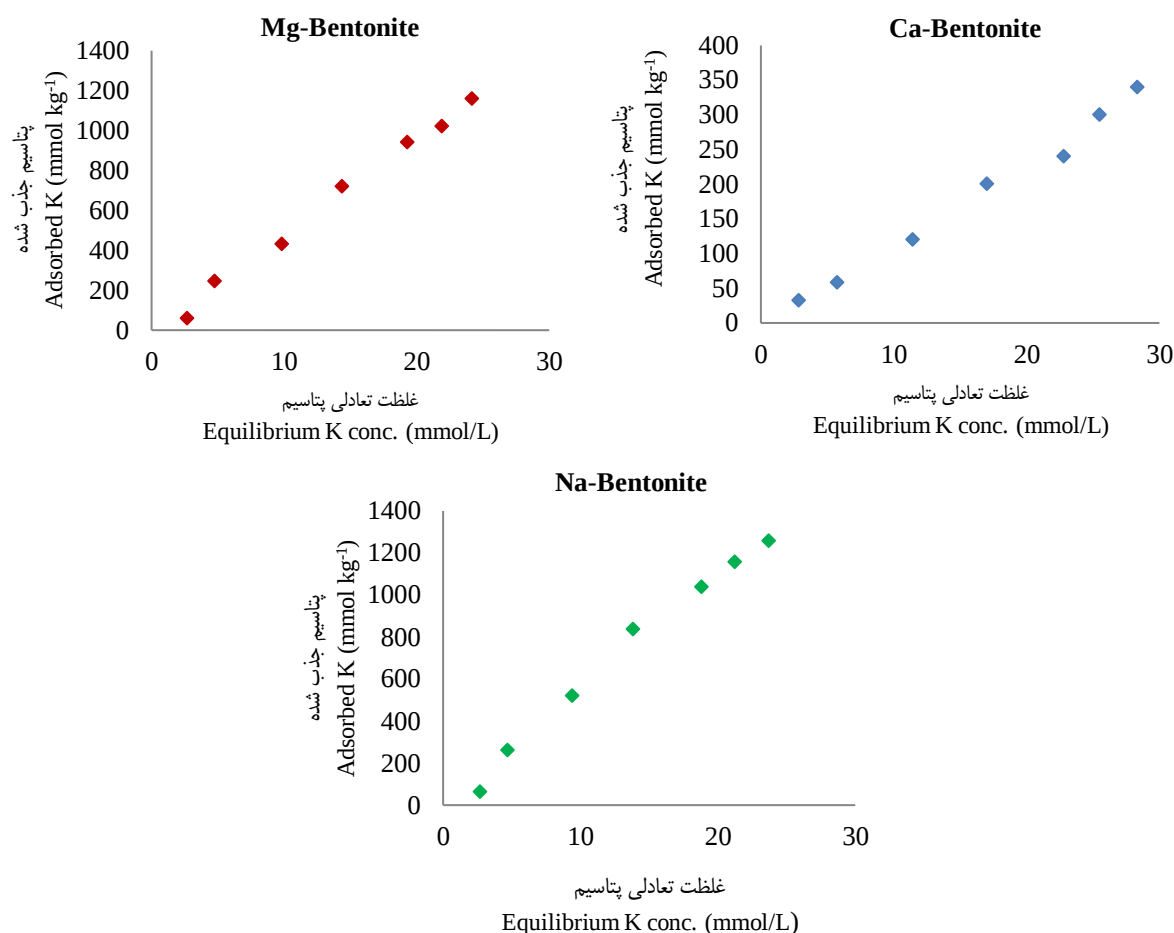
شکل ۷- تغییرات ضرایب انتخاب پذیری گاپون (a)، وانسلو (b)، گینز-توماس (c) با تغییر pH

Figure 7- Variation in Gapon (a), Vanselow (b), and Gaines-Thomas selectivity coefficients by changing pH

کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب برای بنتونیت کلسیمی و بنتونیت سدیمی برآورد شد. پارامتر b_T ، گرمای تبادل در معادله تمکین، به ترتیب برای بنتونیت‌های سدیمی، منیزی و کلسیمی برابر ۴/۵، ۵/۰ و ۱۹/۱ ($J \text{ mol}^{-1}$) به دست آمد. بالاتر بودن گرمای تبادل در جاذب‌های کلسیمی نسبت به انواع منیزی و سدیمی نشان می‌دهد برای جایگزینی کلسیم تبدالی توسط پتاسیم، انرژی بیشتری مورد نیاز است.

با توجه به مقادیر به دست آمده برای ضرایب تعیین (R^2)، می‌توان اظهار داشت هر سه معادله خطی ساده، فروندلیچ و تمکین به خوبی توانستند فرآیند جذب را توصیف کنند. بالاترین مقدار ضریب تعیین برای معادله خطی ساده و کمترین خطای استاندارد برای معادله فروندلیچ به دست آمد (جدول ۲). باید توجه داشت که مقیاس داده‌های جذب در برازش معادلات خطی ساده و تمکین، غیر لگاریتمی و در معادله فروندلیچ، لگاریتمی است. بنابراین، خطای استاندارد کوچکتر در برازش معادله فروندلیچ می‌تواند تحت تأثیر مقیاس کوچکتر داده‌ها قرار داشته باشد.

علت جذب بالای پتاسیم در بنتونیت سدیمی را می‌توان به سهولت جایگزینی سدیم توسط پتاسیم در مقایسه با کلسیم و منیزیم نسبت داد. در معادله فروندلیچ، K_f و n به ترتیب بیانگر کمیت جذب و انرژی جذب هستند. مقدار بزرگ K_f نشان می‌دهد که مقدار بیشتری از پتاسیم در مکان‌های تبدالی جذب شده است و K_f کوچک، بیانگر جذب پایین کاتیون مورد نظر در سطوح جامد و به عبارتی، نشان‌دهنده ی مقدار بیشتر کاتیون در فاز محلول است. بیشترین مقدار K_f برای بنتونیت سدیمی با مقدار ۲۵/۷ و کمترین مقدار آن در بنتونیت کلسیمی با مقدار ۱۰/۲ لیتر در کیلوگرم به دست آمد. مقدار n از ۰/۷۸۳ تا ۰/۹۶۹ متغیر بود که کمترین و بیشترین مقدار آن به ترتیب مربوط به بنتونیت سدیمی و بنتونیت کلسیمی بود. به عبارت دیگر، پتاسیم برای جذب توسط بنتونیت سدیمی و جایگزینی سدیم تبدالی به انرژی کمتری در مقایسه با بنتونیت کلسیمی و منیزی نیاز دارد. در معادله تمکین، جذب پتاسیم تابعی از لگاریتم غلظت تعادلی آن در محلول می‌باشد. پارامتر K_T که ثابت تعادل تمکین می‌باشد، در دامنه ۰/۳۲۶ تا ۰/۳۵۸ به دست آمد. پارامتر b ، شیب معادله تمکین و بیانگر ثابت گرمای تبادل است که در گستره ۱۳۰ تا ۵۵۰ متغیر بود و



شکل ۸- ایزوترم‌های جذب پتاسیم در بنتونیت‌های کلسیمی، منیزیمی و سدیمی
Figure 8- K adsorption isotherms in Ca-, Mg-, and Na-bentonite

جدول ۲- پارامترهای حاصل از برازش معادلات ایزوترم بر جذب پتاسیم
Table 2- Parameters obtained from fitting isotherm equations to K adsorption

جاذب Adsorbent	خطی ساده Simple linear			n	فروندلیچ Freundlich				تمکین Temkin			
	K _d	R ²	SE		K _f	R ²	SE	K _T	B	b _T	R ²	SE
	L kg ⁻¹				L kg ⁻¹					J mol ⁻¹		
Ca-Bentonite	11.9	0.990**	12.8	0.969	10.2	0.995**	0.029	0.326	130	19.1	0.893**	42.5
Mg-Bentonite	49.6	0.993**	37.4	0.794	22.8	0.954**	0.109	0.348	489	5.01	0.946**	106
Na-Bentonite	56.0	0.988**	54.6	0.783	25.7	0.958**	0.105	0.358	550	4.50	0.969**	440

** : معنی‌دار در سطح ۱٪

** : significant at $p \leq 0.01$

نتیجه‌گیری

زمان‌های تماس به استثنای زمان ۲۴ ساعت بیشتر بود. معادله سینتیکی شبه مرتبه دوم نسبت به معادله شبه مرتبه اول بهتر توانست روند جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌ها را با گذشت زمان توصیف نماید. جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های اشباع شده با منیزیم و سدیم، با افزایش مقدار جاذب در دامنه ۰/۱-۲ گرم، روند نزولی داشت، در

جذب پتاسیم توسط بنتونیت‌های کلسیمی، منیزیمی و سدیمی با افزایش زمان تماس، افزایش پیدا کرد و در زمان ۲۴ ساعت به بیشترین مقدار خود رسید. مقدار پتاسیم جذب شده توسط بنتونیت سدیمی، در مقایسه با بنتونیت‌های منیزیمی و کلسیمی، در تمام

نشان داد که این ضرایب نمی‌توانند ملاک قطعی برای قضاوت در مورد ترجیح‌پذیری یک کاتیون نسبت به کاتیون دیگر برای جذب در مکان‌های تبدیلی باشند. بررسی ایزوترم جذب پتاسیم توسط بنتونیت نشان داد با افزایش کسر اکیوالانی پتاسیم محلول، مقدار جذب پتاسیم روند صعودی داشت؛ به گونه‌ای که حداکثر جذب پتاسیم، به ازای بیشترین غلظت اولیه پتاسیم (معادل بیشترین کسر اکیوالانی پتاسیم محلول)، مشاهده شد. با توجه به ضریب جذب خطی (K_d)، جذب پتاسیم در بنتونیت سدیمی بیشتر از بنتونیت‌های منیزیمی و کلسیمی بود. هر سه معادله خطی ساده، فروندلیچ و تمکین به خوبی توانستند فرآیند جذب را توصیف کنند. بیشترین مقدار ضریب تعیین برای معادله خطی ساده و کمترین خطای استاندارد برای معادله فروندلیچ به دست آمد.

حالی که، بنتونیت کلسیمی بیشترین جذب پتاسیم را در مقدار ۰/۲ گرم نشان داد. با افزایش pH، در صد جذب پتاسیم از فاز محلول افزایش یافت؛ به گونه‌ای که در pH برابر ۹ به بیشترین مقدار خود رسید. میزان جذب پتاسیم توسط بنتونیت سدیمی و منیزیمی در تمام pHها، تقریباً به یک اندازه و در عین حال، بیشتر از بنتونیت کلسیمی صورت گرفت. نتیجه جالب توجه در شباهت بیشتر رفتار بنتونیت منیزیمی به بنتونیت سدیمی نسبت به بنتونیت کلسیمی بود. تمایل یکسان مکان‌های جذب بنتونیت برای سدیم و منیزیم، تشکیل گونه یک ظرفیتی $MgCl^+$ در فاز محلول و شعاع آب‌پوشی بزرگ منیزیم را می‌توان از عوامل مؤثر بر شباهت رفتار منیزیم و سدیم در سیستم‌های تبدیلی مورد مطالعه دانست. ضرایب انتخاب‌پذیری وانسلو، گینز-توماس و گاپون تحت تأثیر زمان تماس، مقدار جاذب و pH تغییر کردند. مقایسه نتایج بررسی اثر فاکتورهای اشاره شده با نتایج ضرایب انتخاب‌پذیری

منابع

- Bower, C.A., Reitmeir, R.F., & Fireman, M. (1952). Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Science* 73: 251–261. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-195204000-00001>.
- Braz, A.M.S., Fernandes, A.R., Ferreira, J.R., & Alleoni, L.R.F. (2013). Prediction of the distribution coefficients of metals in Amazonian soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 95: 212–220. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2013.05.007>.
- Evangelou, V.P., & Lumbanraja, J. (2002). Ammonium-potassium-calcium exchange on vermiculite and hydroxy-aluminum vermiculite. *Soil Science Society of America Journal* 66(2): 445–455. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.4450>.
- Ho, Y.S. (1995). *Adsorption of heavy metals from waste streams by peat*. Ph.D Thesis, University of Birmingham, Birmingham. <http://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/8742>.
- Ho, Y.S., & McKay, G. (1998). A comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. *Process Safety and Environmental Protection* 76(4): 332–340. <https://doi.org/10.1205/0957582985296966>.
- Jalali, M. (2012). *Soil Fertility*. Bu Ali Sina University Publishing. 541 pages. (In Persian)
- Jalali, M., Mohammadi Arian, T., & Ranjbar, F. (2020). Selectivity coefficients of K, Na, Ca, and Mg in binary exchange systems in some calcareous soils. *Environmental Monitoring and Assessment* 192: 80. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-8022-y>.
- Khalilirad, M., & Towfighi, H. (2017). Binary K-Ca exchange on a clay separated from a soil with dominant illite (mica) mineralogy: 2- Determination of selectivity coefficients and thermodynamic parameters and effects of K-depletion on them. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 48(3): 599–612. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.209678.667477>. (In Persian)
- Lin, J., Yanhui, Zh., & Zhiliang, Zh. (2011). Evaluation of sediment cropping with active barrier systems (ABS) using calcite/zeolite mixtures to simultaneously manage phosphorus and ammonium release. *Science of Total Environment* 409: 638–646. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.031>.
- Liu, X., Lu, X., Sprik, M., Cheng, J., Meijer, E.J., & Wang, R. (2013). Acidity of edge surface sites of montmorillonite and kaolinite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 117: 180–190. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.04.008>.
- Malakouti, M.J., Shahabi, A.A., & Bazargan, K. (2016). *Potassium in agriculture: the role of potassium in the production of healthy agricultural products*. Moballeghan Publishing. 352 pages. (In Persian with English abstract)
- Pagnanelli, F., Esposito, A., Toro, L., & Veglio, F. (2003). Metal speciation and pH effect on Pb, Cu, Zn and Cd biosorption onto *Sphaerotilus natans*: Langmuir-type empirical model. *Water Research* 37(3): 627–633. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00358-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00358-5).
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2009). Adsorption of copper (II), chromium (III), nickel (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by Meranti sawdust. *Journal of Hazardous Materials* 170: 969–977. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.066>.
- Ranjbar, F., & Jalali, M. (2016). Empirical and mechanistic evaluation of sodium exchange isotherms on natural mineral and organic adsorbents and organically functionalized nanoparticles. *International Journal of*

- Environmental Science and Technology* 13(8): 1891–1916. <http://dx.doi.org/10.1007/s13762-016-0983-6>.
15. Shaheen, S.M., Tsadilas, C.D., & Rinklebe, J. (2013). A review of the distribution coefficients of trace elements in soils: Influence of sorption system, element characteristics, and soil colloidal properties. *Advances in Colloid and Interface Science* 201: 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.10.005>.
16. Shainberg, I., Oster, J.D., Wood, J.D. (1980). Sodium/calcium exchange in montmorillonite and illite suspensions. *Soil Science Society of America Journal* 44: 960–964. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050017x>.
17. Sparks, D.L. (2003). *Environmental Soil Chemistry*. Elsevier. 345 pages.
18. Takahashi, Y., Dahlgren, R.A., Kanno, H., Nanzyo, M., & Takahashi, T. (2018). Mechanisms for high potassium selectivity of soils dominated by halloysite from northern California, USA. *Soil Science and Plant Nutrition* 64(1): 90–99. <https://doi.org/10.1080/00380768.2017.1411167>.
19. Visconti, F., De Paz, J.M., & Rubio, J.L. (2012). Choice of selectivity coefficients for cation exchange using principal components analysis and bootstrap ANOVA of coefficients of variation. *European Journal of Soil Science* 63(4): 501–513. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01474.x>.



Comparison of Machine Learning Methods in the Selection of Predictors of Atmospheric-Ocean General Circulation Models

M. Amirabadizadeh^{1*}, M. Forozanmehr², M. Yaghoobzadeh³, S. Hoseinabadi⁴

Received: 11-05-2022

Revised: 29-09-2022

Accepted: 30-11-2022

Available Online: 30-11-2022

How to cite this article:

Amirabadizadeh, M., Forozanmehr, M., Yaghoobzadeh, M., & Hoseinabadi, S. (2023). Comparison of Machine Learning Methods in the Selection of Predictors of Atmospheric-Ocean General Circulation Models. *Journal of Water and Soil* 37(1): 129-143. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76605.1166>

Introduction

Nowadays, climate change is one of the human challenges in the exploitation and management of water resources. Temperature along with precipitation is one of the most important climatic elements and is one of the main factors in zoning and climatic classification. Due to location of Iran within the drought belt and proximity to the high-pressure tropical zone, this country has an arid and semi-arid climate and suffers from drought in majority of years. Therefore, temperature fluctuations and variability are important issues, and make the study of temperature changes a necessity. In the current study, four data mining algorithms in selecting predictors for downscaling of maximum temperature in Birjand synoptic station have been studied, compared and the superior algorithm has been introduced. As the number of large scale features are high, selection of machine learning algorithm will play as an important role in statistical downscaling of climatic variables such as maximum temperature.

Materials and Methods

Today, the data set is such that many variables are used to describe the climatic phenomenon in environmental studies. As the number of data is huge, choosing the predictors is one of the most important steps in preprocessing machine learning. In this study, four machine learning methods including stochastic approximation of simultaneous turbulence (SPSA), Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO), Ridge and Gradient Boosting Method (GBM) in selecting important features in downscaling of maximum temperature in Birjand synoptic station during the statistical period of 1961-2019 were studied and compared. It is a mechanism to find a combination of predictors that with a minimum number of predictors can produce an acceptable evaluation index in estimating the variable under study. For the present study, the weather information of Birjand Synoptic Meteorological Station has been prepared by the Meteorological Organization of Iran. In order to calibrate and validate the machine learning algorithms, 70% and 30% of the available monthly data, respectively, were allocated for this purpose. To conduct this research, coding in R-Studio environment and Caret and Fscaret packages were used. In this study, to evaluate the performance of the algorithms, three indices includes relative Nash-Sutcliffe Efficiency (rNSE), Volume Efficiency (VE) and Kling-Gupta Efficiency (KGE) were used.

Results and Discussion

Before using the algorithms in selecting large-scale predictors, the correlation between these variables and the maximum observational temperature at Birjand station was investigated. Large scale variables mslp, P1_v, P8_v, P8_u, P850 Temp, with a maximum correlation temperature of 0.6 showed that the correlation is acceptable given the complexity of the climate change phenomenon. In addition, these results show that all the

1 and 3- Assistant Professor and Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran & Members of Drought and Climate Change Research Group

(*- Corresponding Author Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)

2 and 4- Ph.D. Candidates in Water Resources, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

algorithms used the important factors including F1, F2, F15, F16, F18, F20 and F26 by more than 50% and the first variable (mean pressure at the ocean surface) was the most important parameter in downscaling of maximum temperature. Also, the highest importance was for P1_v and the lowest value related to P5_u, as 73.2% and 15%, respectively. Violin plots of downscaled maximum temperature in validation step of different algorithms along with the observed maximum temperature in Birjand synoptic station in each of the algorithms showed that the values of the first and third quartiles in the output data of SPSA algorithm compared to other algorithms were closer to the observed data. According to the evaluation criteria, SPSA algorithm has a higher performance than other algorithms in reproducing the maximum monthly temperature values in Birjand synoptic station. Also, based on the volumetric efficiency evaluation criteria and relative Nash-Sutcliffe, GBM algorithm was more successful in selecting predictors than Ridge and LASSO algorithms. It is also observed that SPSA algorithm shows different results than other algorithms. In comparison of mean and variance of downscaled and observed maximum temperature, the results of t-test and F-test showed that SPSA algorithm has higher efficiency than other algorithms in regenerating mean and variance of observed maximum temperature in Birjand synoptic station at the 5% significance level.

Conclusion

The data used in this study included large scale atmospheric variables and the maximum observed temperature at Birjand station. The algorithms were used to select important predictors and the performance of these methods in the validation part. According to the results of this study, the highest importance among large-scale variables is related to P1_v and the lowest value is related to P5_u, the values of which were 73.2% and 15%, respectively. The SPSA algorithm also performs better than other algorithms in selecting predictors and consequently the maximum temperature.

Keywords: Atmosphere- Ocean general circulation model, Downscaling, Feature selection, Machine learning algorithm, Maximum temperature

مقایسه روش‌های یادگیری ماشین در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مدل‌های گردش عمومی جو- اقیانوسی برای ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه (مطالعه موردی: بیرجند)

مهدی امیرآبادی‌زاده^{۱*} - مهدیه فروزان‌مهر^۲ - مصطفی یعقوب‌زاده^۳ - سعیده حسین‌آبادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۷/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۹

چکیده

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر باعث تغییرات زیادی در مؤلفه‌های اقلیمی کره زمین شده است که این تغییرات در پارامترهای اقلیمی به صورت افزایشی یا کاهشی است. امروزه تغییر اقلیم یکی از چالش‌های بشر در بهره‌برداری و مدیریت منابع آب است، همچنین شرایط کنونی آب و هوای جهانی نشان دهنده افزایش خطرات ناشی از پدیده خشکی در بسیاری از مناطق جهان در آینده است. مدل‌های گردش کلی جوی یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در مطالعات تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای می‌باشد. یکی از اولویت‌های اصلی ریزمقیاس‌نمایی آماری انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها به عنوان ورودی به مدل ریزمقیاس‌نمایی در پژوهش می‌باشد. برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مهم از بین ۲۶ متغیر جو بالا، از چهار الگوریتم یادگیری ماشین شامل لاسو، ستیجی، GBM، و SPSA در ریزمقیاس‌نمایی آماری دمای بیشینه در ایستگاه بیرجند استفاده گردید و عملکرد این روش‌ها با سه شاخص نش-ساتکلیف نسبی، کلینگ-گوپتا و بازده حجمی در بخش صحت‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین میزان اهمیت برای مؤلفه سرعت نصف‌النهار نزدیک سطح و کمترین مقدار آن در مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع ۵۰۰ هکتو پاسکال می‌باشد که مقادیر آن به ترتیب ۷۳/۲٪ و ۱۵٪ تعیین شد. همچنین نتایج شاخص‌های ارزیابی عملکرد نش-ساتکلیف نسبی و کلینگ-گوپتا، نشان دادند که الگوریتم SPSA دارای عملکرد بهتری از سایر الگوریتم‌ها در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و به تبع آن ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه می‌باشد. مقایسه میانگین و واریانس خروجی ریزمقیاس شده توسط الگوریتم‌های مورد استفاده و داده‌های مشاهداتی در بخش صحت‌سنجی نشان داد که الگوریتم SPSA نسبت به سایر الگوریتم‌ها در باز تولید میانگین و واریانس دمای بیشینه مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک بیرجند دارای توانایی بیشتری می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم یادگیری ماشین، انتخاب پیش‌بینی‌کننده، دمای بیشینه، ریزمقیاس‌نمایی، مدل گردش عمومی جو-اقیانوسی

مقدمه

کشورها صورت گرفته است، نشان دهنده تغییر در پارامترهای اقلیمی به صورت افزایشی یا کاهشی است. دما در کنار بارش از مهم‌ترین عناصر اقلیمی محسوب می‌شود که در تعیین نقش و پراکندگی دیگر عناصر اقلیمی نیز مؤثر است. همچنین دما از عوامل اصلی و اساسی در پهنه‌بندی و طبقه‌بندی اقلیمی محسوب می‌شود، بر این اساس نوسانات و تغییرپذیری دما دارای اهمیت زیادی است (Sfandiari et al., 2010). درباره تغییر اقلیم و بررسی عناصر هواشناسی مطالعات متعددی در سطح ایران و جهان صورت گرفته است. به طور کلی تحقیقاتی که در زمینه تغییر اقلیم در جهان صورت گرفته است، بیان‌کننده این حقیقت است که تغییر هرچند کم در دما

امروزه تغییر اقلیم یکی از چالش‌های بشر در بهره‌برداری و مدیریت منابع آب است، تحقیقاتی که در این زمینه در ایران و سایر

۱ و ۳- به ترتیب استادیار و دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، اعضای گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
(*)- نویسنده مسئول: (Email: mamirabadizadeh@birjand.ac.ir)
۲ و ۴- دانشجویان دکتری منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

دارای کاستی‌هایی است. این روش زمانی که تعداد زیادی پیش‌بینی کننده وجود داشته باشد که همبستگی قوی با هم دارند دارای نقص است. حسامی و همکاران (Hessami et al., 2008) از روش آنالیز رگرسیون گام به گام برای انتخاب بهترین پیش‌بینی کننده‌ها برای ریزمقیاس‌نمائی با SDSM برای شبیه‌سازی مقادیر حدی استفاده کردند.

تعداد کمی از مطالعات ریزمقیاس‌سازی از الگوریتم LASSO برای انتخاب پیش‌بینی کننده در گذشته استفاده کردند. اما، کاربرد آن در سال‌های اخیر، رو به گسترش است. هی و همکاران (He et al., 2019) از الگوریتم LASSO برای تعیین بهترین پیش‌بینی کننده استفاده کردند و ارتفاع ژئوپتانسیل در ۵۰۰ هکتوپاسکال (hPa) برای ریزمقیاس‌نمائی بارندگی ماهانه در دره رودخانه یانگ تسه در چین بعنوان مهم‌ترین پیش‌بینی کننده معرفی گردید. عملکرد سه روش رگرسیون OLS، LASSO و ستیگی توسط متوکریشنان و روحینی (Muthukrishnan and Rohini, 2016) در برازش مدل برای تحلیل سلامت افراد با استفاده از داده‌های پایگاه اندازه‌گیری مشخصات بیماران دیابتی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق از ۴۲۲ رکورد مشاهداتی استفاده گردید. نتایج این تحقیق نتایج نشان داد که روش LASSO با کوچک کردن ضرایب مدل به سمت مقدار صفر، بهتر از روش‌های دیگر مورد مطالعه در تحقیق عمل می‌کند. از این رو، روش LASSO را می‌توان به عنوان جایگزینی برای روش‌های انتخاب ویژگی مرسوم استفاده کرد. آنها تأکید نمودند که نتیجه تحقیق برای محققینی که در وظایف یادگیری ماشینی کار می‌کنند، مفید خواهد بود.

ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2016) از BMA^۱ به عنوان یک روش ریزمقیاس‌سازی برای تولید دمای میانگین منطقه‌ای استفاده کردند. در انتخاب پیش‌بینی کننده در این روش، برتری متغیرها بر اساس قضیه بیز تشخیص داده می‌شود و بر اساس احتمال مشخص می‌شود. از این رو، وزن‌های تخمینی برای پیش‌بینی کننده مستقیماً دقت آن متغیر را منعکس می‌کنند و به نتایج واقعی‌تری می‌رسند.

پناهی و میرهاشمی (Panahi and Mirshahi, 2016)، با استفاده از دو الگوریتم یادگیری ماشین CART و CHAID به پیش‌بینی دمای‌ها در ایستگاه سینوپتیک اراک پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که مدل درختی CHAID در مقایسه با مدل CART عملکرد بهتری در پیش‌بینی متوسط دمای ماهانه ماه بعد دارد، بنابراین می‌توان از این مدل برای پرکردن داده‌های هواشناسی گم شده استفاده کرد. ترانسکو و همکاران (Troncoso et al., 2013) از روش آنالیز مؤلفه اصلی برای تشخیص پیش‌بینی کننده‌های با اهمیت برای ریزمقیاس‌نمائی با روش SDSM استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که رطوبت نسبی و سرعت مهم‌ترین پیش‌بینی کننده‌ها در این تحقیق بودند.

موجب تغییر در وقوع پدیده‌هایی نظیر خشکسالی، بارش‌های سنگین و طوفان می‌شود (Balling and Idso, 1990). برای بررسی رفتار داده‌های آماری، انتخاب، شناسایی و مدل‌سازی و نیز برای کشف نظم و یا رابطه‌ای که در ابتدا ناشناخته است می‌توان از الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده کرد. در ادامه چند نمونه از تحقیقات موجود در زمینه داده کاوی ارائه شده است.

نیک‌نام (Niknam, 2013) طی تحقیقی با استفاده از ۲۰ متغیر اقلیمی طی دوره ۱۰ ساله (۱۹۹۵-۲۰۰۵) مربوط به ایستگاه‌های اقلیمی و سینوپتیک استان اصفهان و با استفاده از الگوریتم‌های داده کاوی درخت‌های تصمیم‌گیری، شبکه بیزین و شبکه عصبی به داده کاوی اقلیمی جهت ارائه مدل پیش‌بینی اقلیم در این استان پرداخته است، در پایان نیز عوامل تأثیرگذار بر پهنه‌بندی اقلیمی استان توسط مدل پیشنهادی ارائه شده است. در تحقیقی صلاحی و فاطمی‌نیا (Salahi and Fateminiya, 2017)، به منظور ایجاد داده‌های روزانه تا سال ۲۰۳۰ برای پیش‌بینی روند تغییرات یخبندان در ایستگاه هواشناسی کاشان، از خروجی پنج مدل گردش کلی شامل HADGEM، GLAOM، IPCM4، HADCM3، BCM2 استفاده کردند که در نهایت مدل گردش کلی GLAOM به منظور پیش‌بینی داده‌های مصنوعی دمای کمینه و بیشینه و همچنین بررسی یخبندان‌های کاشان در بازه اقلیمی آینده برگزیده شد. طی تحقیقی فاتحی و همکاران (Fatahi et al., 2012)، با استفاده از شاخص بارندگی و روش قواعد انجمنی به پیش‌بینی خشکسالی پرداختند، نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد الگوریتم تهیه شده قادر است شرایط خشکی متوسط تا رطوبت شدید و همچنین شرایط خشی را با احتمال بسیار زیاد و اطمینان بالا پیش‌بینی نماید.

با توجه به پیچیدگی پدیده تغییر اقلیم و نیز تعداد بالای متغیرهای پیش‌بینی کننده خروجی مدل‌های گردش کلی (در این تحقیق ۲۶ متغیر جو بالا)، انتخاب پیش‌بینی کننده‌های با اهمیت‌تر و حذف متغیرهای کم اهمیت می‌تواند روشی راهگشا در ریزمقیاس‌نمائی خروجی مدل‌های گردش کلی باشد. برای تشخیص و انتخاب پیش‌بینی کننده از همبستگی متغیرهای پیش‌بینی کننده - پیش‌بینی شونده نیز استفاده شده است. چن و همکاران (Chen et al., 2012) و مینو و همکاران (Meenu et al., 2013) در انتخاب پیش‌بینی - کننده‌ها در ریزمقیاس‌نمائی از آنالیز همبستگی بین پیش‌بینی کننده - پیش‌بینی شونده استفاده نمودند. ناصری و زهرایی (Nasseri and Zahraie, 2013) از روش آنالیز مؤلفه اصلی برای تشخیص پیش‌بینی کننده‌های با اهمیت برای ریزمقیاس‌نمائی با روش SDSM استفاده کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که رطوبت نسبی و سرعت مهم‌ترین پیش‌بینی کننده‌ها در این تحقیق بودند.

بررسی منابع در روش‌های انتخاب ویژگی، نشان می‌دهد که روش رگرسیون گام به گام یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها است، اما

اقلیمی مانند دمای بیشینه هوا بوده و اینکه هنوز کاربرد آن‌ها گسترش نیافته است. بنابراین در پژوهش حاضر، الگوریتم‌های تقریب استوکاستیک آشفته‌گی همزمان، ستیغی، لاسو و ماشین تقویت شده گزیده‌ای برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده در ریزمقیاس‌سازی دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و الگوریتم برتر معرفی شد.

مواد و روش‌ها

امروزه مجموعه داده‌ها بگونه‌ای است که در توصیف پدیده مورد بررسی از متغیرهای زیادی بهره می‌گیرد. انتخاب پیش‌بینی‌کننده^۱ یکی از مهم‌ترین گام‌ها در پیش‌پردازش در یادگیری ماشین می‌باشد. عبارت دیگر مکانیزمی به منظور یافتن ترکیبی از پیش‌بینی‌کننده‌ها می‌باشد که با حداقل تعداد پیش‌بینی‌کننده بتواند در برآورد متغیر مورد بررسی شاخص ارزیابی قابل قبولی را تولید نماید. از جمله مزایای انتخاب پیش‌بینی‌کننده می‌توان به کاهش زمان پیش‌پردازش، ساده‌سازی مدل‌ها و زمان تحلیل کوتاه‌تر اشاره نمود. در این تحقیق هدف مقایسه چند الگوریتم در ریزمقیاس‌سازی دمای بیشینه ایستگاه همدیدی بیرجند طی دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۶۱ می‌باشد که از ۲۶ پارامتر مرتبط با جو بالای مستقل به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده شد (پیش‌بینی‌کننده‌ها با حرف F در اشکال و جداول نشان داده شده‌اند). توصیف این پیش‌بینی‌کننده‌های جو بالا در جدول ۱ آورده شده است.

منطقه مورد مطالعه

برای انجام پژوهش حاضر اطلاعات آب و هوایی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک بیرجند از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. شهرستان بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی و مرکز این استان می‌باشد. این شهرستان از شمال به شهرستان قائنات، از شمال شرق به شهرستان زیرکوه، از شرق به شهرستان‌های درمیان و سربیشه، از جنوب به شهرستان خوسف و از غرب به شهرستان سراپان محدود است. مختصات جغرافیایی این شهرستان ۵۹ درجه و ۱۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۵۳ دقیقه عرض جغرافیایی می‌باشد، همچنین این شهرستان در ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا قرار گرفته و دارای مساحت ۳۹۴۹ کیلومتر مربعی است. به‌طور کلی آب و هوای استان خراسان جنوبی خشک و بیابانی است، شهرستان بیرجند به دلیل دوری از مسیر بادهای باران‌آور، عدم وجود ارتفاعات مهمی که بتواند در تعدیل آب و هوا و جذب نزولات جوی مؤثر واقع شود و همچنین مجاورت با کویر لوت در خشک‌ترین تقسیم‌بندی اقلیمی خراسان قرار دارد.

(2015)، در تحقیقی سرعت باد را در مناطق بادخیز با استفاده از الگوریتم RTs پیش‌بینی نموده‌اند. در پژوهشی دیگر با استفاده از داده‌های هواشناسی مؤسسه تحقیقات کشاورزی هند طی دوره ۴ ساله (۲۰۰۷-۲۰۰۴) شامل دمای بیشینه و کمینه، ساعات آفتابی، سرعت باد، رطوبت نسبی به مقایسه مقادیر تبخیر روزانه تحت و تخمین‌های شبکه عصبی، رگرسیون و مدل‌های اقلیمی پرداخته‌اند (Diamantopoulou et al., 2010).

پال و دسوال (Pal and Deswal, 2009)، برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق در ایستگاه دیویس در کالیفرنیا از مدل درختی M5P استفاده کردند و پتانسیل این روش را با روش‌های پنمن-مونتیت، فائو-۵۶ و هارگریوز-سامانی کالیبره و مقایسه کردند، طبق نتایج به‌دست آمده در این تحقیق می‌توان از مدل M5P به‌عنوان مدل مرجع در تعیین تبخیر و تعرق استفاده نمود. همچنین در سال ۱۳۹۳، امیدوار و همکاران (Omidvar et al., 2015)، طی تحقیقی به ارزیابی کارایی مدل درخت تصمیم در پیش‌بینی بارش ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه پرداختند، در این تحقیق از الگوریتم CART به‌عنوان یکی از انواع درختان تصمیم رگرسیونی جهت پیش‌بینی بارش ۳۰ ماه بعد استفاده شد.

جعفرزاده و همکاران (Jafarzadeh et al., 2021) برای ریزمقیاس‌نمائی بارش در ایستگاه سینوپتیک بیرجند و ارومیه از روش SVM استفاده نمودند و ۲۶ پارامتر NCEP/NCAR به‌عنوان ورودی-های ریزمقیاس‌نمایی مورد استفاده قرار گرفتند. آن‌ها پنج پیش‌بینی‌کننده برتر را با روش‌های PCA، رگرسیون گام به گام، آنالیز همبستگی و BMA انتخاب و نتایج ریزمقیاس‌نمایی بارش روزانه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش‌های BMA و رگرسیون گام به گام دارای توانمندی بالاتری در انتخاب پیش‌بینی‌کننده برای ریزمقیاس‌نمایی بارش در این ایستگاه‌ها می‌باشند.

الگین و همکاران (Algin et al., 2022) در پژوهشی از تقریب تصادفی آشفته‌گی همزمان (SPSA)، بهینه‌سازی پرندگان مهاجر و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده برای تولید زیر مجموعه‌ها استفاده نمودند. زیر مجموعه‌های تولید شده توسط الگوریتم‌ها، با استفاده از انتخاب ویژگی مبتنی بر همبستگی ارزیابی شده و عملکرد آن‌ها با استفاده از درخت تصمیم (C4.5) به عنوان طبقه‌بندی‌کننده مورد سنجش قرار گرفت. آن‌ها برای اولین بار، الگوریتم SPSA را به عنوان یک رویکرد فیلتر برای انتخاب ویژگی مورد استفاده قرار دادند. همچنین نتایج نشان داد که الگوریتم SPSA از نظر مقادیر دقت بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. نکته دیگر این است که همه الگوریتم‌ها تعداد ویژگی‌ها را بیش از ۵۰ درصد کاهش دادند.

مرور منابع نشان‌دهنده محدود بودن استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین در انتخاب ویژگی در ریزمقیاس‌سازی متغیرهای

جدول ۱- تعاریف ۲۶ متغیر بزرگ مقیاس NCEP (hpa مخفف هکتو پاسکال است)

Table 1- Definition of 26 large scale NCEP variable (hpa is abbreviation for Hectopascal)

ویژگی	متغیر بزرگ مقیاس	واحد	ویژگی	متغیر بزرگ مقیاس	واحد
Property	Large scale variable	Unit	Property	Large scale variable	Unit
F14	نیروی جریان هوا در ارتفاع 850hpa (p8_f) 850 h Pa Wind speed	m/s	F1	میانگین فشار سطح دریا (mslp) Mean sea level pressure	Pa
F15	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع 850hpa (p8_u) 850 h Pa Zonal velocity	m/s	F2	سرعت جریان هوا ژئوستروفیک در نزدیک سطح (p1_f) 1000 h Pa Wind speed	m/s
F16	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع 850hpa (p8_v) 850 h Pa Meridional velocity	m/s	F3	مؤلفه سرعت مداری نزدیک سطح (p1_u) 1000 h Pa Zonal velocity	m/s
F17	تاوایی در ارتفاع 850hpa (p8_z) 850 h Pa Vorticity	s ⁻¹	F4	مؤلفه سرعت نصف النهاری نزدیک سطح (p1_v) 1000 h Pa Meridional velocity	m/s
F18	جهت باد در ارتفاع 850hpa (p8th) 850 h Pa Wind direction	Deg	F5	تاوایی نزدیک سطح (p1_z) 1000 h Pa Vorticity	s ⁻¹
F19	واگرایی در ارتفاع 850hpa (p8zh) 850 h Pa Divergence	s ⁻¹	F6	واگرایی نزدیک سطح (p1_th) 1000 h Pa Wind direction	s ⁻¹
F1\20	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح 500hpa (p500) 500 h Pa Geopotential height	M	F7	جهت باد نزدیک سطح (p1zh) 1000 h Pa Divergence	Deg
F21	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح 850hpa (p850) 850 h Pa Geopotential height	M	F8	نیروی جریان هوا در ارتفاع 500hpa (p5_f) 500 h Pa Wind speed	Pa
F22	رطوبت نسبی در نزدیک سطح (prcp) Precipitation	%	F9	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع 500hpa (p5_u) 500 h Pa Zonal velocity	m/s
F23	رطوبت نسبی در ارتفاع 500hpa (s500) 500 h Pa Specific humidity	%	F10	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع 500hpa (p5_v) 500 h Pa Meridional velocity	m/s
F24	رطوبت نسبی در ارتفاع 850hpa (s850) 850 h Pa Specific humidity	%	F11	تاوایی در ارتفاع 500hpa (P5_z) 500 h Pa Vorticity	s ⁻¹
F25	رطوبت ویژه در نزدیک سطح (shum) 1000 h Pa Specific humidity	Kg/kg	F12	جهت باد در ارتفاع 500hpa (p5th) 500 h Pa Wind direction	Deg
F26	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (temp) Screen(2 m) air temperature	K	F13	واگرایی در ارتفاع 500hpa (p5zh) 500 h Pa Divergence	s ⁻¹

مقایسه قرار گرفت. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی الگوریتم‌ها، بترتیب ۷۰ و ۳۰ درصد داده‌های در اختیار، به این منظور اختصاص یافت. برای اجرای این تحقیق از کد نویسی در محیط نرم افزاری RStudio و بسته‌های Caret و Fscaret استفاده گردید. به منظور اجرای این الگوریتم‌ها، دو بردار ورودی و خروجی تشکیل گردید که بردار ورودی مشتمل بر ۲۶ ویژگی مدل بزرگ مقیاس گردش کلی جو و بردار خروجی آن دمای بیشینه مشاهداتی طی دوره زمانی مورد پژوهش می‌باشد.

حداکثر دمای مطلق در این شهرستان ۴۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Skhmet.ir).

انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها (ویژگی‌ها)

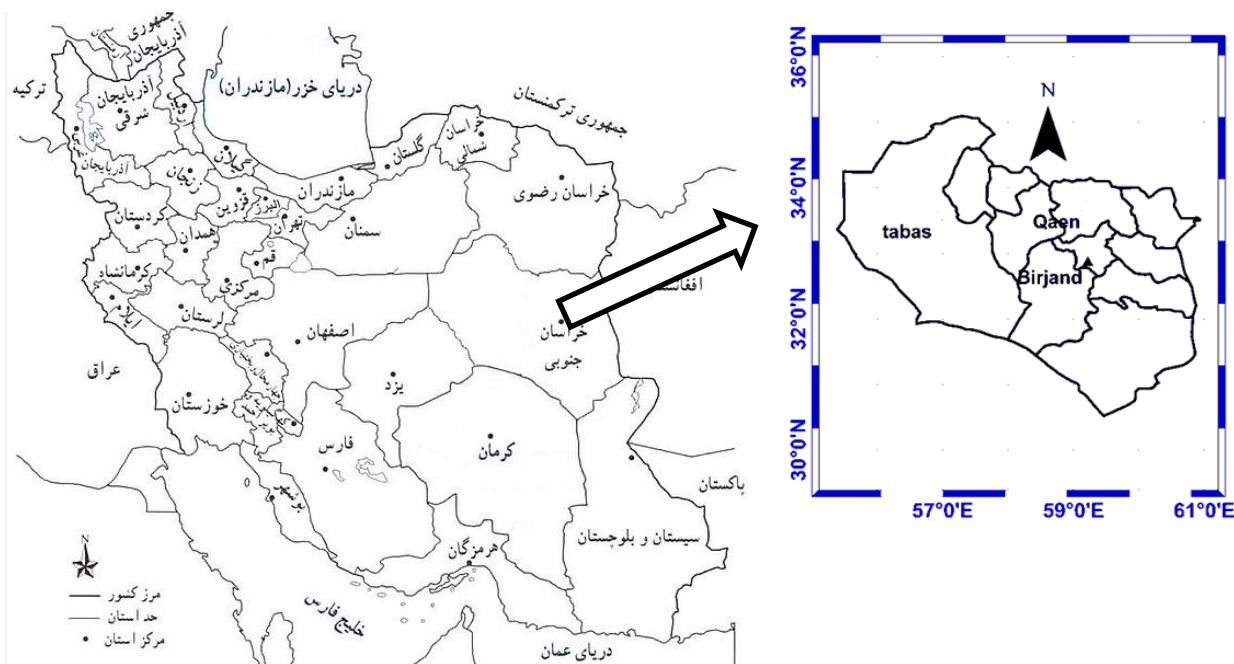
در این تحقیق از چهار روش شامل تقریب استوکستیک آشفستگی همزمان، لاسو^۱، ستیجی^۲ و روش GBM^۳ در انتخاب ویژگی‌های مهم بصورت یکپارچه^۴ در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه مورد بررسی و

1- Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (LASSO)

2- Ridge

3- Gradient Boosting Machine

4- Ensemble



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان بیرجند
Figure 1- Geographical location of Birjand city

گرایان غیر منفی و k بردار اغتشاش همزمان p -بعدی است (Aksakalli and Malekipirbazari, 2016).

الگوریتم سنتی (Ridge)

الگوریتم سنتی برای انتخاب ویژگی‌های منتخب از مجموعه‌ی ویژگی‌های در اختیار، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد و از شکل اصلاح شده‌ی تابع جریمه رگرسیون خطی استفاده می‌نماید که در معادله زیر بیان شده است:

$$L_1 = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (y_{obs}^i - y_{pred}^i)^2 + \alpha \sum_{j=1}^n a_j^2 \quad (2)$$

که در آن a_j ضریب فاکتور j -ام، y_{obs}^i مقدار مشاهداتی، y_{pred}^i مقدار تولید شده توسط مدل رگرسیون، α یک فرایارامتر است که شدت جریمه جمله انتهایی را تنظیم می‌کند و مقدار آن با استفاده از اعتبارسنجی متقابل^۳ تعیین می‌شود، N_t تعداد داده برای آموزش مدل و n تعداد ویژگی مورد ارزیابی می‌باشد. ایده پشت رگرسیون ریدج، کوچک کردن مقادیر ضرایب به منظور حذف کردن ویژگی‌های

تقریب استوکاستیک آشفتگی همزمان (SPSA)

این الگوریتم بهینه‌سازی تکراری به طور کلی در مسایل غیر خطی استفاده می‌شود که متغیرهای زیادی دارند و در آن‌ها برآورد شیب تابع هدف دشوار یا غیر ممکن است. کد مورد استفاده در این روش، شکلی از توابع تصادفی است که از ایده تقریب تصادفی برای تخمین گرایان عملکرد استفاده می‌کند و آن‌ها را به یک الگوریتم شدیدترین کاهش می‌رساند.

این روش، از الگوریتم بهینه‌سازی گرایان کاهش استفاده می‌نماید که با مقادیر اولیه $\hat{\theta}_k$ شروع شده و با لحاظ رابطه زیر مقادیر حدس‌های بعدی در جهت رسیدن به جواب را دنبال می‌نماید:

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k - \alpha_k \hat{g}_k(\hat{\theta}_k) \quad (1)$$

که در آن α_k یک توالی افزایشی تکرارهای غیر منفی، $\hat{g}_k(\hat{\theta}_k)$ بیانگر شیب تقریبی در $\hat{\theta}_k$ می‌باشد. در این الگوریتم مقدار $\hat{g}_k$ با توجه به ارزیابی توابع جریمه در هر مرحله محاسبه می‌شود. این الگوریتم مقدار جاری w را با مقدار کمی در هر جهت به صورت $w + \delta - \delta w$ که $\delta > 0$ تکرار می‌کند، آشفته می‌نماید. مقدار آشفتگی δ به عنوان $C_k \times k$ در نظر گرفته می‌شود و C_k یک دنباله افزایشی

2- Ridge

3- Cross Validation

1- Simultaneous Perturbation Stochastic Approximation

شاخص‌های ارزیابی

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در این مطالعه در انتخاب پیش‌بینی‌کننده از سه شاخص عملکرد نش-ساتکلیف نسبی (rNSE)، بازده حجمی (VE^۳) و شاخص عملکرد کلینگ-گوپتا^۴ (KGE) استفاده گردید که روابط مورد استفاده در هر شاخص در ادامه ذکر می‌گردد. از جمله خصوصیات شاخص KGE اینست که از سه عامل ضریب همبستگی خطی بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (r)، نسبت انحراف استاندارد بین جریان‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (α) و خطای وزنی بین جریان مشاهده شده و شبیه‌سازی شده (β) استفاده می‌نماید. بنابراین ارزیابی با این شاخص که بین -∞ تا یک تغییر می‌نماید، دارای مزیت سه‌گانه در مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد. روابط مورد استفاده در محاسبه این شاخص‌ها طی معادلات ۶ تا ۸ در ادامه ارائه شده‌اند:

$$rNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{sim}} - Y_{i\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{i\text{obs}})^2} \quad (6)$$

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |Y_{i\text{sim}} - Y_{i\text{obs}}|}{\sum_{i=1}^n Y_{i\text{obs}}} \quad (7)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\alpha-1)^2} \quad (8)$$

که در این روابط: $Y_{i\text{obs}}$ بیانگر درجه حرارت بیشینه مشاهداتی، $Y_{i\text{sim}}$ درجه حرارت بیشینه شبیه‌سازی شده، $\bar{Y}_{i\text{obs}}$ میانگین دمای بیشینه مشاهداتی، r ضریب همبستگی خطی بین مقادیر دمای بیشینه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، β نسبت میانگین دمای بیشینه شبیه‌سازی شده به میانگین دمای بیشینه مشاهداتی و α نسبت انحراف معیار دمای بیشینه شبیه‌سازی شده به انحراف معیار دمای بیشینه مشاهداتی می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق از چهار الگوریتم که در بخش مواد و روش‌ها تشریح گردید، برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مهم در ریزمقیاس نمایی دمای بیشینه در ایستگاه دیده‌بانی بیرجند استفاده گردید و بر اساس شاخص‌های ارزیابی آماری مورد مقایسه قرار گرفت. ارتباط بین ۲۶ متغیر جو بالا و متغیر پیش‌بینی شونده (دمای بیشینه) در شکل ۲ و شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود دو پیش‌بینی‌کننده ms1p(F1) و Temp(F26) دارای بالاترین ضرایب همبستگی و P8_z (F17) دارای کمترین میزان همبستگی با درجه حرارت بیشینه در ایستگاه دیده‌بانی بیرجند می‌باشد.

غیرمفید است. اگر α صفر باشد، رفتار شبیه رگرسیون خطی خواهد بود. اگر α خیلی بزرگ باشد، قسمت اول تابع هزینه نادیده گرفته می‌شود و نتایج غیر قابل اعتماد هستند. بنابراین، برای اینکه مدل به درستی کار کند، نیاز به تنظیم این هاپرپارامتر وجود دارد.

روش لاسو^۱ (LASSO)

در این الگوریتم که یک روش اتوماتیک قدرتمند در یافتن ویژگی‌های مهم می‌باشد، تابع هزینه براساس معادله زیر که تغییر شکل یافته الگوریتم رگرسیون خطی می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$L_1 = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} (y_{obs}^i - y_{pred}^i)^2 + \alpha \sum_{j=1}^n |a_j| \quad (3)$$

که پارامترهای این تابع هزینه در بخش مربوط به الگوریتم ستیغی معرفی گردید. اگر دو ویژگی به صورت خطی همبستگی داشته باشند، حضور همزمان آن‌ها مقدار تابع جریمه را افزایش می‌دهد، بنابراین الگوریتم سعی می‌کند ضریب ویژگی کم اهمیت را به صفر نزدیک کند تا بهترین ویژگی‌ها را انتخاب نماید.

روش GBM^۲

ماشین تقویت‌شده گرادیان (GBM) یک الگوریتم یادگیری ماشینی بسیار محبوب هستند که در بسیاری از حوزه‌ها موفق بوده و یکی از روش‌های کارآمد در مدل‌سازی است. در این روش از یادگیری گروهی رو به جلو برای آموزش مدل استفاده می‌شود. در مقایسه با روش‌های محبوب دیگر مانند جنگل تصادفی می‌توان گفت که در حالی که جنگل‌های تصادفی مجموعه‌ای از درختان مستقل عمیق می‌سازند، GBM‌ها مجموعه‌ای از درختان کم‌عمق و ضعیف متوالی را با یادگیری و بهبود هر درخت نسبت به درخت قبلی ایجاد می‌کند. تابع هدف در این روش عبارتست از:

$$F(x) = \arg \min_{\gamma} \sum_{i=1}^n L(y_i, \gamma) \quad (4)$$

که آن L تابع جریمه و y_i مقدار مشاهداتی و γ مقدار پیش‌بینی شده می‌باشد. تابع جریمه میانگین مربعات خطا می‌باشد:

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \gamma_i)^2 \quad (5)$$

که پارامترهای رابطه (۵) قبلاً معرفی شده‌اند (Natekin and Knoll, 2013).

3- Volumetric Efficiency
4- Kling-Gupta Efficiency

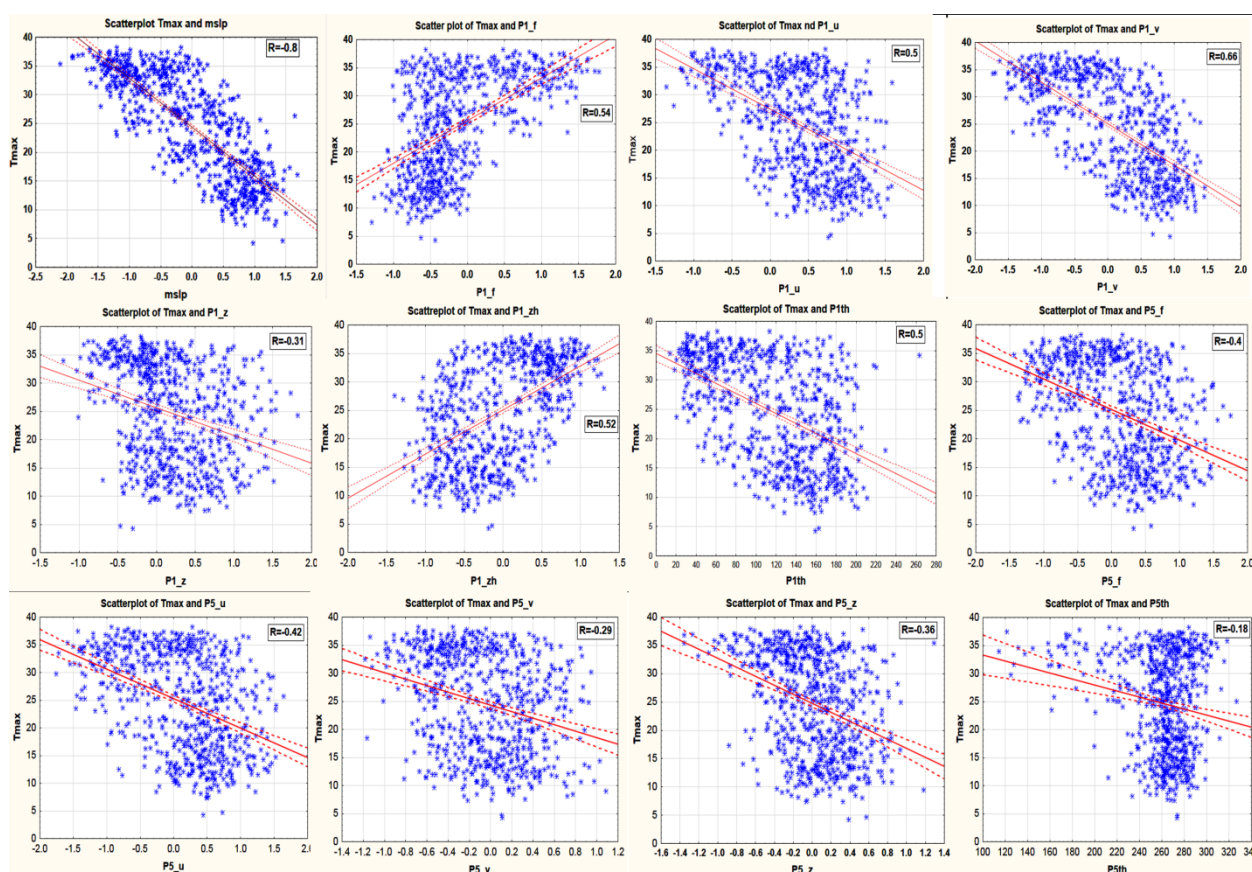
1- Least Absolute Shrinkage and Selection Operator
2- Gradient Boosting Machine

باشند.

بالا بودن همبستگی غیرخطی با دمای بیشینه مشاهداتی قرار دارد. از سوی دیگر کمترین مقدار همبستگی غیرخطی بین $P8_z$ (F17) و دمای بیشینه مشاهداتی در ایستگاه همدیدی بیرجند وجود دارد. اهمیت هر یک از ۲۶ پارامتر پیش‌بینی‌کننده برای انتخاب عنوان ورودی در ریز مقیاس‌نمایی دمای بیشینه با استفاده از الگوریتم‌های چهارگانه مورد مطالعه در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، همه الگوریتم‌های مورد استفاده اهمیت فاکتورهای $F1, F2, F15, F16, F18, F20$ و $F26$ را بیشتر از ۵۰ درصد نشان می‌دهد. همانگونه که بر اساس آنالیز همبستگی انتظار می‌رفت، متغیر اول (فشار در سطح اقیانوس) بعنوان مهم‌ترین پارامتر در ریزمقیاس‌نمایی، پیشنهاد شده است. در مقابل متغیرهای پنجم، هفتم، هشتم، دوازدهم، بیست و چهارم و بیست و پنجم در همه الگوریتم‌های مورد بررسی دارای اهمیت کمتر از ۵۰ درصد هستند. همچنین مشاهده می‌گردد که الگوریتم SPSA نسبت به سایر الگوریتم‌ها نتایج متفاوت‌تری را نشان می‌دهد.

همچنین مشاهده می‌شود که متغیرهای $P1_v, P8_v, P850$ با $Temp, P8_u$ دمای بیشینه دارای همبستگی بزرگتر مساوی ۰/۶ می‌باشند که با توجه به پیچیدگی پدیده تغییر اقلیم همبستگی قابل قبولی می‌باشد (Nazeri Tahroudi et al., 2017). لازم بذکر است که بیشترین همبستگی مقدار ۰/۸۸- می‌باشد که بین میانگین فشار در سطح اقیانوس و دمای بیشینه مشاهد شده است. انتظار می‌رود که الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق این پیش‌بینی‌کننده‌ها را در لیست کاندیدای ورودی خود پیشنهاد نمایند.

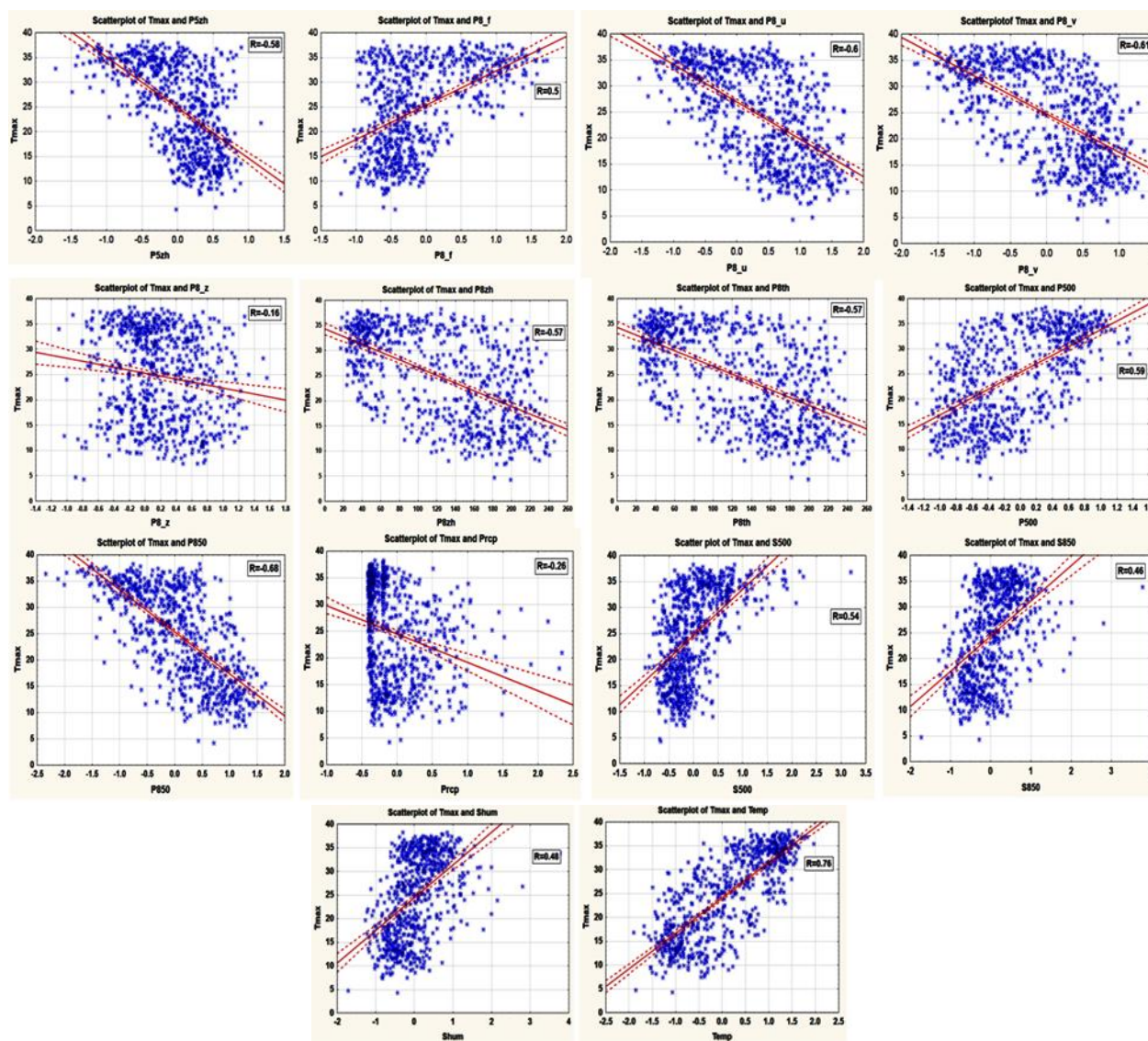
همچنین با توجه به پیچیده بودن پدیده تغییر اقلیم، همبستگی غیر خطی بین دمای بیشینه مشاهداتی و ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده جو بالا، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می‌شود، حداکثر همبستگی غیر خطی بین متغیر $mslp$ (F1) و دمای بیشینه مشاهداتی وجود دارد. همچنین متغیر $temp$ (F26) در رتبه بعدی



شکل ۲- بررسی تغییرات دمای حداکثر با ۱۲ پیش‌بینی‌کننده‌ی بزرگ مقیاس

(خط بهترین برازش و دامنه اطمینان و مقادیر همبستگی ارائه شده است)

Figure 2- Investigation of variation of maximum temperature with 12 large-scale predictors (Best fit line and confidence intervals and correlation values are provided).



شکل ۳- بررسی تغییرات دما حداکثر با ۱۴ پیش‌بینی‌کننده‌ی بزرگ مقیاس (خط بهترین برازش و دامنه اطمینان و مقادیر همبستگی ارائه شده است).

Figure 3- Investigation of variation of maximum temperature with 14 large-scale predictors (Best fit line and confidence range and correlation values are provided).

الگوریتم‌ها ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه در مقیاس ماهانه بوده است. بر اساس شاخص ارزیابی عملکرد نش-ساتکلیف نسبی، الگوریتم SPSA دارای عملکرد بسیار بالاتر از سایر الگوریتم‌ها بوده است بطوری که مقدار آن ۰/۶۸ بدست آمد در حالی که سایر الگوریتم‌ها مقادیر نزدیک به ۰/۳۷ را تولید نموده‌اند. بر اساس شاخص کلینگ-گوپتا و بازده حجمی نیز نتایج الگوریتم SPSA دارای عملکرد بهتری از سه الگوریتم دیگر از خود نشان می‌دهد. همچنین بر اساس شاخص‌های ارزیابی بازده حجمی و نش-ساتکلیف نسبی، الگوریتم GBM از دو الگوریتم Ridge و LASSO در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها موفق‌تر بوده است.

برای بررسی توأمان میزان اهمیت مشخص شده در همه الگوریتم‌ها، میانگین میزان اهمیت در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین در این شکل خط اهمیت ۵۰ درصد نیز بعنوان متوسط اهمیت ترسیم شده است. نتایج نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌کننده‌های ۱، ۳، ۴، ۶، ۹، ۱۵، ۱۶، ۱۸، ۱۹، ۲۰، ۲۱، ۲۶ دارای اهمیت بیشتر از ۵۰ درصد در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند می‌باشند. بیشترین میزان اهمیت برای P1_v و کمترین مقدار آن در P5_u می‌باشد که مقادیر آن برترتیب ۷۳/۲٪ و ۱۵٪ بوده است. نتایج ارزیابی الگوریتم‌های چهارگانه یادگیری ماشین در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها در شکل ۶ نشان داده شده است. هدف این

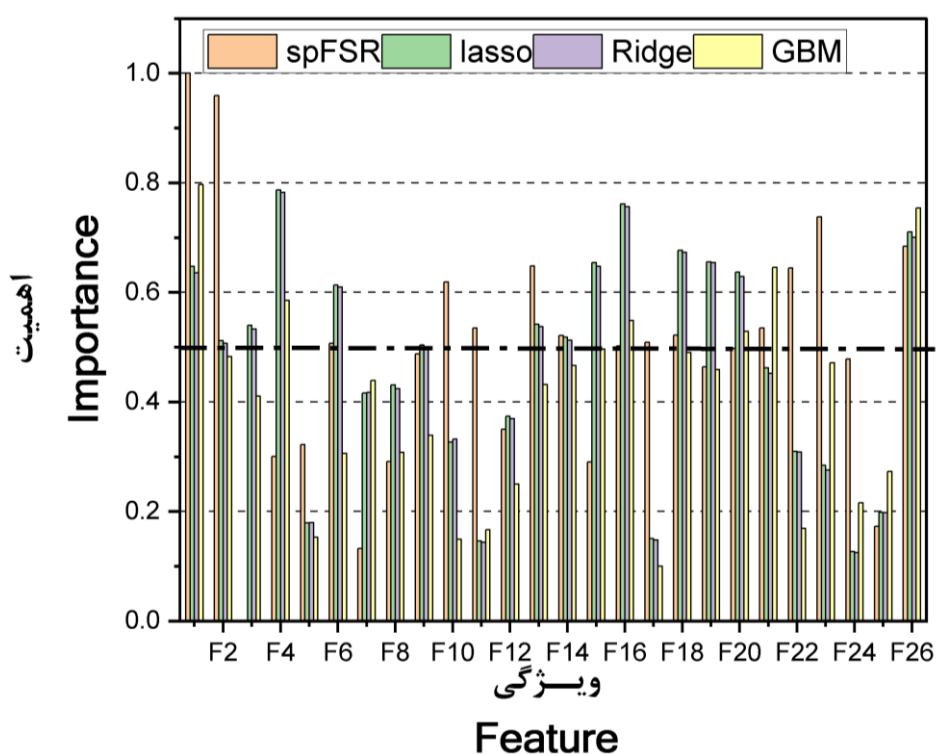
جدول ۲- بررسی همبستگی غیر خطی دمای بیشینه مشاهداتی و ۲۶ متغیر پیش‌بینی‌کننده

Table 2- Nonlinear correlation between observed maximum temperature and 26 predictor variable

ویژگی	متغیر بزرگ مقیاس	همبستگی	ویژگی	متغیر بزرگ مقیاس	همبستگی
Property	Large scale variable	Correlation	Property	Large scale variable	Correlation
F14	نیروی جریان هوا در ارتفاع 850hpa (p8_f) 850 hPa Wind speed	0.5	F1	میانگین فشار سطح دریا (mslp) Mean sea level pressure	0.8
F15	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع 850hpa (p8_u) 850 hPa Zonal velocity	0.61	F2	سرعت جریان هوا ژئوستروفیک در نزدیک سطح (p1_f) 1000 hPa Wind speed	0.54
F16	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع 850hpa (p8_v) 850 h Pa Meridional velocity	0.61	F3	مؤلفه سرعت مداری نزدیک سطح (p1_u) 1000 h Pa Zonal velocity	0.49
F17	تاوایی در ارتفاع 850hpa (p8_z) 850 hPa Vorticity	0.16	F4	مؤلفه سرعت نصف النهاری نزدیک سطح (p1_v) 1000 hPa Meridional velocity	0.66
F18	جهت باد در ارتفاع 850hpa (p8th) 850 hPa Wind direction	0.57	F5	تاوایی نزدیک سطح (p1_z) 1000 hPa Vorticity	0.31
F19	واگرایی در ارتفاع 850hpa (p8zh) 850 hPa Divergence	0.59	F6	واگرایی نزدیک سطح (p1_th) 1000 hPa Wind direction	0.45
F1\20	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح 500hpa (p500) 500 hPa Geopotential height	0.6	F7	جهت باد نزدیک سطح (p1zh) 1000 hPa Divergence	0.52
F21	ارتفاع ژئوپتانسیل سطح 850hpa (p850) 850 hPa Geopotential height	0.69	F8	نیروی جریان هوا در ارتفاع 500hpa (p5_f) 500 hPa Wind speed	0.4
F22	بارش (prcp) Precipitation	0.26	F9	مؤلفه سرعت مداری در ارتفاع 500hpa (p5_u) 500 hPa Zonal velocity	0.42
F23	رطوبت نسبی در ارتفاع 500hpa (s500) 500 hPa Specific humidity	0.54	F10	مؤلفه سرعت نصف النهاری در ارتفاع 500hpa (p5_v) 500 hPa Meridional velocity	0.29
F24	رطوبت نسبی در ارتفاع 850hpa (s850) 850 hPa Specific humidity	0.46	F11	تاوایی در ارتفاع 500hpa (P5_z) 500 hPa Vorticity	0.36
F25	رطوبت ویژه در نزدیک سطح (shum) 1000 hPa Specific humidity	0.48	F12	جهت باد در ارتفاع 500hpa (p5th) 500 h Pa Wind direction	0.18
F26	میانگین دما در ارتفاع ۲ متری (temp) Screen(2 m) air temperature	0.77	F13	واگرایی در ارتفاع 500hpa (p5zh) 500 hPa Divergence	0.58

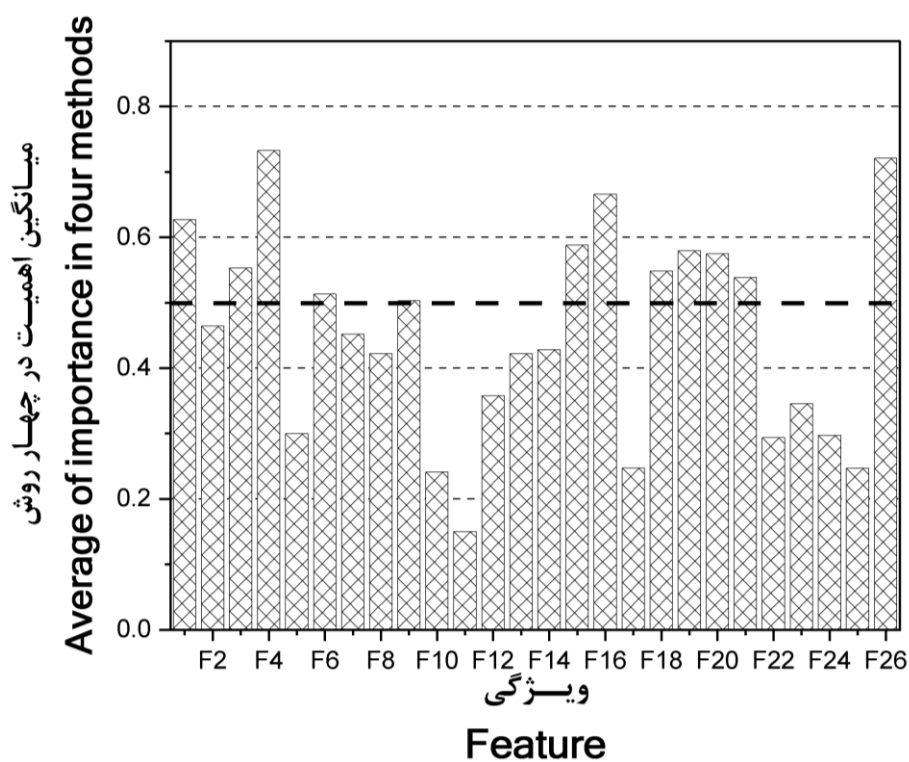
برای بررسی برابر بودن میانگین و واریانس خروجی ریزمقیاس شده توسط الگوریتم‌های مورد استفاده و داده‌های مشاهداتی در بخش صحت‌سنجی بترتیب از آزمون‌های آماری t-test و F-test استفاده گردید و در سطح معنی‌داری ۵٪ مورد تحلیل قرار گرفت (Hashmi et al., 2011). نتایج این آزمون‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. نتایج آزمون مقایسه میانگین نشان می‌دهد که تنها میانگین در خروجی الگوریتم SPSA اختلاف معنی‌داری با میانگین داده‌های مشاهداتی در سطح ۵٪ ندارد. در سایر الگوریتم‌ها نتیجه آزمون نشان می‌دهد که فرض H_0 رد شده و لذا در سطح معنی‌داری ۵٪ اختلاف معنی‌دار بین خروجی سایر الگوریتم‌ها و میانگین داده مشاهداتی وجود دارد. لذا بر اساس آزمون بررسی تفاوت معنی‌داری بین میانگین خروجی الگوریتم‌های مورد بررسی و داده‌های مشاهداتی مشخص شد که الگوریتم SPSA نسبت به سایر الگوریتم‌ها کارایی بهتری دارد.

نمودار ویولین خروجی‌های الگوریتم‌های مختلف در کنار دمای بیشینه مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک بیرجند در شکل ۷ نشان داده شده است. این نمودار تأثیر انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها در هر یک از الگوریتم‌ها در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد. طبق این نمودار مقادیر چارک‌های اول و سوم در داده‌های خروجی الگوریتم SPSA نسبت به سایر الگوریتم‌ها به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشند. پراکندگی داده‌های خروجی الگوریتم‌های LASSO و Ridge به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر می‌باشد. پراکندگی خروجی الگوریتم‌های GBM نسبت به سایر الگوریتم‌ها کوچک‌تر می‌باشد. چگالی احتمال در محدوده چارک اول در الگوریتم‌های مورد استفاده مشابه داده‌های مشاهداتی بزرگتر از محدوده میانه و میانگین می‌باشد. در محدوده چارک سوم مقدار چگالی احتمال در الگوریتم SPSA و GBM مشابه داده‌های مشاهداتی می‌باشد و سایر الگوریتم‌ها چگالی احتمال متفاوت با داده‌های مشاهداتی پیش‌بینی نموده‌اند.



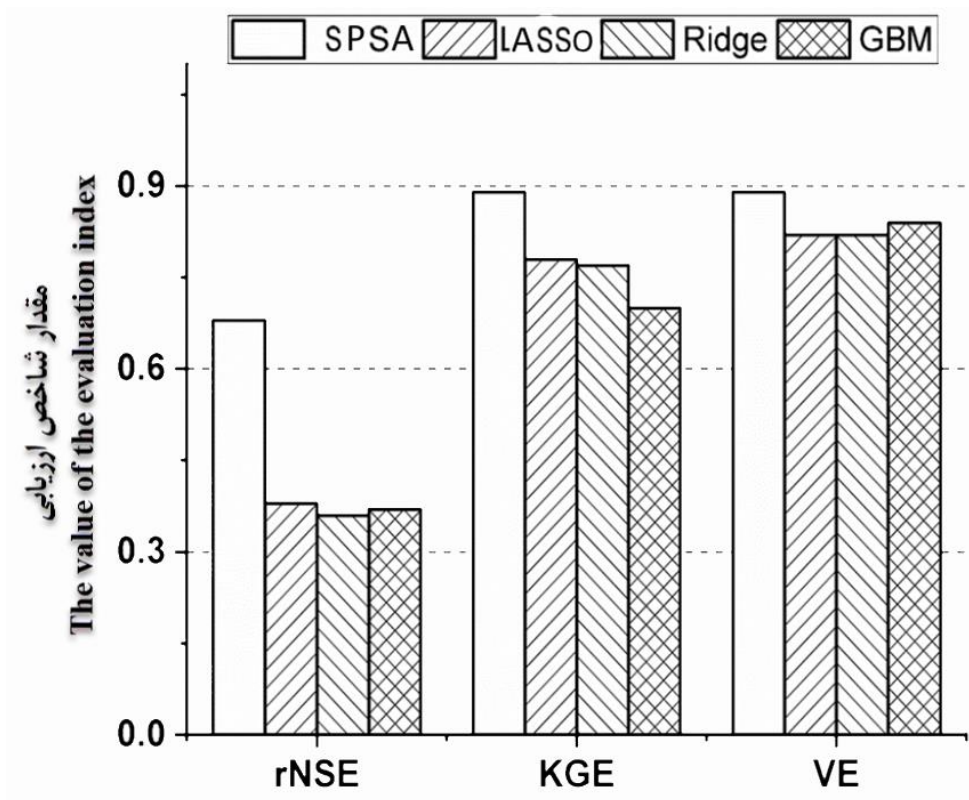
شکل ۴- نتایج بررسی اهمیت هریک از ۲۶ پیش‌بینی‌کننده بر اساس روش انتخابی

Figure 4- Importance results of each of the 26 predictors based on the selected algorithm



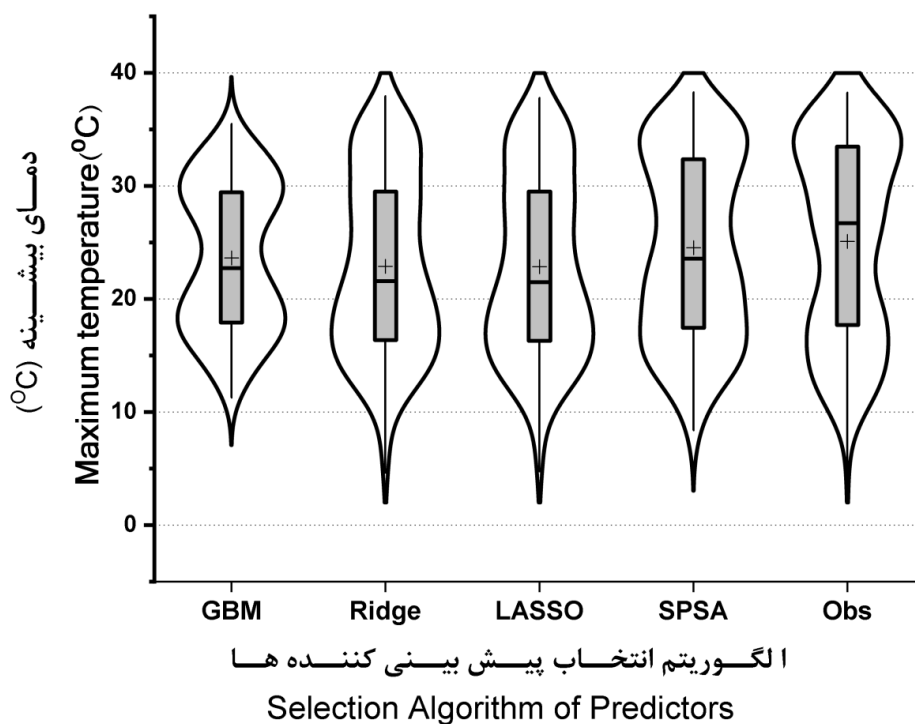
شکل ۵- بررسی میانگین اهمیت هریک از ۲۶ پیش‌بینی‌کننده بزرگ مقیاس

Figure 5- Investigation of the average importance of each of the 26 large scale predictors



شکل ۶- مقادیر شاخص‌های ارزیابی برای روش‌های مختلف انتخاب پیش‌بینی‌کننده

Figure 6- Values of evaluation criteria for different methods of predictor selection



الگوریتم انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها

Selection Algorithm of Predictors

شکل ۷- مقایسه نمودار باکس - پلات الگوریتم‌های مورد استفاده در مقایسه با دمای بیشینه مشاهداتی

Figure 7- Comparison of box-plot diagrams of algorithms used in comparison with the observed maximum temperature

جدول ۳- نتایج آزمون t-test و F-test روی خروجی الگوریتم‌های مورد استفاده در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و درجه حرارت بیشینه مشاهداتی در ایستگاه سینوپتیک بیرجند در مرحله صحت‌سنجی

Table 3- Results of t-test and F-test on the output of algorithms used in selecting predictors and maximum observed temperature in Birjand synoptic station in validation stage

آزمون مقایسه آماره در داده‌های الگوریتم و مشاهداتی	SPSA	LASSO	Ridge	GBM
Statistical Comparison Test in Algorithm and Observational Data	P-value	P-value	P-value	P-value
(t-test) میانگین				
Average(t-test)	0.47	0.005*	0.006*	0.048*
(F-test) واریانس				
Variance(F-test)	0.31	0.19	0.15	1.3E-5*

ایستگاه دیدبانی بیرجند می‌باشد. اهمیت هر یک از ۲۶ پارامتر پیش-بینی‌کننده در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه با استفاده از الگوریتم‌های چهارگانه مورد مطالعه نشان داد که بیشترین میزان اهمیت برای $P1_v(F4)$ و کمترین مقدار آن در $P5_u(F4)$ می‌باشد که مقادیر آن به ترتیب $73/2\%$ و 15% بوده است. مقایسه الگوریتم‌های مورد استفاده در این تحقیق برای داده‌های بخش صحت‌سنجی بر اساس شاخص ارزیابی عملکرد نش-ساتکلیف نسبی و کلینگ-گوپتا، نشان داد که الگوریتم SPSA دارای عملکرد بهتری از سایر الگوریتم‌ها در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و به تبع آن ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه می‌باشد. همچنین بررسی برابر بودن میانگین و واریانس خروجی ریزمقیاس‌شده توسط الگوریتم‌های مورد استفاده و داده‌های مشاهداتی در بخش صحت‌سنجی نشان داد که الگوریتم SPSA دارای کارایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند می‌باشد. بنابراین نتایج بررسی‌های چندگانه نشان داد که الگوریتم SPSA نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارای توانمندی بالاتری در انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها و ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه این تحقیق روی داده‌های یک ایستگاه صورت گرفته است، لذا بایستی نتایج آن برای داده‌های بیشتری مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد و این می‌تواند بعنوان یک ایده در پژوهش‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرد.

آزمون بررسی واریانس خروجی الگوریتم‌های مورد بررسی و داده‌های مشاهداتی نشان داد که فرض H_0 رد شده و بنابراین تنها الگوریتم GBM دارای تفاوت معنی‌دار با واریانس داده‌های مشاهداتی در سطح ۵٪ می‌باشد. بنابراین بر اساس دو آزمون برابری میانگین و واریانس، الگوریتم SPSA دارای کارایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه در ایستگاه سینوپتیک بیرجند می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های مهم برای ریزمقیاس‌نمایی آماری دمای بیشینه در ایستگاه بیرجند از چهار الگوریتم یادگیری ماشین شامل لاسو، ستیغی، SPSA، GBM استفاده گردید. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل متغیرهای جو بالا و نیز دمای بیشینه مشاهداتی در این ایستگاه بود که این الگوریتم‌ها برای انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های با اهمیت مورد استفاده قرار گرفتند و عملکرد این روش‌ها با شاخص‌های نش-ساتکلیف نسبی، کلینگ-گوپتا و بازده حجمی در بخش صحت‌سنجی مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین میزان اهمیت هریک از متغیرهای ورودی جو بالا در ریزمقیاس‌نمایی دمای بیشینه نشان داده شد. ارتباط بین ۲۶ متغیر جو بالا و دمای بیشینه نشان داد که دو پیش‌بینی‌کننده $(F1)mslp$ و $(F26)Temp$ دارای بالاترین ضرایب همبستگی و $P8_z$ دارای کمترین ضریب همبستگی با درجه حرارت بیشینه در

منابع

1. Aksakalli, V., & Malekipirbazari, M. (2016). Feature selection via binary simultaneous perturbation stochastic approximation, *Pattern Recognition Letters* 75: 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2016.03.002>.
2. Algin, R., Alkaya, A.F., & Agaoglu, M. (2022). *Performance of simultaneous perturbation stochastic approximation for feature selection*. In International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (pp. 348-354). Springer, Cham.
3. Babazadeh, H., Shamsnia, S.H., Bostani, F., Norozieghdam, A., & Khodakaramidwhkordi, D. (2012). Evaluation of drought, wet and prediction of Shiraz climatic parameters precipitation and temperature by using stochastic

- methods. *Journal of Geography and Urban Planning* 16(41): 23-42. (In Persian)
4. Balling Jr, R.C., & Idso, S.B. (1990). Effects of greenhouse warming on maximum summer temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology* 53(1-2): 143-147.
5. Chen, H., Xu, C.Y., & Guo, S.L. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology* 434: 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.040>.
6. Diamantopoulou, M.J., Georgiou, P.E., & Papamichail, D.M. (2010). Evaluation of artificial neural network in estimating reference evapotranspiration with minimal meteorological data. *Global Nest Journal* 13(1): 18-27.
7. Fatahi, M.H., Bamdad, A., & Rahimikhob, A. (2012). Application of association rules to monitor rainfall and drought events using sea surface temperature (Case study: Khuzestan). *Journal of Water Resource Engineering* 109-118. (In Persian with English abstract)
8. Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., & Melville, B.W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 25(4): 475-484.
9. He, R.R., Chen, Y., Huang, Q., & Kang, Y. (2019). LASSO as a tool for downscaling summer rainfall over the Yangtze River valley. *Journal of Hydrology* 64(1): 92-104. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1570210>.
10. Hessami, M., Gachon, P., Ouara, T., & St-Hilaire, A. (2008). Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environ Model Software* 23: 813-834. (In Persian)
11. Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani Moghadam, J. (2021). Examination of various feature selection approaches for daily precipitation downscaling in different climates. *Water Resources Management* 35(2): 407-427.
12. Kharin, V.V., & Zwiers, F.W. (2000). Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate* 13(21): 3760-3788. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3760:CITEIA>2.0.CO;2).
13. Meenu, R., Rehana, S., & Mujumdar, P.P. (2013). Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tungabhadra River basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Process* 27(11): 1572-1589. <https://doi.org/10.1002/hyp.9220>.
14. Muthukrishnan, R., & Rohini, R. (2016). LASSO: A feature selection technique in predictive modeling for machine learning. In 2016 IEEE international conference on advances in computer applications (ICACA) (pp. 18-20). IEEE.
15. Nasseri, M., & Zahraie, B. (2013). Performance assessment of different data mining methods in statistical downscaling of daily precipitation. *Journal of Hydrology* 492: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.017>.
16. Natekin, A., & Knoll, A. (2013). Gradient boosting machines, a tutorial. *Frontiers in Neurorobotics* 7: 21. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2013.00021>.
17. Nazeri Tahroudi, M., Amirabadizadeh, M., & Zaineli, M.J. (2017). Investigating artificial intelligence and regression methods in simulating daily temperature values. *Meteorology and Atmospheric Sciences* 1(1): 65-76. (In Persian)
18. Niknam, F. (2013). *Climatic data mining to present a climate forecasting model in Isfahan Province*. University of Shiraz.
19. Omidvar, K., Shafii, Sh., Taghizadeh, Z., & Alipur, M. (2015). Efficient evaluation of decision tree model in Kermanshah Synoptic station rainfall forecast. *Journal of Applied Geosciences Research* 14(34): 89-110. (In Persian)
20. Pal, M., & Deswal, S. (2009). M5 model tree based modeling of reference evapotranspiration. *Hydrologic Process* 23: 1437-1443. <https://doi.org/10.1002/hyp.7266>.
21. Panahi, M., & Mirshahi, S.H. (2016). Assessment among two data mining algorithms CART and CHAID in forecast air temperature of the Synoptic station of Arak. *Journal of Environmental Science* 13(4): 52-58. (In Persian)
22. Salahi, B., & Fateminiya, F.S. (2017). Forecasting frost changes in the city of Kashan based on the simulation of general atmospheric circulation model. *Journal of Geography and Environmental Planning* 28(3): 20-36. (In Persian)
23. Sfandiari, F., Hosseini, S.H., Azadimobaraki, M., & Hejazizadeh, Z. (2010). Predict the average monthly temperature in Sanandaj station using the model (MLP) MLP Network. *Journal of Iran Geographic* 8(27): 45-65. (In Persian)
24. Troncoso, A., Salcedo Sanz, S., Casanova Mateo, C., Riquelme, J.C., & Prieto, L. (2015). Local model based regression trees for very short-term wind speed prediction. *Renewable Energy* 81: 589-598.
25. Zhang, X., Yan, X., & Chen, Z. (2016). Reconstructed regional mean climate with Bayesian model averaging: a case study for temperature reconstruction in the Yunnan-Guizhou plateau, China. *Journal of Climate* 29(14): 5355-5361. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0603.1>.



Synoptic-Dynamic Analysis of Heavy Rainfall Leading to Flooding in Golestan Province in March 2019

F. Abdolalizadeh^{1*}, A.M. Khorshiddoust²

Received: 01-10-2022

Revised: 24-12-2022

Accepted: 25-12-2022

Available Online: 25-12-2022

How to cite this article:

Abdolalizadeh, F., & Mohammad-Khorshiddoust, A. (2023). Synoptic-Dynamic Analysis of Heavy Rainfall Leading to Flooding in Golestan Province in March 2019. *Journal of Water and Soil* 37(1): 145-164. (In Persian with English abstract).
<https://doi.org/10.22067/jsw.2022.78803.1203>

Introduction

Heavy rains often occur in small areas, but they may be the result of large-scale systems and their energy and moisture are provided from distant areas (Mohamadei et al., 2010). Therefore, identification of synoptic systems is of great importance in order to predict precipitation. Although rain has many positive effects on human life, heavy rain can cause one of the most dangerous and damaging natural disasters, namely floods. Every year, floods cause many human and financial losses in different regions of the world. Floods are more effective in vulnerable areas and cause the loss of human lives, damage to property and products, disruption of transportation and services, and other economic losses (Kheradmand et al., 2018). In March 2019, heavy rains occurred in Golestan province, which caused flooding in parts of this province, especially in the cities of Gonbad-Kavus and Aqqala. Most of this heavy rain and flood occurred in the Gorgan River basin. According to meteorological reports, the rain started from the night of 03.17.2019 and continued until 03.21.2019, although the heaviest rainfall occurred from the 03.18.2019. The volume of the flood was so great that the dams on the Gorgan River could not accommodate it. According to the reports of the regional water company of Golestan province, the flood entered the Bostan dam at 1 am on 03/19/2019, and after passing through it, entered the Vashmgir dam at 6 am, and then on 03.21.2019 entered the city of Aqqala. The damage of this flood was estimated at about 4800 billion Tomans, which includes damage to 17800 residential units, damage to farms, transportation infrastructure, 40% reduction in tourism, damage to industrial units, unemployment of about 3000 people, and damage to the nomads of the province. (Islamic Republic News Agency, 04.09.2019). Considering the heavy damage caused by the mentioned heavy rain and flood in Golestan province, it is necessary to identify and analyze the causes of its occurrence in order to plan and take the necessary measures to prepare and deal with such incidents.

Materials and Methods

The study area is Gorganrood watershed, most of this area is located in Golestan province. Golestan province is one of the northern provinces of the country and is located in the southeast of Caspian sea. In this research, in order to identify and analyze the heavy rain that occurred in Golestan province in March 2019, which led to severe flooding, several types of data were used (data from meteorological stations, NCEP/NCAR reanalyzed data, MODIS satellite images, GPM precipitation products). First, using the rainfall data of the synoptic stations located in the Gorgan River watershed, the time of heavy rainfall was identified, and then using the data of the aforementioned stations and several stations outside the basin, a rainfall zoning map was prepared. MODIS satellite images were also used to check the position of precipitation system and cloudiness of region. Using GPM satellite rainfall products called IMERG, which were extracted on a half-hourly basis, as well as the main synop reports of meteorological stations, which are reported on a six-hourly basis, the intensity of rainfall was investigated. In addition, the physical conditions of the basin were investigated using the topography and slope map of the basin prepared from the DEM layer of the region. In the following, using the reanalyzed data of the NCEP/NCAR

1- Meteorologist, I.R. Iran Meteorological Organization, East Azerbaijan Bureau of Meteorology

(*- Corresponding Author Email: f.abdolalizadeh@tabrizu.ac.ir)

2- Professor of Climatology Department, Tabriz University, Tabriz, Iran

database (National Center for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research of the United States), synoptic maps including maps of land surface pressure, geopotential height of the upper atmosphere, Omega (indicates the speed of vertical movements of the atmosphere), wind direction and speed, moisture flux convergence function, frontal function, specific humidity, atmospheric precipitable water and Hoff-Müller diagram were drawn to identify the synoptic and dynamic factors of the mentioned precipitations.

Results and Discussion

The results of the present research in the analysis of flood factors can be summarized as follows:

- Survey of the topography and slope of the Gorganrood basin revealed that the physical conditions of the basin are such that the potential for flooding is high.
- The amount of rainfall in 24, 6 and a half hour intervals in the study area were investigated and it was shown that the rainfall occurred on March 17, 18 and 19, especially on March 18, in terms of the intensity of rainfall were very intense.
- Investigation of the state of the middle troposphere showed that the formation of the Rossby wave and the meridional expansion of one of its troughs, along with the creation of a positive vorticity that dominated the studied area on the seventeenth of March, are the main factors in the creation of a baroclinic atmosphere and the dynamic ascent of air.
- Investigation of the synoptic-dynamic conditions of the lower levels of the troposphere showed that in the lower levels of the low-altitude synoptic system with closed meters, at the same time as the deep trough reigns over the region, it has been formed and strengthened during peak rainfall times and has led to a strong rise of air.
- Investigating the state of atmospheric humidity in the study area and identifying sources of moisture supply using special humidity maps, moisture flux convergence function and atmospheric flow paths were carried out.
- Investigating the omega variable in the vertical profile of the atmosphere using the Hoff-Mueller diagram showed that during the times of precipitation events, upward movements prevailed in all levels of the troposphere, especially during the peak of precipitation, the upward movements became more intense in the lower levels.
- Identifying the type of clouds using MODIS products showed that during heavy rains, especially on March 18, deep convective clouds with a high density of water were formed in the region, which extended up to a height of 300 hectopascals and were very thick.

Keywords: Flood, Gorganrood basin, Heavy rainfall, Moisture flux convergence

مقاله پژوهشی

جلد ۳۷، شماره ۱، فروردین-اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۱۶۴-۱۴۵

تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین منجر به سیل استان گلستان در ماه مارس ۲۰۱۹

فیروز عبدالعلی زاده^{۱*} - علی محمد خورشید دوست^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

چکیده

طی روزهای هفدهم تا بیست و یکم ماه مارس ۲۰۱۹ (۲۶ اسفند ۱۳۹۷ تا ۱ فروردین ۱۳۹۸) بارش باران سنگین در استان گلستان (حوضه آبریز گرگانود) باعث ایجاد سیل و آبگرفتگی در مسیر گرگانود گردید که خسارات بسیار زیادی به شهرها، روستاها و بخش کشاورزی وارد آورد. لذا در این تحقیق اقدام به بررسی و تجزیه و تحلیل عوامل رخداد سیل مذکور به ویژه عوامل سینوپتیکی-دینامیکی وقوع بارش سنگین، گردید. جهت تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین، با استفاده از منابع داده‌ای مختلف (داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، پایگاه NCEP/NCAR، محصولات ماهواره MODIS و محصولات ماهواره GPM) ابتدا زمان اوج بارش‌ها و شدت بارش مورد شناسایی قرار گرفت و سپس نقشه‌های سینوپتیک (نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در سطوح میانی و زیرین تروپوسفر، چرخندگی نسبی، امگا، سمت و سرعت باد، همگرایی شار رطوبت، تابع جبهه‌زایی، رطوبت ویژه جو و نمودار هوف-مولر) تهیه گردیدند و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بارش سنگین از ساعت ۱۸ (به وقت جهانی) روز هفده مارس شروع شده و تا ساعت ۱۸ روز هجده مارس ادامه داشته است و اوج شدت بارش‌ها در روز هجده مارس در اکثر ایستگاه‌ها بین ساعت‌های ۰۶ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۸ بوده است. بررسی نقشه‌های سینوپتیک بیان داشت، منشأ سیستم بارشی تراف عمیق واقع بر بستر موج را سی می‌باشد که در اواخر روز هفده مارس به منطقه مورد مطالعه رسیده و باعث شکل‌گیری سیکلونی عمیق در این ناحیه شده است و با تزریق رطوبت از آب‌های جنوبی ایران و دریای خزر توسط جریانات جوی به داخل سیکلون وقوع بارش‌های سنگین را منجر گشته است. از سوی دیگر، توپوگرافی و شیب حوضه شرایط لازم را برای رخداد سیل فراهم آورده است.

واژه‌های کلیدی: بارش سنگین، حوضه گرگانود، سیل، همگرایی شار رطوبت

مقدمه

توسعه شهرنشینی ایجاد نمایند (Karianne et al., 2023).

سیل هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی در مناطق مختلف دنیا به بار می‌آورد. سیل بیشتر در مناطق آسیب‌پذیر تأثیرگذار است و باعث از دست رفتن زندگی انسان‌ها، آسیب به دارایی و محصولات، اختلال در حمل و نقل و خدمات‌رسانی و سایر خسارات اقتصادی می‌شود (Kheradmand et al., 2018). تعداد افرادی که در معرض خطرات ناشی از سیل قرار دارند بیش از همه خطرات طبیعی دیگر است (مرکز کاهش مخاطرات آسیا، ۲۰۱۱) که یکی از دلایل آن می‌تواند افزایش سیل در ۳۰ سال گذشته باشد (Freer et al., 2011).

بارندگی‌های سنگین اغلب در مناطق کوچک رخ می‌دهند، اما ممکن است حاصل سیستم‌های بزرگ مقیاس بوده و انرژی و رطوبت آن‌ها از مناطق دوردست تأمین شده باشد (Mohamadei et al., 2010). بارش یکی از پدیده‌های جوی است که از تغییرپذیری زمانی و مکانی زیادی برخوردار است و عوامل مختلفی در وقوع آن نقش دارند؛ به همین دلیل مسئله پیش‌بینی بارش از پیچیدگی زیادی برخوردار است. رویدادهای بارش حدی می‌توانند منجر به آب‌های سطحی اضافی و سیل شده و خسارات اجتماعی زیادی را به دلیل

۱- کارشناس هواشناسی سینوپتیک، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی
(*) نویسنده مسئول: Email: f.abdolzadeh@tabrizu.ac.ir

۲- استاد گروه آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- ساعت‌های ذکر شده در سراسر مقاله به وقت جهانی (UTC) می‌باشند.

جمهوری اسلامی، ۱۳۹۸/۱/۲۰). با توجه به خسارات سنگینی که بارش سنگین و سیل مذکور در استان گلستان بر جای گذاشت لازم است تا عوامل وقوع آن مورد شناسایی و تحلیل قرار گیرد تا برنامه‌ریزی و اقدامات لازم جهت آمادگی و مقابله در صورت تکرار چنین حوادثی انجام گیرد.

تاکنون مطالعات زیادی در خصوص بارش‌های سنگین و عوامل ایجادکننده آن‌ها در مناطق مختلف دنیا انجام گرفته است. کموشجو و همکاران (Komuscu et al., 1998) عوامل هواشناسی ایجادکننده سیلاب‌های روزهای سوم و چهارم نوامبر ۱۹۹۵ از میر ترکیه را مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان دادند عوامل بارش شدید فرارفت هوای گرم و مرطوب در ترازهای پایین جو، چرخندگی مثبت و واگرایی شدید در ترازهای بالا هستند. رضاکوا و همکاران (Rezacova et al., 2005) بارش سنگین آگو ست ۲۰۰۲ در کشور چک را تحلیل کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد گرادیان شدید فشار در قسمت عقب سیکلون که با حرکت کند به سمت شمال شرق اروپای مرکزی پی‌شروی می‌کرد همراه با رطوبت زیاد و استیلای چرخندگی مثبت در ترازهای مختلف جو دلایل اصلی بارش سنگین بودند. مسترانجلو و همکاران (Masterangelo et al., 2011)، ساز و کار بارش‌های سنگین جنوب شرق ایتالیا را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد رودباد سطح پایین (Low-Level Jet Stream) ناشی از الگوی بزرگ مقیاس جوی، یک محیط ناپایدار همرفتی ایجاد کرد که در تمام مدت حضور در منطقه موجب فرارفت توده‌های هوای مرطوب در ترازهای پایین جو شده و منجر به رخداد بارش سنگین گردید.

آگاهی دقیق در مورد عوامل رخداد بارش‌های حدی به منظور پیش‌بینی بهتر آن بسیار مهم می‌باشد (Karianne et al., 2023). توپوگرافی، خاک و کاربری اراضی با ممانعت در نفوذ و جذب آب توسط خاک، در تولید سیل مشارکت می‌کنند. اگر الگوهای سینوپتیکی تولید کننده بارش‌های سنگین شناسایی شوند، چند روز قبل می‌توان با رؤیت شروع توالی الگوهای مختوم به ایجاد سیل، وقوع سیلاب را پیش‌بینی کرد (Ghasemifar et al., 2017).

در آخرین روزهای سال ۱۳۹۷ و اوایل ۱۳۹۸ (ماه مارس ۲۰۱۹) بارش‌های شدیدی در استان گلستان به وقوع پیوست که باعث ایجاد سیل و آبگرفتگی در بخش‌هایی از این استان به ویژه در شهرهای گنبد کاووس و آق قلا گردید. عمده این بارش سنگین و سیل در حوضه گرگانرود رخ داد. طبق گزارشات هواشناسی بارندگی از شب ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ شروع شد و تا ۱۳۹۸/۱/۱ ادامه داشت که البته بیشترین بارش از صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۷ تا صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ اتفاق افتاد. حجم سیلاب به حدی بود که سدهای واقع بر روی گرگانرود توان مهار آن را نداشتند (جدول ۱). براساس گزارشات شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان، سیلاب از ساعت ۱ بامداد ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ به سد بوستان وارد شد و با عبور از آن در ساعت ۶ صبح ۱۳۹۷/۱۲/۲۸ وارد سد وشمگیر شد و سپس در روز ۱۳۹۸/۱/۱ وارد شهر آق قلا گردید. خسارت این سیل حدود ۴۸۰۰ میلیارد تومان برآورد شد که شامل خسارت به ۱۷۸۰۰ واحد مسکونی، آسیب به مزارع، زیر ساخت‌های حمل و نقل، کاهش ۴۰ درصدی گردشگری، خسارت به واحدهای صنعتی و بیکاری حدود ۳۰۰۰ نفر و آسیب به عشایر استان می‌باشد (خبرگزاری

جدول ۱- حجم سیلاب رودخانه گرگانرود در بازه زمانی ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ الی ۱۳۹۸/۱/۸

Table 1- The flood volume of the Gorganrood river in the period from 03.12.2019 to 03/14/2018

مکان اندازه‌گیری سیلاب Flood measurement location	حجم سیلاب (میلیون متر مکعب) Flood volume (million cubic meters)
خروجی سد گلستان Golestan Dam outlet	130
ورودی میان حوضه (باغه سالیان) The entrance to the middle of the basin (BsgheSalian)	40
ورودی میان حوضه (آراز کوسه) The entrance to the middle of the basin (ArazKooseh)	78
میان حوضه بین سدهای گلستان و وشمگیر Middle of the basin between Golestan and Vashamgir dams	33
ذخیره شده در سدهای بوستان گلستان و وشمگیر Stored in Boostan and Vashemgir Dams	23
جمع کل سیلاب The total flood	304

منبع: شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان گلستان
Source: Regional water company of Golestan

دینامیکی وقوع سیل بندرعباس در مارس ۲۰۱۴ را شنا سایی کردند. بررسی‌ها نشان داد مهمترین عامل ناپایداری جوی سیستم کمفشار دینامیکی است که به صورت یک ترف کمفشار از ترکمنستان به سمت تنگه هرمز کشیده شده بود، همچنین وجود رودباد قوی بر روی استان هرمزگان و انتقال رطوبت از تنگه هرمز در رخداد بارش سنگین مؤثر بودند. میریان و همکاران (Mirian et al., 2020)، بارش سنگین ۱۹۷۴/۱۲/۵ در ایران را از نظر سینوپتیکی مورد تحلیل قرار دادند. نتایج نشان دادند در زمان رخداد بارش، ناحیه همگرایی قوی در سطح زمین شکل گرفته که منطبق بر ناحیه واگرایی تراز میانی جو بوده و صعود دینامیکی هوا را موجب شده است. حسینی صدر و همکاران (Hoseini Sadr et al., 2020)، ساز و کار سینوپتیکی بارش سنگین ۱۴ آوریل ۲۰۱۷ در شمال غرب ایران را بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان دادند استیلای منطقه چرخندی ترف مدیترانه در تراز میانی جو به همراه رودباد جبهه قطبی در سطوح فوقانی شرایط ناپایداری و صعود هوا را فراهم کرده‌اند و نقشه‌های شار رطوبت نشان دادند منبع رطوبت بارش سنگین دریای سرخ بوده است. بیرانوند و همکاران (Beiranvand et al., 2022)، بارش سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد را مورد ارزیابی قرار دادند. تحلیل سینوپتیکی این رخداد نشان داد وجود یک ترف عمیق با مرکز بسته بر روی شرق دریای مدیترانه و قرارگیری ایران در بخش جلویی این ترف شرایط را برای ورود سیستم‌های کمفشار و صعود هوا فراهم آورده است. وزش رطوبتی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان داد منابع تأمین رطوبت بارش سنگین دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج فارس هستند.

بررسی مطالعات پیشین بیانگر این نکته است که بارش‌های سنگین وابستگی زیادی به سیستم‌های سینوپتیک جوی دارند و از سوی دیگر هر منطقه تحت تأثیر سیستم‌های خاصی می‌باشد؛ بطوریکه برای تحلیل عوامل بارش‌های سنگین هر منطقه باید سیستم‌های تأثیرگذار بر آن منطقه مورد توجه قرار گیرند. از این رو در تحقیق حاضر به شناسایی سیستم‌های سینوپتیکی منجر به بارش‌های سنگین در روزهای ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹ حوضه آبریز گرگانرود در استان گلستان که باعث ایجاد سیل و خسارات سنگین در این استان گردید، پرداخته می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه تحقیق، حوضه آبریز گرگانرود می‌باشد که بیشتر مساحت آن در استان گلستان واقع شده است. استان گلستان یکی از استان‌های شمالی کشور می‌باشد و در جنوب شرق دریاچه خزر

دایان و همکاران (Dayan et al., 2015)، شرایط جوی منجر به بارش‌های حدی در غرب و شرق مدیترانه را بررسی کردند. ایشان به این نتیجه رسیدند که رطوبت مورد نیاز همرفت‌های شدید نه تنها از دریای مدیترانه بلکه از مناطق دوردست نیز تأمین می‌شود. رطوبت از طریق سیستم‌های سینوپتیکی در لایه‌های میانی تروپوسفر منتقل می‌شود. گاهی بارش‌های شدید مدیترانه ناشی از ترکیب چندین سیستم جوی در مقیاس‌های مختلف است (از جمله همرفت محلی، سیستم‌های سینوپتیک و همرفت میان مقیاس). فلونی و همکاران (Feloni et al., 2016)، عوامل سینوپتیکی وقوع بارش‌های سنگین فصلی در منطقه آنیکای ایتالیا را مطالعه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد در رخداد بارش‌های پاییزی، گردش سیکلونی از ترازهای میانی تا سطوح پایینی جو تشکیل می‌شود، بخصوص در سطوح ۸۵۰ و ۹۲۵ هکتوپاسکالی گردش سیکلونی بسته بر روی مرکز ایتالیا شکل می‌گیرد. شرایط مذکور در فصل زمستان گسترده‌تر می‌شود. بالتاجی و همکاران (Baltaci et al., 2017)، سیل ۲۴ آگوست ۲۰۱۵ در منطقه آرتوین ترکیه را از نظر عوامل هواشناسی مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان دادند استقرار یک کمفشار بریده بر روی شرق دریای سیاه منجر به همگرایی رطوبت در سطوح پایین جو شد و علاوه بر آن انتقال رطوبت توسط جریان‌های گرم شمالی از طریق دریای سیاه و جریان‌های خنک جنوبی شرایط ناپایدار جوی را تشدید کرده و با ایجاد سلول‌های همرفتی بارش شدید به وقوع پیوست. ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2022)، کانون بارش‌های سنگین کوتاه‌مدت سواحل جنوبی چین را بررسی کردند. نتایج نشان دادند بارش‌های سنگین عمدتاً در مناطق ساحلی رخ می‌دهند و توپوگرافی نقش مهمی در موقعیت کانون‌های بارش سنگین دارد.

قویدل رحیمی و حاتمی (Gavidel Rahimi and Hatami, 2016) عوامل سینوپتیکی منجر به بارش سنگین ۸ اسفند ۱۳۸۸ ایوانغرب را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد مراکز کمفشار واقع بر روی ایران در سطح زمین و ترف عمیق مستقر بر روی خاورمیانه که ایران در قسمت شرق این ناوه قرار گرفته بود، همچنین تشکیل سردچال انباشته از هوای سرد و مرطوب و جریان رودباد قوی و ایجاد واگرایی در ستون فوقانی جو از عوامل اصلی صعود هوا و بارش سنگین بودند. امیدوار و همکاران (Omidvar et al., 2018)، به تحلیل سینوپتیکی-دینامیکی بارش‌های سنگین روزهای ۵ الی ۸ آبان ۱۳۹۴ در استان کرمانشاه پرداختند. تحلیل‌ها نشان دادند گرادیان شدید فشار بین کمفشار سودانی و پرفشار اروپایی عامل اصلی ایجاد ناپایداری شدید جوی بود. همچنین ریزش هوای سرد عرض‌های بالا، انتقال رطوبت از عرض‌های پایین و وجود رودباد قوی در سطح ۲۵۰ هکتوپاسکالی بر فراز منطقه از عوامل تشدید کننده بارش بودند. حبیبی و همکاران (Habibi et al., 2019) عوامل سینوپتیکی-

شرایط فیزیکی حوضه بررسی شد.

در ادامه با استفاده از داده های بازتحلیل شده پایگاه NCEP/NCAR (مرکز ملی پیش بینی محیطی-مرکز ملی پژوهش های جوی ایالات متحده) نقشه های سینوپتیکی شامل نقشه های ارتفاع ژئوپتانسیل تروپوسفر میانی و زیرین، چرخندگی نسبی، امگا، سمت و سرعت باد، تابع همگرایی شار رطوبت، تابع جبهه زایی، رطوبت ویژه و نمودار هوف-مولر جهت بررسی شرایط سینوپتیکی-دینامیکی تروپوسفر میانی و زیرین و همچنین شناسایی وضعیت رطوبتی و منابع تأمین آن، ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفتند. سپس با استفاده از محصولات ماهواره MODIS-Aqua (تصاویر طیف مرئی، ضخامت نوری ابر و فشار قله ابر) شرایط ابرناکی و نوع ابرهای در زمان رخداد بارش سنگین بررسی شد.

نتایج و بحث

شناسایی توزیع زمانی و مکانی بارش ها

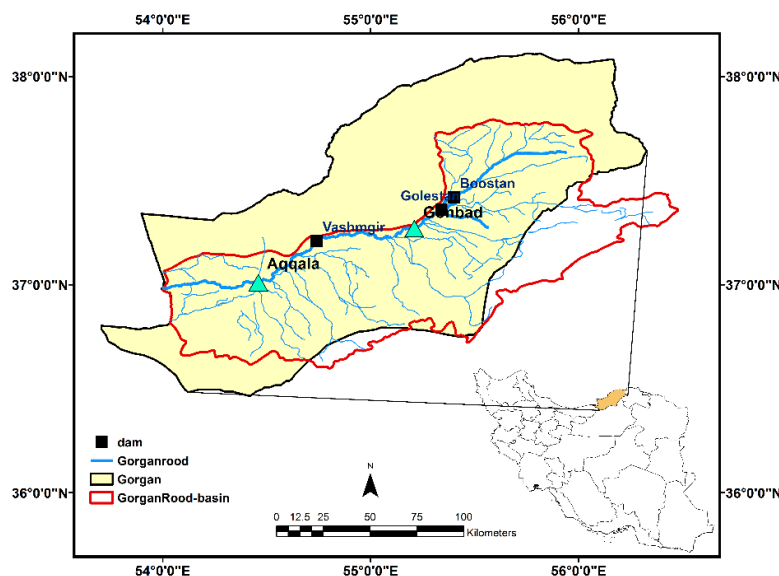
بارش منجر به سیل در ماه مارس ۲۰۱۹ در استان گلستان از هفده مارس آغاز شد و تا بیست و یکم مارس ادامه داشت. به منظور شناسایی زمان اوج بارش ها طی این چند روز، آمار بارش ایستگاه های هواشناسی واقع در حوضه گرگانرود بررسی شد. بارش ۲۴ ساعته چند ایستگاه منتخب از هفدهم تا بیست و یکم مارس در شکل ۲ ارائه شده است.

واقع شده است. گرگانرود یکی از رودخانه های شمال شرق ایران است. این رود از رشته کوه آلاداغ در بجنورد سرچشمه گرفته و پس از طی ۲۰۰ کیلومتر و گذشتن از ترکمن صحرا وارد دشت گرگان شده و در نزدیکی بندر ترکمن به دریای خزر می ریزد. در شکل ۱ موقعیت جغرافیای حوضه گرگانرود، شبکه آبراهه ها، سدهای واقع بر روی گرگانرود و شهرهای گنبد کاووس و آق قلا که تحت تأثیر سیل قرار داشتند، نشان داده شده است.

در این تحقیق به منظور شناسایی و تحلیل بارش سنگین رخ داده در استان گلستان در روزهای پایانی سال ۱۳۹۷ (ماه مارس ۲۰۱۹) که منجر به سیل شدید گردید، از چندین نوع داده استفاده شد (داده های ایستگاه های هواشناسی، داده های بازتحلیل شده NCEP/NCAR، محصولات ماهواره ای MODIS، محصولات بارشی GPM).

ابتدا با استفاده از داده های بارش ایستگاه های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز گرگانرود، زمان وقوع بارش سنگین شناسایی شد و سپس با استفاده از داده های ایستگاه های مذکور و چندین ایستگاه خارج از حوضه، نقشه بارش تهیه گردید. مشخصات ایستگاه های مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

با استفاده از محصولات بارشی ماهواره GPM با عنوان IMERG که به صورت نیم ساعته استخراج شد و همچنین گزارشات سینوپتیک ایستگاه های هواشناسی که به صورت شش ساعته گزارش می شوند، شدت بارش مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر آن، با استفاده از نقشه توپوگرافی و شیب حوضه تهیه شده از لایه DEM منطقه،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی استان گلستان و حوضه آبریز گرگانرود

Figure 1- Geographical location of Golestan province and Gorganrood watershed

جدول ۲- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق

Table 2- Meteorological stations used in the research

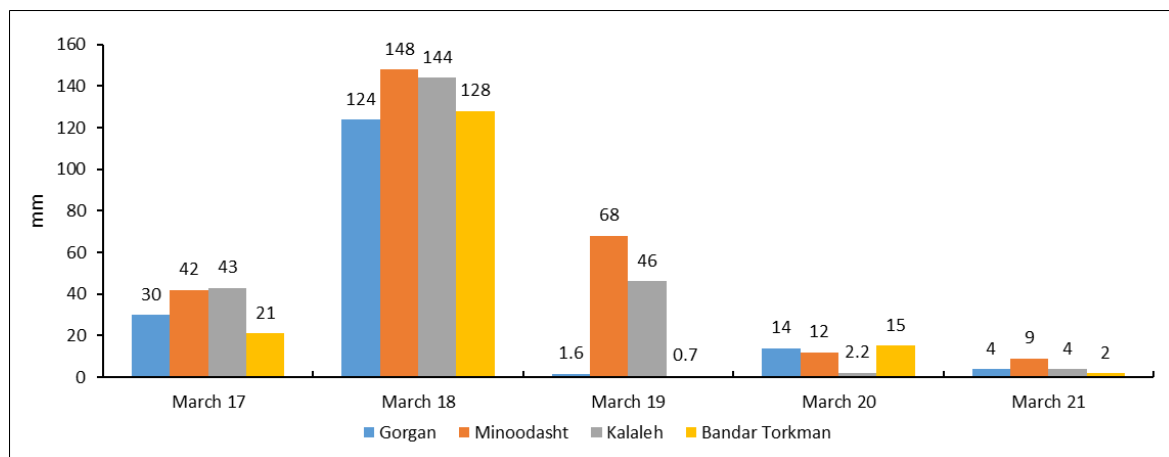
نام ایستگاه Station Name	عرض جغرافیایی Lat	طول جغرافیایی Lon	ارتفاع Elevation
بندر ترکمن BandarTorkman	36.9	54.07	-20
پارک ملی گلستان Park Meli Golestan	37.22	55.56	735
علی آباد Aliabad	36.9	54.88	184
قپان Ghapan	37.64	55.71	314
کلاله Kalaleh	37.39	55.46	128
گرگان Gorgan	36.91	54.41	0
گنبد کاووس GonbadKavoos	37.27	55.21	37
مینودشت Minoodasht	37.37	55.63	223
هاشم آباد Hashemabad	36.85	54.30	13
کارکنده Karkandeh	36.76	54.30	110
کردکوی Kordkooy	36.82	54.11	3
رضوان Rezvan	37.11	55.80	1356
مراوه تپه* MaravehTappeh	37.80	55.94	460
بندر گز* BandarGaz	36.77	53.95	-14
اینچه برون* Incheborun	37.45	54.72	7
دامغان* Damghan	36.15	54.32	1155
جاجرم* Jajrood	36.95	56.33	984
میامی* Meyami	36.41	55.63	1081
شاهرود* Shahrood	36.38	54.93	1325

*ایستگاه‌هایی که خارج حوضه آبریز گرگانرود قرار دارند و برای درونیابی بارش استفاده شدند

*The stations that are outside the Gorganrood catchment and were used to interpolate precipitation

ساعته سینوپ‌های اصلی بررسی شد و نتایج نشان داد بیشترین مقدار بارش در روز هجدهم مارس به وقوع پیوسته است (جدول ۳). بنابراین نقشه‌های سینوپتیک عمدتاً برای زمان اوج بارش یعنی روز هجدهم مارس ترسیم گردیدند.

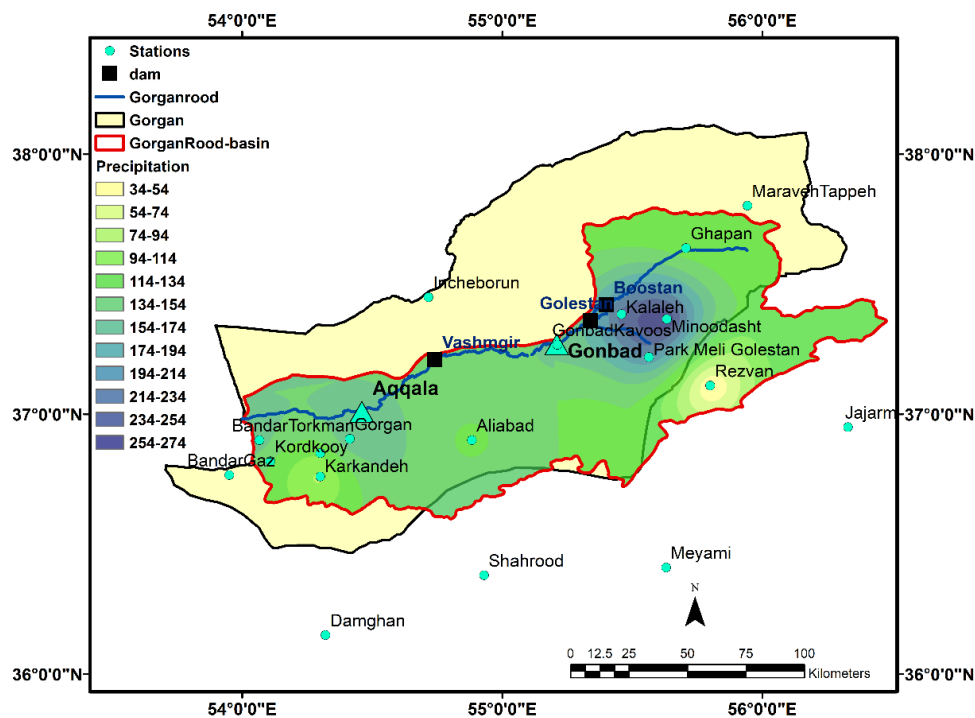
با توجه به نمودار مشاهده می‌شود بیشترین مقدار بارش در روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس به ثبت رسیده است؛ بطوریکه در روز ۱۸ مارس بارش‌های بالای ۱۲۰ میلی‌متر طی ۲۴ ساعت مشاهده می‌شود. البته لازم به ذکر است که بارش ۲۴ ساعته برای هر روز از مجموع بارش گزارش شده سینوپ‌های اصلی ایستگاه‌های هواشناسی از ساعت ۰۰ تا ۲۴ همان روز محاسبه شده است. از این رو گزارشات ۶



شکل ۲- نمودار بارش ۲۴ ساعته چند ایستگاه منتخب حوزه گرگانرود از ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹
Figure 2- 24-hour precipitation chart of selected stations of Gorganrood basin

بارش سنگین به وقوع پیوسته است؛ بطوری که در اکثر مناطق حوزه میزان بارش بالای ۹۰ میلی متر است. همچنین نقشه مذکور نشان می دهد بیشترین مقدار بارش که بیش از ۲۵۰ میلی متر است در ناحیه ایستگاه های کلاله، مینودشت و پارک ملی گلستان رخ داده است.

پس از شناسایی زمان وقوع بارش سنگین، اقدام به شناسایی توزیع مکانی بارش ها گردید. بدین منظور مجموع بارش هفدهم تا بیست و یکم مارس در حوزه گرگانرود ترسیم گردید (شکل ۳). نقشه مجموع بارش نشان می دهد طی این چند روز در اکثر مناطق حوزه،



شکل ۳- نقشه مجموع بارش طی روزهای ۱۷ تا ۲۱ مارس ۲۰۱۹ در حوزه گرگانرود
Figure 3- Total rainfall during March 17-21, 2019 in Gorganrood basin

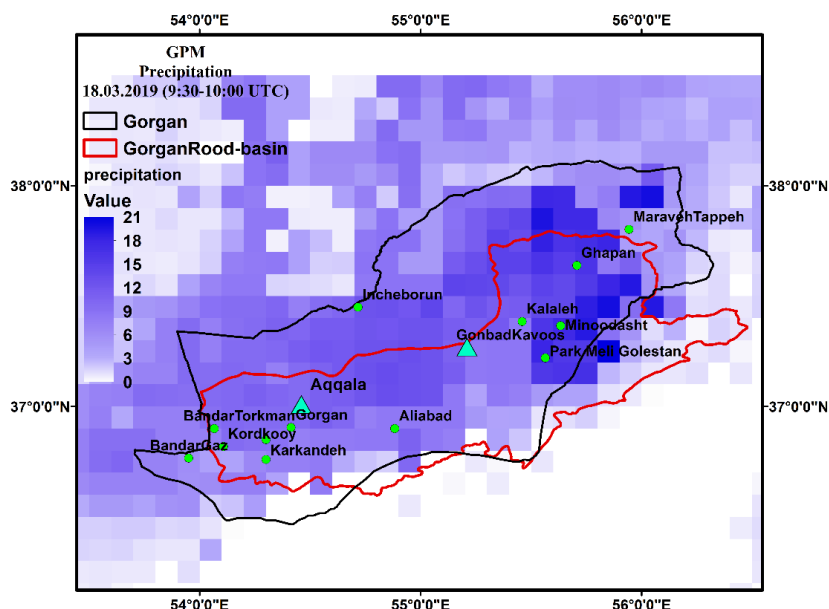
بارش ۶ ساعته برای زمان اوج بارش در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بررسی میزان بارش‌های ۶ ساعته نشان می‌دهد در روز هجدهم و نوزدهم در ساعت‌های ۰۶ تا ۱۲ و ۱۲ تا ۱۸ بارش‌های بسیار شدیدی رخ داده است؛ مثلاً در برخی ایستگاه‌ها بارش‌های ۴۹، ۶۹، ۸۳ و ۸۷ میلی‌متر طی ۶ ساعت مشاهده می‌شوند که در گزارشات هواشناسی این میزان بارش جزء بارش‌های بسیار شدید طبقه‌بندی می‌شود.

در وقوع سیلاب شدت بارش یعنی مقدار بارش نسبت به مدت زمان بارش از عوامل مهم به شمار می‌رود. بر سی بارش ۲۴ ساعته نشان داد که طی روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس بارش‌های سنگینی به وقوع پیوسته است. اما جهت بررسی دقیق‌تر زمان اوج بارش و شدت بارش در فواصل زمانی کمتر از ۲۴ ساعت، از گزارشات سینوپ‌های اصلی هواشناسی میزان بارش ۶ ساعته استخراج گردید که مقدار

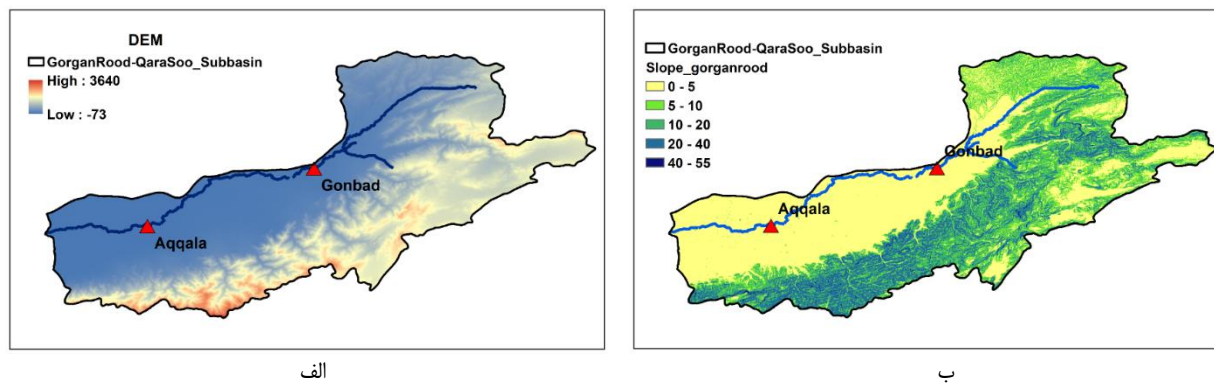
جدول ۳- داده‌های بارش ۶ ساعته چهار ایستگاه منتخب حوضه گرگانرود استخراج شده از گزارشات هواشناسی برای زمان اوج بارش

Table 3- 6-hour rainfall data of four selected stations of Gorganrood basin extracted from meteorological reports for peak rainfall time

تاریخ Date	ساعت به وقت جهانی UTC	گرگان Gorgan	مینودشت Minoodasht	کلاله Kalaleh	بندر ترکمن BandrTorkman
۱۷ مارس March 17	00-06	0	0	0	0
	06-12	0	0	0	0
	12-18	3	5	1	0.7
	18-00	27	37	42	20
۱۸ مارس March 18	00-06	28	8	7	69
	06-12	49	87	83	36
	12-18	43	30	34	20
	18-00	4	23	20	3
۱۹ مارس March 19	00-06	1	30	22	0.4
	06-12	0.4	30	19	0.3
	12-18	0.2	7	0.8	0
	18-00	0	0.7	4	0



شکل ۴- تصویر محصول ماهواره GPM برای بارش از ساعت ۹:۳۰ تا ۱۰:۰۰ (به وقت جهانی) روز ۱۸ مارس ۲۰۱۹
Figure 4- GPM satellite product image for rainfall from 9:30 to 10:00 (UTC) on March 18, 2019



شکل ۵- نقشه طبقه‌بندی شیب (الف) و توپوگرافی (ب) حوضه گرگانرود
Figure 5- Slope classification (a) and topography (b) of Gorganrood basin

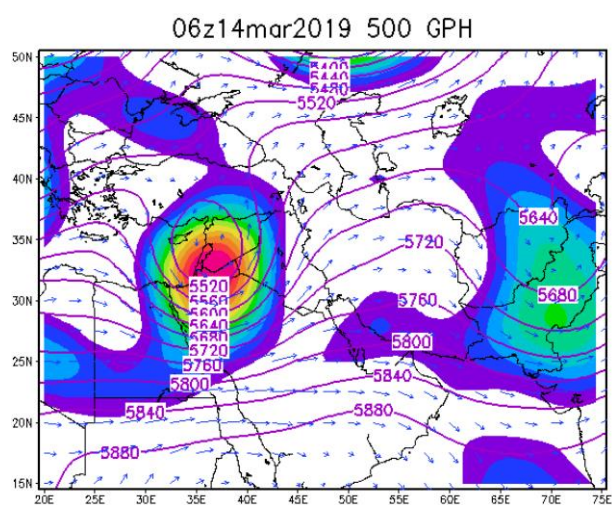
بسته در شرق مدیترانه شکل گرفته که در روز پانزدهم (شکل ۶ ب) با حرکت شرق سو از ناحیه غربی وارد ایران شده است. در همین روز، تراف دیگری به دنبال تراف قبلی بر روی مدیترانه در حال شکل‌گیری می‌باشد و آرایش منحنی‌های هم‌ارتفاع بیان‌گر تشکیل یک موج راسبی با مقیاس بزرگ بر روی شرق اروپا و غرب خاورمیانه می‌باشد. به عبارت دیگر در روز پانزدهم، موج راسبی دارای دو تراف است که یکی بر روی غرب ایران و دیگری بر روی غرب مدیترانه قرار دارند. در این روز تراف اول با ایجاد چرخندگی مثبت منجر به ناپایداری و بارش‌های پراکنده در حوضه آبریز گرگانرود شده است. در روز ۱۶ مارس (شکل ۶ پ) همزمان با حرکت شرق سوی موج راسبی، تراف واقع بر روی غرب ایران ضمن یک حرکت شمال شرق سو تضعیف شده و از مرزهای شمال شرقی کشور خارج می‌شود، اما تراف واقع بر روی شرق مدیترانه با گسترش نصف‌النهاری موج راسبی عمیق‌تر شده و با حرکت به سمت شرق در بستر موج راسبی در روز هفدهم مارس (شکل ۶ ت) تمام سطح کشور را تحت سیطره خود درآورده است، بطوریکه در اواخر روز هفدهم منطقه مورد مطالعه در شمال شرق کشور تحت نفوذ آن قرار گرفته است. ناحیه چرخندگی مثبت در سراسر محور تراف ایجاد شده و مرکز بی‌شینه آن در مرکز تراف قرار دارد و در حال نزدیک شدن به منطقه مورد مطالعه می‌باشد. طبق داده‌های بارش شش ساعته بارندگی‌ها در استان گلستان از حوالی ساعت ۱۸ روز هفدهم مارس همزمان با ایجاد چرخندگی مثبت در منطقه آغاز شده است. در روز هجدهم مارس (شکل ۶ ث) مرکز تراف با حرکت شمال شرقی از مرکز ایران به سمت شمال شرق کشور انتقال یافته است. اکنون محور تراف حالت شمال غربی-جنوب شرقی دارد و با ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی به عرض‌های جنوب حاره‌ای، شکل‌گیری پدیده بندال و یک سردچال (کم‌ارتفاع بریده) با کنتور بسته داخلی ۵۵۲۰ ژئوپتانسیل متر در منتهی الیه جنوب شرقی دریای خزر را موجب گشته است.

علاوه بر بارش ۶ ساعته، برای بررسی شدت بارش در مقیاس زمانی کمتر از ۶ ساعت از محصولات بارش نیم ساعته ماهواره GPM استفاده گردید. در شکل ۴ یک نمونه از تصاویر بارش نیم ساعته در بازه زمانی ۹:۳۰ تا ۱۰:۰۰ (به وقت جهانی) روز هجدهم مارس ارائه شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد در حوضه گرگانرود طی نیم ساعت بارش قابل توجهی باریده است بویژه در ناحیه ایستگاه‌های کلاله، مینودشت و پارک ملی گلستان که تا ۲۰ میلی‌متر نیز می‌رسد و این میزان جزء بارش‌های بسیار شدید حساب می‌شود. از عوامل دیگر در وقوع سیلاب توپوگرافی و شیب حوضه می‌باشد. بررسی نقشه توپوگرافی منطقه نشان می‌دهد رودخانه گرگانرود در دشتی با ارتفاع پایین که در کنار کوه‌های مرتفع قرار گرفته، جریان دارد؛ بطوریکه اختلاف ارتفاع دشت با قله کوه‌ها به بیش از ۳۰۰۰ متر می‌رسد (شکل ۵ الف). از سوی دیگر نقشه شیب نشان می‌دهد حوضه گرگانرود بگونه‌ای است که کوه‌های مرتفع با شیب زیاد در حاشیه دشتی پست با شیب بسیار کم (کمتر از ۵ در صد) واقع شده‌اند (شکل ۵ ب). از این رو پتانسیل وقوع سیلاب در این حوضه زیاد است و همانطور که در زمان وقوع سیلاب مورد مطالعه رخ داد، بدلیل شیب اندک مسیر گرگانرود و قرارگیری شهرهای مختلف در حاشیه آن (از جمله گنبد کاووس و آق قلا) در صورت وقوع بارش سنگین و سیلاب، آبگرفتگی ماندگاری زیادی در این منطقه خواهد داشت.

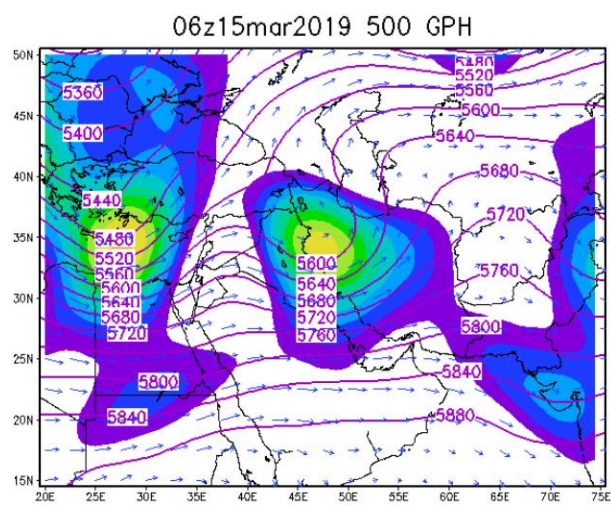
وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپوسفر میانی

با هدف شناسایی منشأ سیستم‌های سینوپتیکی بارش‌زا و نحوه تأثیرگذاری آنها بر منطقه مورد مطالعه که منجر به سیل گردید، وضعیت سینوپتیکی تروپوسفر میانی از چند روز قبل از شروع بارش‌ها تا زمان خاتمه آن مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپا سکال به همراه چرخندگی نسبی از روز چهاردهم تا بیست و دوم مارس ترسیم گردید (شکل ۶).

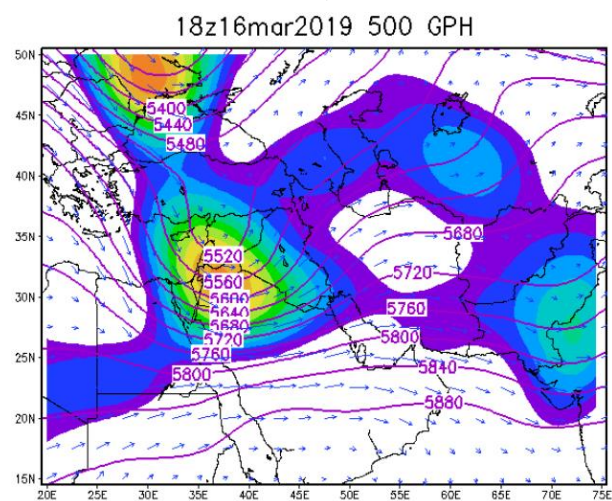
در روز ۱۴ مارس (شکل ۶ الف)، ترفانی نه چندان عمیق با مرکز



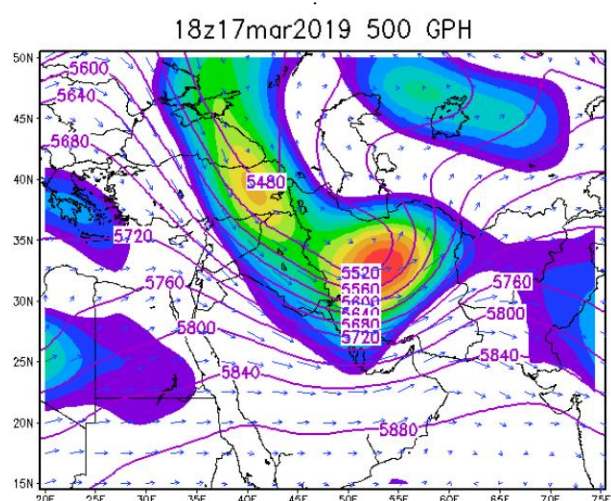
الف



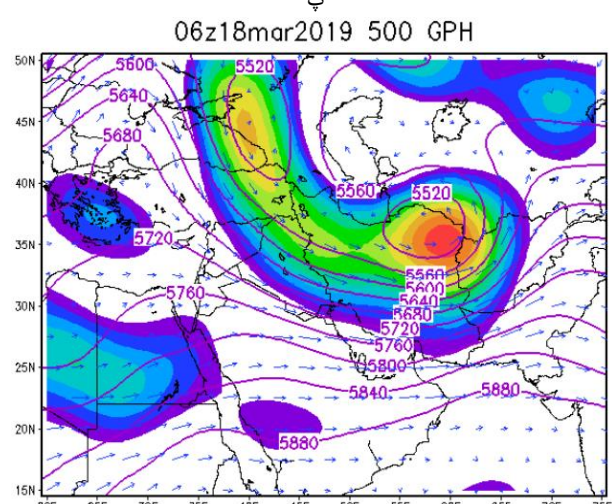
ب



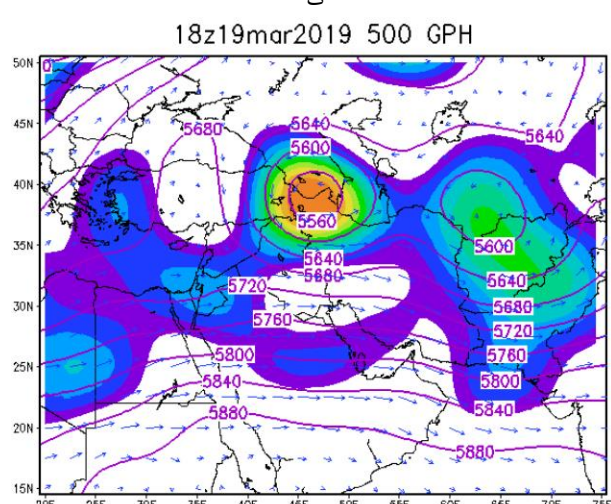
پ



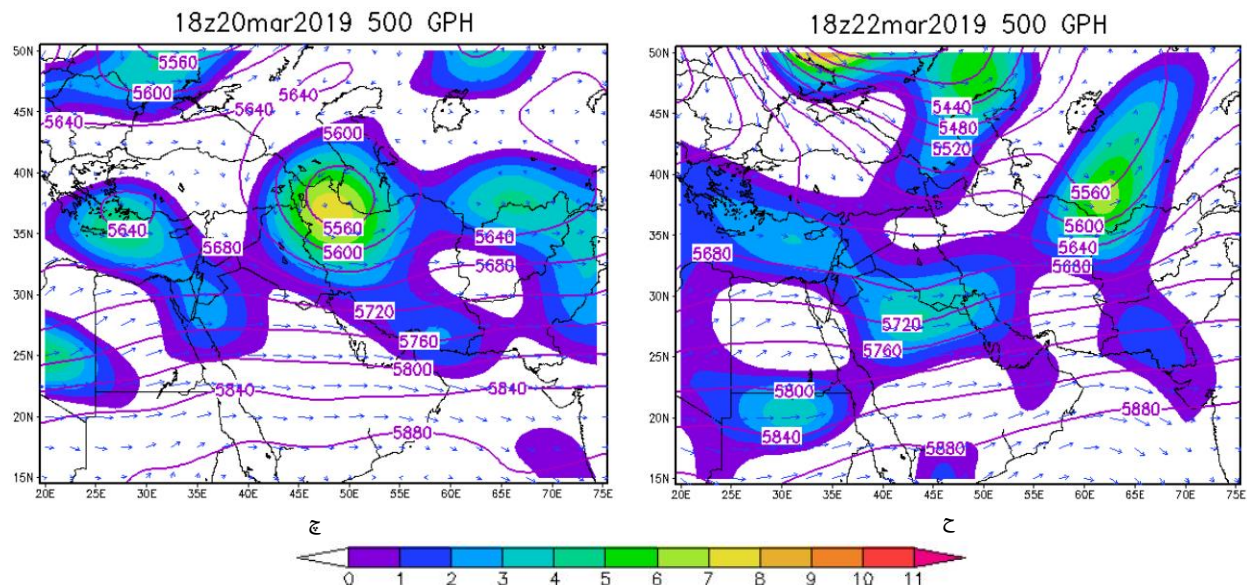
ت



ث



ج



شکل ۶- وضعیت سینوپتیکی- دینامیکی تروپوسفر میانی از ۱۴ الی ۲۱ مارس ۲۰۱۹: ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب ژئوپتانسیل متر (خطوط بنفش رنگ با فاصله ۴۰ ژئوپتانسیل متر)، بردارهای باد و چرخندگی نسبی (طیف رنگی)

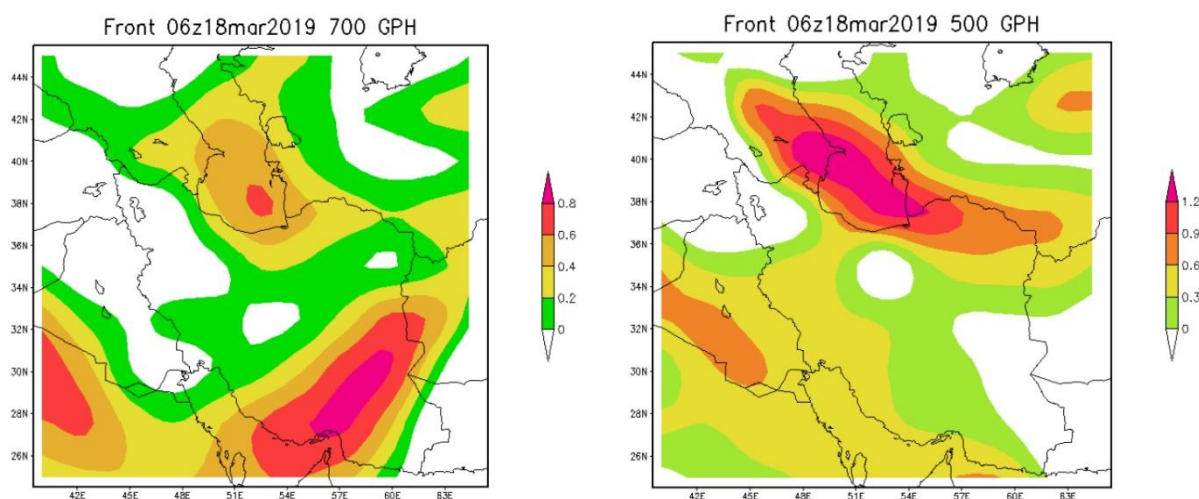
Figure 6- Synoptic-dynamic state of the middle troposphere from March 14 to 21, 2019: 500 hPa level height in geopotential meters (purple lines with a distance of 40 gpm), wind vectors and relative vorticity (color spectrum)

تراز فشاری ۸۵۰ هکتوپاسکال برای بررسی وضعیت سینوپتیکی- دینامیکی تروپوسفر زیرین انتخاب گردید. در این تراز خطوط هم‌ارتفاع توأم با متغیر امگا، خطوط هم‌دما و بردارهای باد چند روز قبل از بارندگی تا اتمام بارش‌ها مورد بررسی قرار گرفت و به دلیل حجم زیاد نقشه‌ها، مهم‌ترین نقشه‌ها در روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس در شکل ۷ ارائه شد. امگا بیانگر حرکات عمودی جو بر حسب پاسکال بر ثانیه است که مقداری منفی آن سرعت قائم بالاسوی هوا را نشان می‌دهد. قبل از شروع بارش در روز ۱۷ مارس (شکل ۸ الف)، با ورود زیانه‌های کم‌ارتفاع از سمت شمال غرب کشور در بستر موج را سبی، یک مرکز کم‌ارتفاع در غرب کشور با کنتور بسته ۱۴۰۰ ژئوپتانسیل‌متر در حال شکل‌گیری است. خطوط هم‌دما و بردارهای باد بیانگر فرارفت هوای سرد عرض‌های شمالی به سوی عرض‌های جنوبی در منطقه غرب کشور می‌باشند. مرکز کم‌ارتفاع طی ساعات بعدی، ضمن گسترش با حرکت شرق سو نواحی شمالی کشور را در بر گرفته است (شکل ۸ ب) و منجر به ایجاد چرخش سیکلونی و ایجاد شرایط صعود هوا گشته است. استیلای امگای منفی بر شمال کشور و قرارگیری مرکز بیشینه آن در ناحیه مرکز کم‌ارتفاع گفته قبلی را مورد تأیید قرار می‌دهد. در روز ۱۸ مارس (شکل ۸ پ) در زمان اوج بارش‌ها، مرکز کم‌ارتفاع با کنتورهای بسته (کنتور مرکزی ۱۳۶۰ ژئوپتانسیل‌متر) همراه با مرکز بیشینه امگای منفی بر فراز منطقه مورد مطالعه چیره گشته است. بردارهای باد در اطراف کم‌ارتفاع چرخش سیکلونی را نشان می‌دهند.

همچنین یک کم‌ارتفاع بسته دیگری در غرب دریای خزر در ناحیه محور تراف تشکیل یافته است. قابل ذکر است که بیشترین مقدار بارش در روز ۱۸ مارس در زمان استیلای مرکز تراف (کم‌ارتفاع بریده) و چرخندگی مثبت بر فراز استان گلستان به وقوع پیوسته است. در روز ۱۹ مارس (شکل ۶ ج) موج راسبی و تراف حاصل از آن تضعیف شده و کم‌ارتفاع بریده مرکز آن از مرزهای شمال شرقی در حال خارج شدن است. از سوی دیگر کم‌ارتفاع بریده واقع در غرب خزر در بستر موج راسبی حرکت شرقی و جنوب شرقی دارد و در روزهای ۲۰ و ۲۱ مارس (شکل ۶ چ) در منطقه مورد مطالعه فعالیت داشته و در روز ۲۲ مارس (شکل ۶ ح) ضمن تضعیف از منطقه خارج شده است.

شرایط سینوپتیکی تروپوسفر میانی نشان داد در زمان رخداد بارش‌ها ترفای عمیق بر روی منطقه مستقر بوده و سبب ریزش هوای سرد به منطقه مورد مطالعه شده است که این مسئله می‌تواند منجر به تشکیل جبهه‌های هوا در منطقه گردد. از این رو، پتانسیل ایجاد جبهه در منطقه با استفاده از تابع جبهه‌زایی مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۷). تابع جبهه‌زایی براساس افزایش گرادیان افقی دما ناشی از تغییرات سمت و سرعت باد محاسبه می‌شود و مقادیر مثبت آن مکان‌های مستعد ایجاد جبهه را نشان می‌دهند. تابع جبهه‌زایی برای زمان اوج بارش یعنی ۱۸ مارس در ترازهای ۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکالی نشان می‌دهد شرایط جبهه‌زایی در منطقه مورد مطالعه به ویژه در مسیر ورود هوای سرد بر روی جنوب دریای خزر، فراهم است.

وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپوسفر زیرین



شکل ۷- تابع جبهه‌زایی در ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکالی
Figure 7- Frontogenesis Function at 700 to 500 hpa levels

ساعت ۰۰ روز ۱۸ مارس (شکل ۹ پ) همچنان جریانات شمال سو از عرض‌های جنوبی تا شمال شرق ایران جریان دارند و در این منطقه چرخش سیکلونی قوی برقرار است و زبانه مرکز بیشینه رطوبت ویژه منطقه مورد مطالعه را در بر گرفته است که حاکی از ورود رطوبت به این منطقه می‌باشد. در ساعت ۰۶ روز ۱۸ مارس (شکل ۹ ت) محور بیشینه رطوبت به تبعیت از جریان هوا حالت جنوب غربی-شمال شرقی دارد و از منطقه مورد مطالعه فاصله گرفته است و از سواحل غربی اقیانوس هند تا مناطق شمالی پاکستان و افغانستان کشیده شده است. با این وجود جریانات سیکلونی رطوبت مناطق مذکور و سایر مناطق از جمله دریای خزر را به مناطق شمال شرق ایران منتقل کرده و یک مرکز بیشینه رطوبت در آن ایجاد کرده‌اند.

برای شناسایی دقیق‌تر منابع رطوبتی بارش‌های سنگین در حوضه آبریز گرگانرود، متوسط همگرایی شار رطوبت از تراز ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال در زمان‌های مشابه شکل ۹ به همراه بردارهای میدان باد ترسیم گردیدند (شکل ۱۰). مقادیر مثبت شار رطوبت در یک منطقه بیانگر فزونی رطوبت ورودی بر رطوبت خروجی و در نتیجه افزایش رطوبت در آن منطقه است و مقادیر منفی خروج رطوبت را نشان می‌دهند.

در ساعت ۱۲ روز ۱۷ مارس (شکل ۱۰ الف) مرکز بیشینه مثبت همگرایی شار رطوبت در مرکز ایران و مرکز بیشینه منفی بر روی خلیج فارس واقع شده‌اند و بردارهای باد مسیر انتقال رطوبت خلیج فارس به داخل ایران را نشان می‌دهند. چند ساعت بعد در ساعت ۱۸ جریانات با عبور از خلیج فارس و دریای عمان به سمت شمال شرق کشور در جریان هستند و مرکز بیشینه همگرایی شار رطوبت را به شمال شرق کشور منتقل می‌کنند. در ساعات ۰۰ و ۰۶ هجده مارس

تمامی این شرایط حاکی از صعود شدید هوا در ترازهای زیرین جو می‌باشد. در روز ۱۹ مارس (شکل ۸ ت) مرکز کم‌ارتفاع از منطقه مورد مطالعه خارج شده است و زبانه‌ای از آن با کنتور ۱۴۸۰ ژئوپتانسیل متر بر روی منطقه فعال است، همچنین از شدت امگای منفی کاسته شده است.

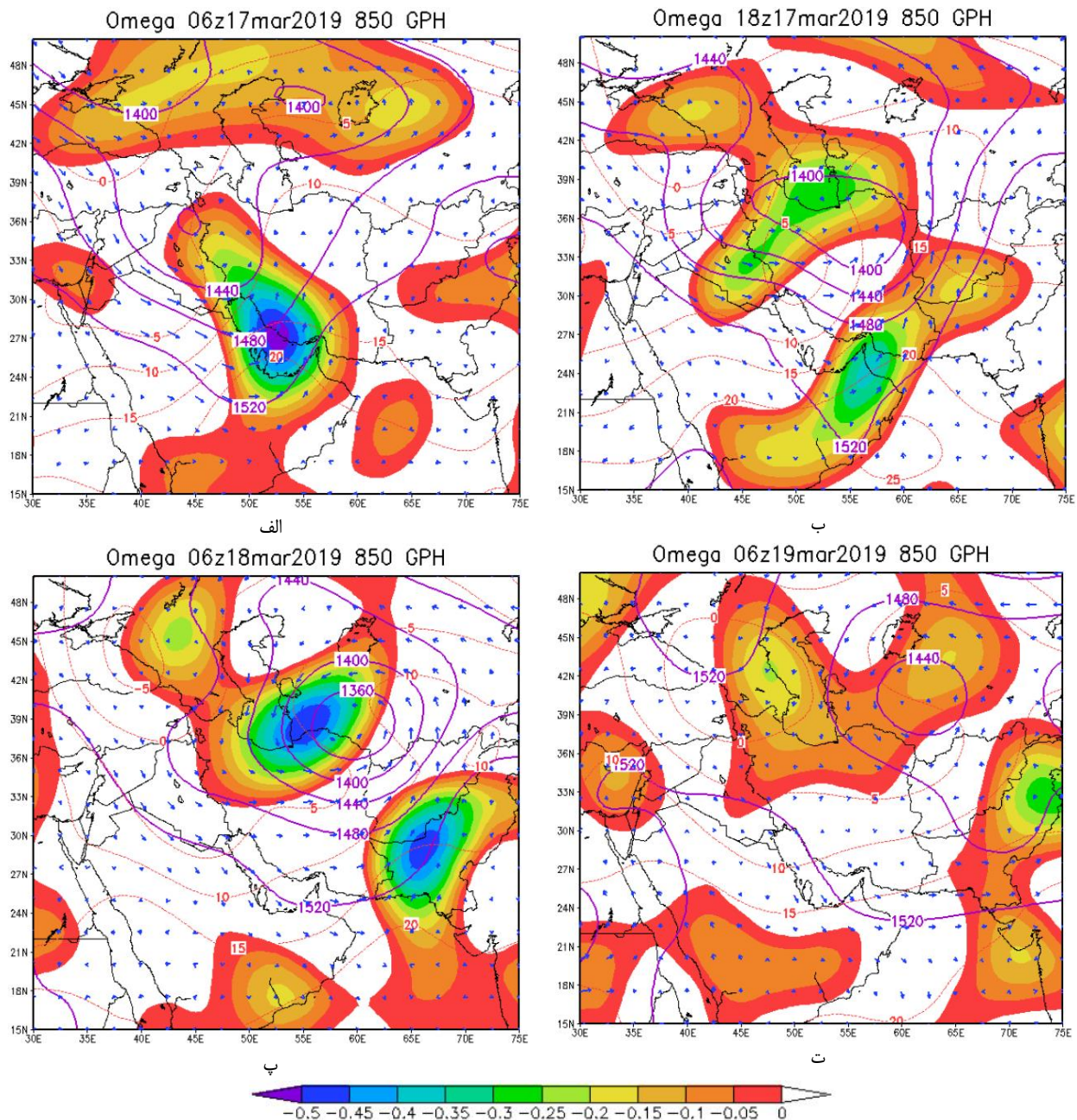
بررسی منابع رطوبت

در بخش قبلی یکی از عوامل اصلی بارش یعنی عامل صعود هوا مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. عامل دیگر در وقوع بارش، رطوبت می‌باشد. برای بررسی شرایط رطوبتی در زمان رخداد بارش سنگین و شناسایی منابع رطوبت و مسیرهای انتقال آن به منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های رطوبت ویژه و همگرایی شار رطوبت استفاده شد. رطوبت ویژه وزن بخار آب موجود در هر کیلوگرم هوای مرطوب است و همگرایی شار رطوبت میزان همرفت افقی و همگرایی رطوبت را بر حسب گرم بر کیلوگرم در ثانیه بیان می‌کند.

در شکل ۹ متوسط رطوبت ویژه به همراه متوسط جریان هوا برای ترازهای ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکالی، قبل از شروع بارش تا زمان رخداد بارش سنگین ترسیم شده‌اند. در روز ۱۷ مارس ساعت ۱۲ (شکل ۹ الف) چند ساعت قبل از شروع بارش یک منطقه بیشینه رطوبت در جنوب ایران بر روی تنگه هرمز تا مناطق مرکزی شکل گرفته و جریانات شمال سو از منطقه مذکور تا منطقه مورد مطالعه برقرار است. ساعاتی بعد در ساعت ۱۸ (شکل ۹ ب) منطقه بیشینه رطوبت تحت تأثیر جریان هوا اندکی به سمت شرق جابجا شده و زبانه آن تا مناطق شمال شرق گسترش یافته است. جریان هوا در مناطق شمالی کشور چرخش سیکلونی و حالت همگرایی پیدا کرده است. در

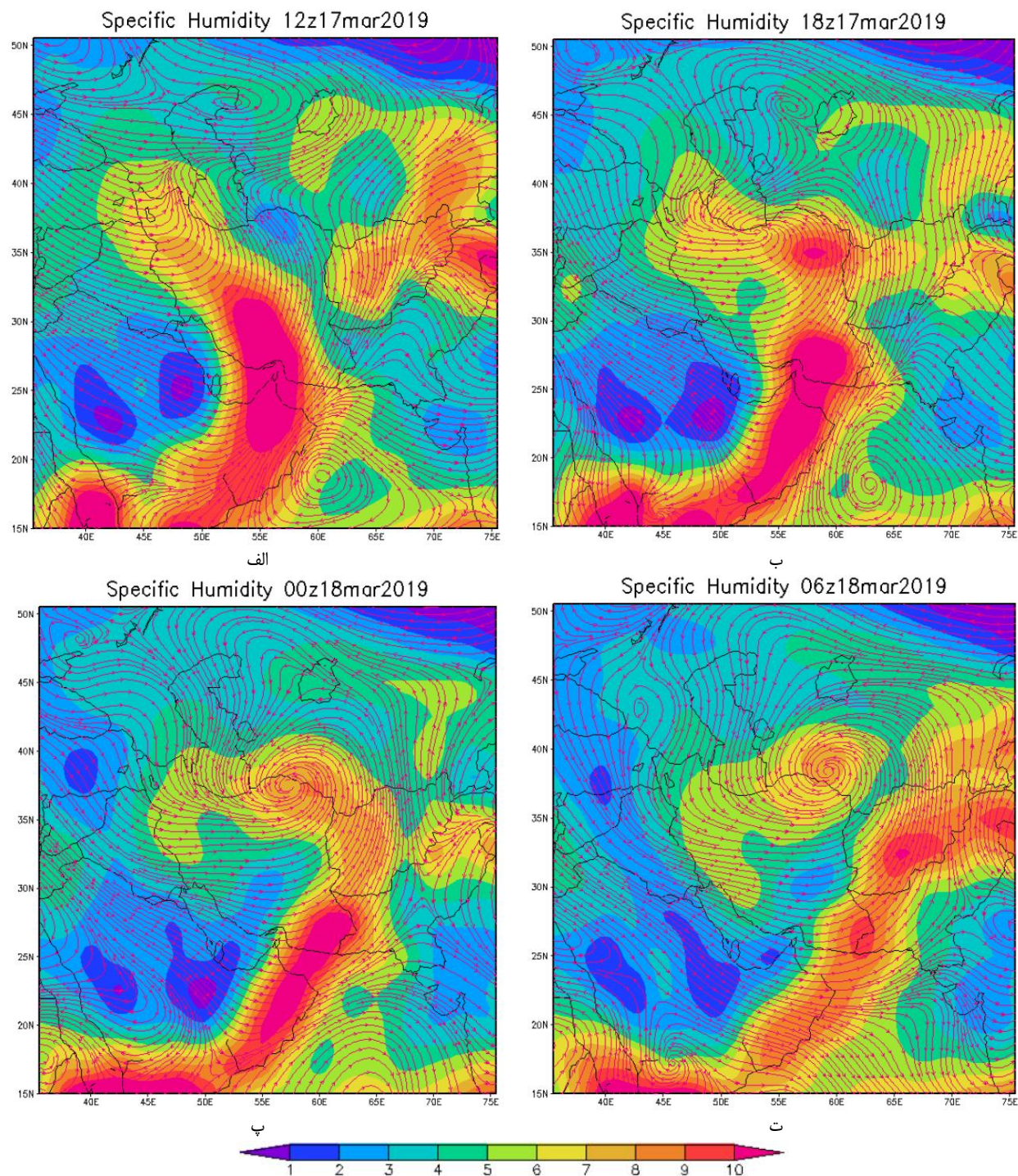
رطوبت را از خلیج فارس، دریای عمان، بخش غربی اقیانوس هند، دریای خزر و مناطق شمالی پاکستان و افغانستان به منطقه مورد مطالعه انتقال می‌دهد. مرکز بیشینه منفی همگرایی رطوبت در ساعات اوج بارش نشان می‌دهد منشأ اصلی رطوبت بارش‌ها دریاهای جنوبی ایران می‌باشند.

(شکل ۱۰ پ و ت) مرکز بیشینه منفی بر روی تنگه هرمز و دریای عمان قرار دارد و به سمت شمال شرق کشیده شده است. از سوی دیگر مرکز بیشینه مثبت به منتهی الیه شمال شرق کشور انتقال یافته و زبانه‌های آن منطقه مورد مطالعه را فرا گرفته‌اند. طی این ساعات حرکت سیکلونی جریان هوا و همگرایی آن در شمال شرق ایران



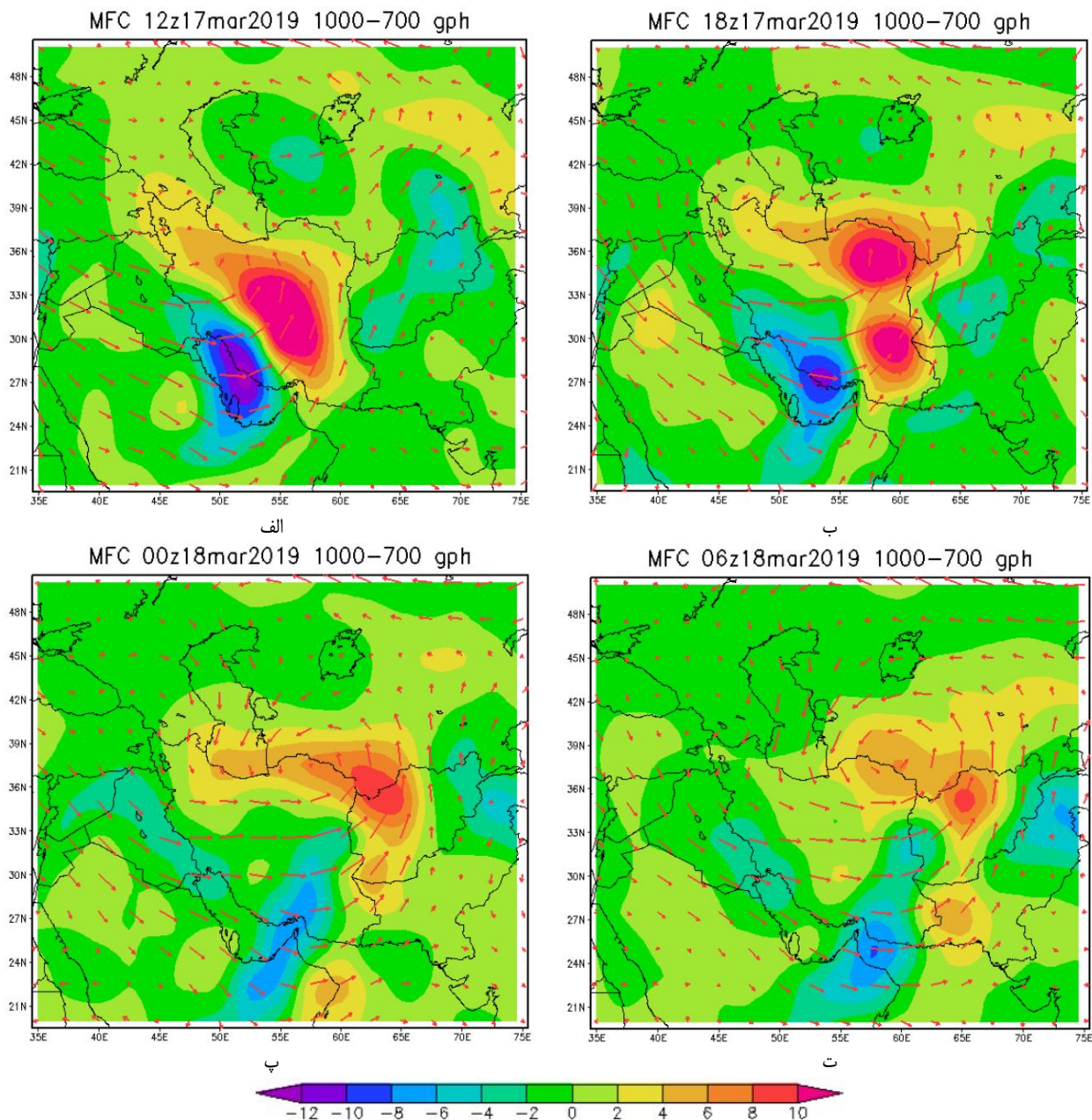
شکل ۸- وضعیت سینوپتیکی-دینامیکی تروپوسفر پایینی: ارتفاع ژئوپتاسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (خطوط بنفش رنگ)، امگا برحسب پاسکال بر ثانیه (طیف رنگی)، خطوط همدم (قرمز) و بردار باد برای روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس ۲۰۱۹

Figure 8- Synoptic-dynamic state of the lower troposphere: 850 hPa level in geopotential meters (purple lines), omega in pas/s (color spectrum), isothermal lines (red) and wind vector for March 17, 18 and 19, 2019



شکل ۹- متوسط رطوبت ویژه (بر حسب گرم بر کیلوگرم) و جریان هوا در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکالی برای روزهای ۱۷ و ۱۸ مارس ۲۰۱۹

Figure 9- Average specific humidity (g/kg) and air flow in the levels of 1000 to 700 hectopascals for March 17 and 18, 2019



شکل ۱۰- همگرایی شار رطوبت بر حسب گرم بر کیلوگرم در ثانیه (طیف رنگی) و بردارهای باد برای روزهای ۱۷ و ۱۸ مارس ۲۰۱۹
Figure 10- Moisture flux convergence in g/kg.s (color spectrum) and wind vectors for March 17 and 18, 2019

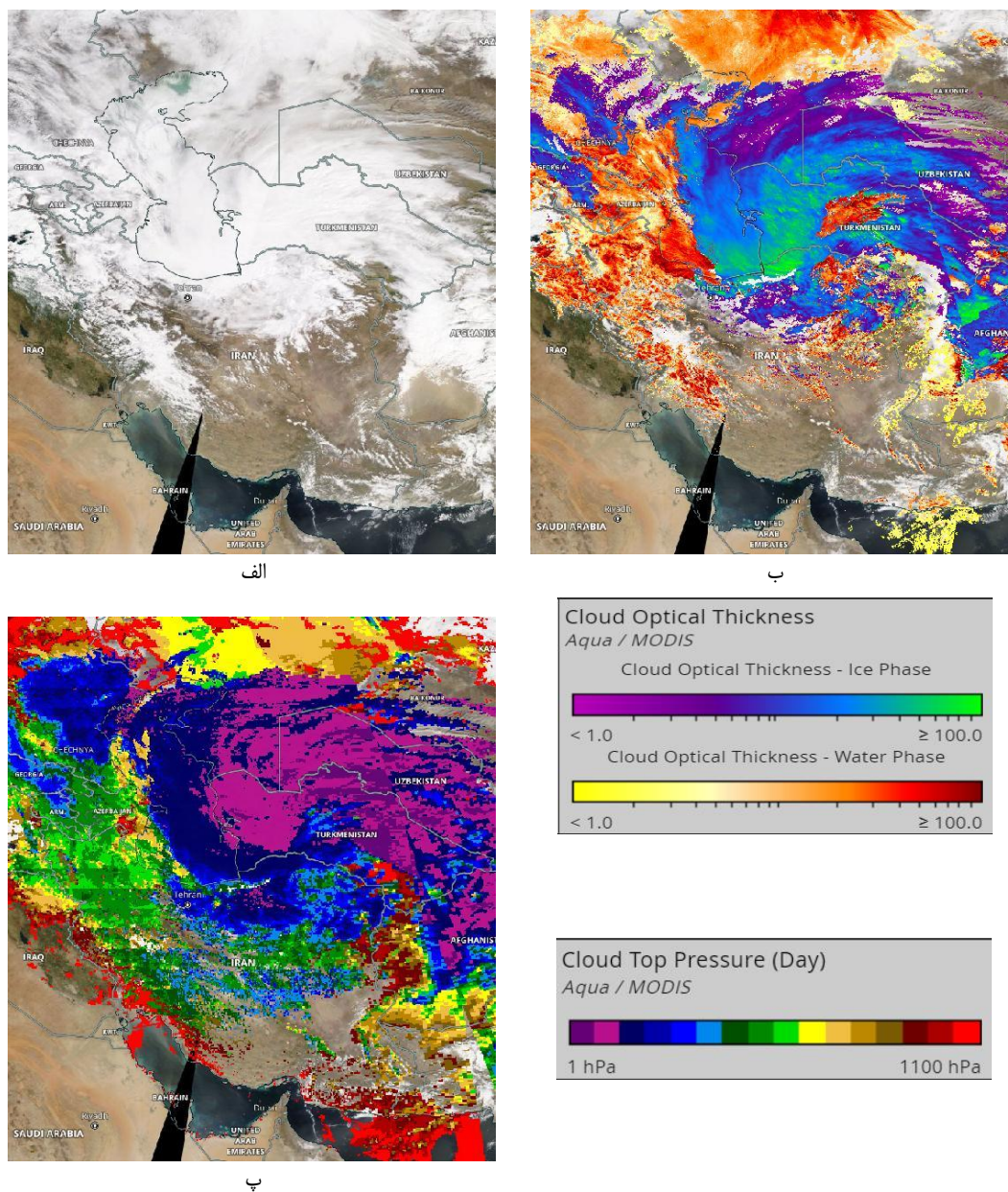
برگرفته‌اند و آرایش ابرها بیانگر حرکت سیکلونی موجود در منطقه می‌باشد. برای تشخیص انواع ابرها از ضخامت نوری ابر^۱ و فشار قله ابر^۲ براساس طبقه‌بندی انواع ابر در پروژه ISCCP^۳ استفاده شد. ضخامت نوری ابر تضعیف نور هنگام عبور از عمق ابر به طول واحد در اثر جذب و پراکنش به وسیله ذرات آب و بخار است و در واقع

بررسی ویژگی‌های ابرها و پروفایل قائم جو در زمان رخداد بارش سنگین

برای بررسی ابرناکی و ویژگی‌های ابرها از محصولات ماهواره MODIS-Aqua استفاده شد. میزان ابرناکی در روز ۱۸ مارس (شکل ۱۱ الف) نشان می‌دهد ابرها کل منطقه فعالیت سیکلون را در

۱۰۰ واحد نیز رسیده است، از سوی دیگر فشار قله ابر مقادیر بسیار پایینی (حدود ۳۰۰ هکتوپاسکال) در این منطقه دارا می باشد. بنابراین طبق طبقه بندی ISCCP، ابرهای موجود در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از نوع همرفتی عمیق (کومولونیمبوس) هستند.

ضخامت ابر و چگالی آب موجود در آن را نشان می دهد. فشار قله ابر میزان فشار بالاترین قسمت ابر را بر حسب هکتوپاسکال بیان می کند. طیف رنگی در شکل (۱۱ب) ضخامت نوری ابر و در شکل (۱۱پ) فشار قله ابر را نشان می دهد. بر این اساس، ضخامت نوری ابر در منطقه مورد مطالعه بسیار بالاست و در برخی مناطق آن به بالای

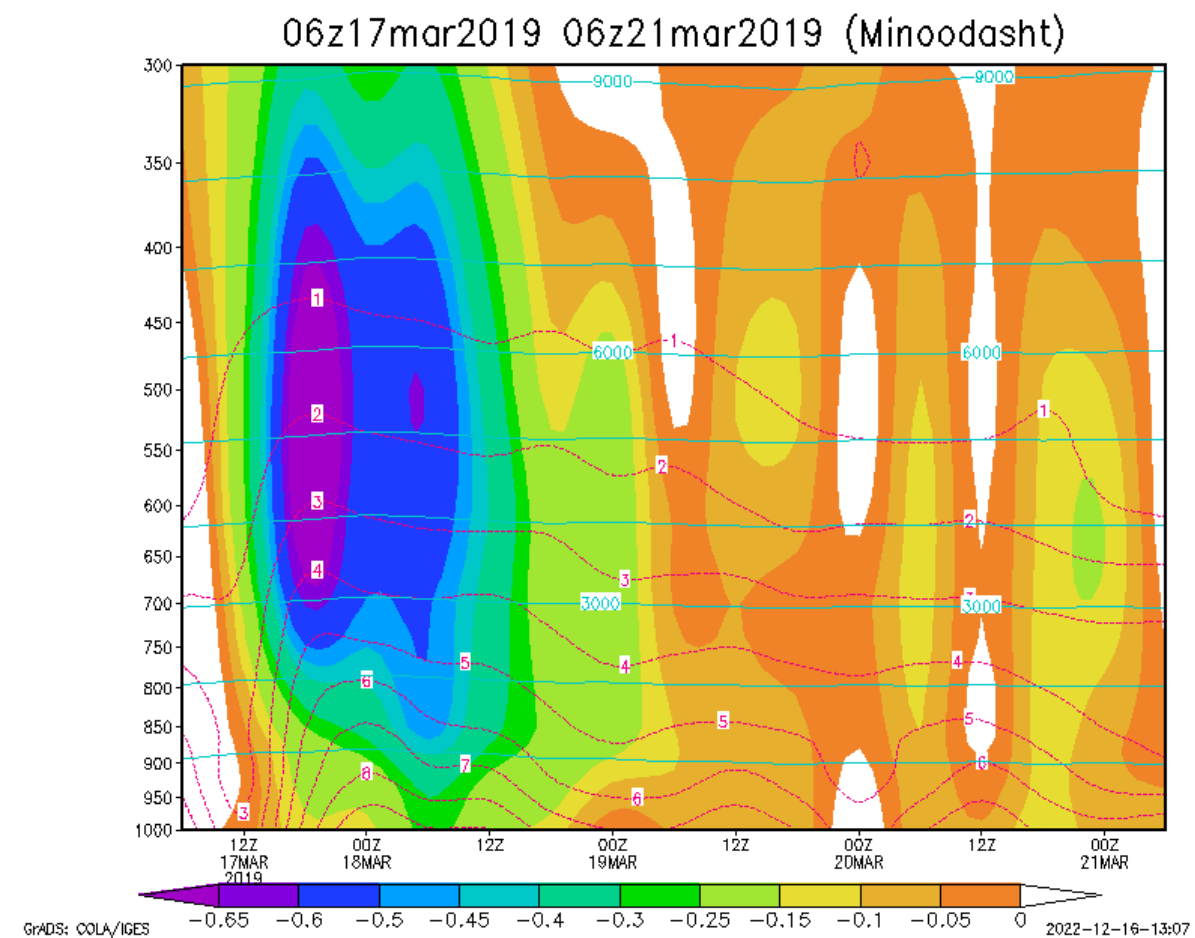


شکل ۱۱- محصولات ماهواره MODIS(Aqua) برای روز ۱۸ مارس ۲۰۱۹، الف: ابرناکی، ب: ضخامت نوری ابر، پ: فشار قله ابر (بر حسب هکتوپاسکال)

Figure 11- MODIS(Aqua) satellite products for March 18, 2019, A: Cloud cover, B: Cloud optical thickness, C: Cloud top pressure (in hectopascals)

برقرار بوده و جریانات صعودی وجود داشته است اما بیشترین شدت صعود هوا در زمانی است که بیشترین بارش‌ها رخ داده‌اند یعنی از ساعت ۱۸ روز هفده مارس تا ساعت ۱۸ روز هجده مارس. نکته قابل توجه در این شکل این است که در حوالی ساعت ۰۶ روز هجده مارس حرکات صعودی شدید از پایین‌ترین سطح شروع شده است که مطابق با زمانی است که بیشترین شدت بارش در آن رخ داده است و این موضوع نتایج نقشه‌ها و تحلیل‌های قبلی را تأیید می‌نماید. منحنی‌های رطوبت نیز نشان می‌دهند با ورود سیستم بارش‌زا به منطقه میزان رطوبت به ویژه در ترازهای پایین جو به شدت افزایش یافته است و با رخداد بارش‌ها به تدریج از میزان رطوبت کاسته می‌شود.

در نهایت، شرایط ناپایداری در سطوح مختلف جو طی روزهای رخداد بارش بررسی شد. بدین منظور، پروفایل قائم جو از ساعت ۰۶ (UTC) ۱۷ مارس تا ساعت ۰۶ (UTC) ۲۱ مارس که به نمودار هوف-مولر معروف است در موقعیت ایستگاه مینودشت (یکی از ایستگاه‌هایی که بارش زیادی در آن به ثبت رسیده بود)، ترسیم شد (شکل ۱۲). مهمترین پارامتر ترسیم شده در این نمودار امگا می‌باشد که شرایط ناپایداری جو یعنی حرکات عمودی هوا را نشان می‌دهد. در این شکل مقادیر منفی امگا که بیانگر صعود هوا می‌باشد بصورت طیف رنگی نمایش داده شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد طی روزهای مورد مطالعه تقریباً در تمامی سطوح جو، شرایط ناپایدار



شکل ۱۲- نمودار هوف-مولر ایستگاه مینودشت از ساعت ۰۶ (UTC) ۱۷ مارس تا ساعت ۰۶ (UTC) ۲۱ مارس ۱۴۰۱، امگا (طیف رنگی)، ترازهای ارتفاع ژئوپتانسیل (خطوط سبز رنگ) و رطوبت ویژه برحسب گرم بر کیلوگرم (خط چین قرمز رنگ)

Figure 12- Hoff-Müller plot of Minodasht station from 06:00 (UTC) 17 March to 06:00 (UTC) 21 March 2019, omega (color spectrum), geopotential height levels (green lines) and specific humidity in grams/kg (red dashed line)

نتیجه گیری

سیل یکی از خسارت‌بارترین بلایای طبیعی است که عمده دلیل آن بارش‌های سنگین می‌باشد. در ماه مارس ۲۰۱۹ (هفدهم تا بیست و یکم) در حوضه آبریز گرگانود وقوع بارش‌های سنگین منجر به ایجاد سیل در این حوضه گردید و به دلیل ماندگاری سیل و آبگرفتگی در شهرها و روستاها، خسارات مالی زیادی بر جای گذاشت. لذا در این تحقیق عوامل ایجادکننده سیل مذکور از جمله شرایط سینوپتیکی-دینامیکی بارش سنگین مورد بحث و بررسی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر در تحلیل عوامل وقوع سیل را می‌توان بطور خلاصه به شرح زیر بیان داشت:

- بررسی توپوگرافی و شیب حوضه گرگانود مشخص کرد شرایط فیزیکی حوضه بگونه‌ای است که پتانسیل وقوع سیل در آن زیاد است.
- مقدار بارش در بازه‌های زمانی ۲۴، ۶ و نیم ساعته در منطقه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که بارش‌های رخ داده طی روزهای ۱۷، ۱۸ و ۱۹ مارس بویژه در هجدهم مارس از نظر شدت جزء بارش‌های بسیار شدید هستند. به عنوان مثال بارش بالای ۸۰ میلی‌متر طی شش ساعت از ایستگاه‌های کلاله و مینودشت گزارش شده است. همچنین تصاویر ماهواره‌ای نشان داد طی نیم ساعت در برخی مناطق بارش بالای ۲۰ میلی‌متر رخ داده است.
- بررسی وضعیت تروپوسفر میانی نشان داد تشکیل موج راسبی و گسترش نصف‌النهار یکی از تراف‌های آن همراه با ایجاد چرخندگی مثبت که در روز هفدهم مارس منطقه مورد مطالعه را تحت سیطره درآورد از عوامل اصلی ایجاد جو باروکلینیک و صعود دینامیکی هوا می‌باشد.
- بررسی شرایط سینوپتیکی-دینامیکی ترازهای زیرین تروپوسفر نشان داد در ترازهای پایین سیستم سینوپتیکی کم‌ارتفاع با کنتورهای بسته همزمان با حاکمیت تراف عمیق بر فراز منطقه، تشکیل و طی زمان‌های اوج بارش تقویت شده است و منجر به صعود شدید هوا گردیده است. به عبارت دیگر، قرارگیری منطقه مورد مطالعه در ناحیه شرقی تراف تراز میانی که شرایط چرخندگی مثبت و واگرایی شدید در آن حاکم است همزمان با تشکیل کم‌ارتفاع‌های بسته در ترازهای زیرین تا سطح زمین حاکی از تشکیل یک سیکلون عمیق بر روی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در زمان رخداد بارش سنگین منجر به ایجاد ناپایداری‌های شدید جوی و صعود دینامیکی هوا گردیده است. مقادیر امگای منفی که مرکز بیشینه آن در محل تشکیل سیکلون قرار دارد، مطالب فوق را تأیید می‌نماید.
- بررسی وضعیت رطوبت جو در منطقه مورد مطالعه و شناسایی

منابع تأمین رطوبت با استفاده از نقشه‌های رطوبت ویژه، تابع همگرایی شار رطوبت و مسیرهای جریان‌ات جوی انجام گرفت. نتایج نشان دادند رطوبت بارش‌های سنگین از دریاهای جنوبی ایران و دریای خزر تأمین شده است. تعقیب مسیرهای انتقال رطوبت قبل از شروع بارش و در زمان رخداد بارش نشان داد رطوبت زیادی از دریاهای جنوبی ایران به ویژه دریای عمان به شمال شرق ایران منتقل شده است و با وجود دریای خزر در مجاورت منطقه به عنوان یک منبع رطوبت، گردش سیکلونی حجم رطوبت بالایی را در منطقه تجمع کرده است.

- بررسی متغیر امگا در پروفایل قائم جو با استفاده از نمودار هوف-مولر نشان داد طی زمان‌های رخداد بارش، حرکات صعودی در کلیه ترازهای تروپوسفر حاکم بوده است به ویژه در زمان اوج بارش حرکات صعودی در ترازهای زیرین شدیدتر شده‌اند.

- شناسایی نوع ابرها با استفاده از محصولات MODIS نشان داد در زمان وقوع بارش‌های سنگین بخصوص در روز ۱۸ مارس ابرهای همرفتی عمیق همراه با چگالی بالایی از آب در منطقه تشکیل شده‌اند که تا ارتفاع زیادی گسترش یافته و ضخامت زیادی دارند.

در کل این نتیجه را می‌توان گرفت که تشکیل سیکلونی قوی در شمال شرق ایران در بستر ترافی عمیق و ورود رطوبت کافی از عوامل اصلی وقوع بارش سنگین بودند که این عوامل توأم با ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه شرایط وقوع سیلاب را فراهم کردند. عوامل شناسایی شده در رخداد بارش سنگین در تحقیق حاضر با برخی عوامل بارش‌های سنگین در مطالعات پیشین مشترک هستند که به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود: عامل چرخندگی مثبت و واگرایی در ترازهای بالا در پژوهش کموشجو و همکاران (۱۹۹۸)، عامل گردش سیکلونی در ترازهای میانی و پایینی در پژوهش فلونی و همکاران (۲۰۱۶)، عامل کم‌فشار بریده در پژوهش بالتاجی و همکاران (۲۰۱۷)، عامل تراف عمیق مستقر بر غرب ایران و چرخندگی مثبت در اکثر مطالعات داخلی از جمله احمدی و جعفری (۲۰۱۵)، رحیمی و حاتمی (۲۰۱۶)، حبیبی و همکاران (۲۰۱۹)، میریان و همکاران (۲۰۲۰)، حسینی صدر و همکاران (۲۰۲۰) و بیرانوند و همکاران (۲۰۲۲)، عامل منبع رطوبت که در تحقیق حاضر همانند تحقیقات احمدی و جعفری (۲۰۱۵) حسینی صدر و همکاران (۲۰۲۰) و بیرانوند و همکاران (۲۰۲۲) از آب‌های عرض‌های جنوبی تأمین شده است.

در پایان با توجه به مستعد بودن حوضه گرگانود از نظر وقوع سیل، جهت پیشگیری از وقوع و آمادگی در زمان وقوع سیل‌های احتمالی آینده اولاً باید با برخی اقدامات نظیر آبخیزداری، آبخوان‌داری، جلوگیری از تخریب پوشش گیاهی، توجه به کاربری مناسب اراضی، آزادسازی مسیرهای سیلاب بویژه از سازه‌های انسان ساخت و سایر

اقدامات احتمال وقوع سیلاب و اثرات مخرب آن را کاهش داد و ثانیاً
 هشدارهای لازم برای احتمال وقوع بارش‌های سیل‌زا صادر شود.
 در صورت پیش‌بینی تشکیل سیکلون در مناطق شمال شرقی ایران باید

منابع

1. Baltaci, H. (2017). Meteorological analysis of flash floods in Artvin (NE Turkey) on August 24, 2015, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 1-23. <https://doi.org/10.5194/nhess-2016-404.2017>.
2. Beiranvand, I., Gabdomkar, A., Abbasi, A., & Khodaghohi, M. (2022). Statistical-Synoptic Analysis of April 2019 Heavy Rainfall in Doroud-Boroujerd Basin. *Journal of Natural Environmental Hazards* 11(32): 169-188. <https://doi.org/10.22111/jneh.2022.38564.1806>.
3. Dayan, U., Nissen, K., & Ulbrich, U. (2015). Atmospheric conditions inducing extreme precipitation over the eastern and western Mediterranean. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2525-2544. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2525-2015>.
4. Feloni, E., Nastos & Matsangouras, I.T. (2016). Seasonal synoptic characteristics of heavy rain events in the Attica Region. *Perspectives on Atmospheric Sciences* 391-396. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-35095-0-55>.
5. Freer, J., Beven, K.J., Neal, J., Schumann, G., Hall, J., & Bates, P. (2011). Flood risk and uncertainty. *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards* 190-233. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047562.008>.
6. Gasemifar, E., Naserpour, S., & Arezomandi, L. (2017). Analysis of synoptic patterns related to extreme precipitation over west of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 4(2): 69-86. (In Persian)
7. Ghavidel Rahimi, Y., & Hatami, D. (2016). Analysis of heavy rainfall led to flood risk on 27 February 2010 in eyvangeharb city (in west of Iran). *Journal of Geography Space* 16(55): 1-16. (In Persian)
8. Halabian, A., Nikandish, N., & Akbari, M. (2019). Synoptic and dynamic analysis of flood generating systems in Mazandaran. *Watershed Engineering and Management* 11(1): 129-146. (In Persian). <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.108884.1246>.
9. Hoseini Sadr, A., Mohammadi, G., Abdoul Alizade, F., & Khjaste Golamei, V. (2020). Analysis of synoptic mechanisms of heavy rainfall of 14th of April 2017 in Northwest Iran. *Geography and Planning* 23(70): 79-100. (In Persian)
10. Karianne, Ø., Müller, M., Palerme, C., & Tveito, O.E. (2023). Recent changes in circulation patterns and their opposing impact on extreme precipitation at the west coast of Norway. *Weather and Climate Extremes* 39: 100530, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100530>.
11. Kheradmand, S., Seidou, O., Konte, D., & Bohari Barmou Batoure, M. (2018). Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 19: 1-16.
12. Komuscu, A.U., Erkan, A., & Çelik, S. (1998). Analysis of meteorological and terrain features leading to the Izmir flash floods. *Natural Hazards* 18: 1-25.
13. Mastrangelo, D., Horvath, K., Riccio, A., & Miglietta, M. (2011). Mechanisms for convection development in a long-lasting heavy precipitation event over south eastern Italy. *Atmospheric Research* 100: 586-602.
14. Mirian, M., Karampoor, M., Moradi, M., & Ghaemi, H. (2020). Identifying dynamic and thermodynamic patterns of winter heavy rainfall in Iran (1960-2010), a case Study: 1974/12/05 Heavy Rainfall. *Physical Geography Research Quarterly* 52(1): 95-111. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.286988.1007428>.
15. Mohamadei, B., & Masodeian, A. (2010). Synoptic analysis of heavy precipitation events in Iran. *Geography and Development* 8(19): 47-70. (In Persian). <https://doi.org/10.22111/gdij.2010.1108>.
16. Omidvar, K., Sepandar, N., & Shafiee, S. (2018). Synoptic and thermodynamic analysis of heavy precipitation in the Province of Kermanshah from October 27 to 30, 2015. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)* 27(107): 237-252. (In Persian). <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.33581>.
17. Rezacova, D., Kaspar, M., Muller, M., Sokol, Z., Kakos, V., Hanslian, D., & Pesice, P. (2005). A comparison of the flood precipitation episode in August 2002 with historic extreme precipitation events on the Czech territory. *Atmospheric Research* 77(1-4): 354-366. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.008>.
18. Zheng, Z., & Wang, D. (2022). Observations of heavy short-term rainfall hotspots associated with warm-sector episodes over coastal South China. *Atmospheric Research* 276: 106273, ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106273>.
19. Zhang, Y., Sun, j., Zhu, L., Tang, H., Jin, S., & Liu, X. (2021). Comparison of two types of persistent heavy rainfall events during sixteen warm seasons in the Sichuan Basin. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 14(6): 100094, ISSN 1674-2834. <https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100094>.

Contents

Evaluation of the Influence of Different ET_O Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model	1
H. Ramezani Etedali, F. Safari	
Determination of the Catchment Area and the Capture Zone of Chelleh Khanehe Olya Spring (Soufiyan)	15
A. Vaezihir, V. Aghaie, M. Tabarmayeh	
Comparison of the Efficiency of Different Plants to Remove Total Petroleum Hydrocarbons from Oilfield Soils	31
N. Yari Nilavareh, A. Beheshti Ale Agha, M. Karami, M. Sadeghi	
The Application of Multi-Criteria Decision-Making Model in Land Suitability Assessment	45
S. Akhavan, A. Jalalian, N. Toomanian, N. Honarjo	
Effects of Spent Mushroom Substrates and Alfalfa Green Manure on Selected Fertility Indicators of Soil Quality and Spinach's Nutrients	63
T. Gheitasi Ranjbar, M. Nael	
Impact of Iron Ore Mining on the Concentration of some Heavy Metals and Soil Pollution Zoning (Case Study: Sangan Iron Ore Mine, Khaf-Iran)	77
R. Khashtabeh, M. Akbari, A. Heidari, A. Najafpour	
The Effect of Wetting and Drying Cycles on Selected Physical Indicators of Biochar- and Rockwool-Based Growth Media	95
S. Shahmansouri, M.R. Mosaddeghi, H. Shariatmadari	
Selectivity and Adsorption of Potassium by Bentonites Saturated with Calcium, Magnesium and Sodium	113
S. Jalilian, F. Ranjbar	
Comparison of Machine Learning Methods in the Selection of Predictors of Atmospheric-Ocean General Circulation Models	129
M. Amirabadizadeh, M. Forozanmehr, M. Yaghoobzadeh, S. Hoseinabadi	
Synoptic-Dynamic Analysis of Heavy Rainfall Leading to Flooding in Golestan Province in March 2019	145
F. Abdolalizadeh, A.M. Khorshiddoust	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 37

No. 1

2023

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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