

عنوان مقالات

- ۴۲۳..... بررسی نقش عوامل طبیعی و انسانی بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در شهر کلات
سارا عطاران - ابوالفضل مساعدی - حمدااله سجاسی قیداری
- ۴۴۱..... معرفی شاخص جدید کیفیت منابع آب سطحی جهت مصارف شرب با استفاده از روش‌های چندمتغیره آماری
(مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود).....
هدی محمدی قلعه‌نی - حمید کاردان مقدم
- ۴۶۱..... مقایسه روش‌های پارامتریک و روش امتیازدهی منطقی ترجیحی (LSP) در ارزیابی قابلیت و تناسب اراضی
برای زراعت‌های آبی در منطقه آبیگ قزوین
فریدون سرمیدیان - سجاد تیموری بردیانی - شهلا رحمانی سیالرز - نیلوفر صیادی
- ۴۷۹..... اثر اصلاح کنندة‌های خاک بر پاسخ‌های فیزیولوژیک درختچه مرتعی کام تیغ (*Lycium depressum* Stocks)
به تنش خشکی
سمانه محمدی - عادل سپهری - محمد فرزام - حسین بارانی
- ۴۹۵..... بررسی کارایی روش‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی شهرستان شوش
محمد عبیات - مرتضی عبیات - مصطفی عبیات
- ۵۱۳..... تأثیر پساب شهری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک و
عملکرد ذرت سینگل کراس ۷۰۴.....
فاطمه علیزادگان - محمدعلی غلامی سفیدکوهی - سعید شیوخی
- ۵۲۷..... ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS
سعیده پورانتظاری - کاظم اسماعیلی - علیرضا فریدحسینی - الهه غفاری

Contents

- Investigating the Role of Natural and Human Factors on Intensification of Floods and Flooding in Kalat City 421
S. Attaran, A. Mosaedi, H. Sojasi
- Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River) 439
M. Mohammadi Ghaleni, H. Kardan Moghaddam
- GIS-Based Land Capability and Suitability Evaluation for Irrigated Agriculture (Case Study: Karaj-Qazvin)..... 459
F. Sarmadian, S. Teymuri Bardiani, Sh. Rahmani Syalarz, N. Sayadi
- Effect of Soil Amendments on Physiological Responses of *Lycium depressum* Stocks to Drought Stress 477
S. Mohammadi, A. Sepehry, M. Farzam, H. Barani
- Evaluation of Efficiency of Classification Methods and Spectral Indices in Cropped Area Estimation of Shush County..... 493
M. Abiyat, M. Abiyat, M. Abiyat
- Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Maize Yield (*Single Cross 704*)..... 511
F. Alizadegan, M.A. Gholami Sefidkouhi, S. Shiukhy
- Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model..... 525
S. Pourantezari, K. Esmaili, A. Faridhosseini, E. Ghafari

آب و خاک

(علوم و صنایع کشاورزی)

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

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

جلد 36 شماره 4 مهر - آبان سال 1401

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

صاحب امتیاز: دانشگاه فردوسی مشهد

مدیر مسئول:

رضا ولی زاده

سر دبیر:

امیر فتوت

اعضای هیئت تحریریه:

استاد - تغذیه نشخوارکنندگان (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه تبریز)

دانشیار - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه تهران)

استادیار - آبیاری (دانشگاه اوکلاهما، آمریکا)

دانشیار - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

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

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - خاکشناسی (دانشگاه گریفیت، استرالیا)

استاد - علوم خاک (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - آبیاری و زهکشی (دانشگاه تهران)

استاد - آبیاری و مهندسی عمران (دانشگاه فردوسی مشهد)

استاد - هواشناسی کشاورزی (دانشگاه فردوسی مشهد)

اوستان، شاهین

بذرافشان، جواد

تقوایان، صالح

خراسانی، رضا

خرمالي، فرهاد

علیزاده، امین

فتوت، امیر

قدیری، حسین

لکزیان، امیر

لیاقت، عبدالمجید

مساعدي، ابوالفضل

موسوی بایگی، محمد

ناشر: دانشگاه فردوسی مشهد

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

پست الکترونیکی: jswa3@um.ac.ir

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

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



مندرجات

- 423 بررسی نقش عوامل طبیعی و انسانی بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در شهر کلات
سارا عطاران - ابوالفضل مساعدی - حمداله سجاسی قیداری
- 441 معرفی شاخص جدید کیفیت منابع آب سطحی جهت مصارف شرب با استفاده از روش‌های چندمتغیره آماری (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)
هدی محمدی قلعه‌نی - حمید کاردان مقدم
- 461 مقایسه روش‌های پارامتریک و روش امتیازدهی منطقی ترجیحی (LSP) در ارزیابی قابلیت و تناسب اراضی برای زراعت‌های آبی در منطقه آبیگ قزوین
فریدون سرمدیان - سجاد تیموری بردیانی - شهلا رحمانی سیالرز - نیلوفر صیادی⁴
- 479 اثر اصلاح کنندة‌های خاک بر پاسخ‌های فیزیولوژیک درختچه مرتعی کام تیغ (*Lycium depressum Stocks*) به تنش خشکی
سمانه محمدی - عادل سپهری - محمد فرزاد - حسین بارانی
- 495 بررسی کارایی روش‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیر کشت محصولات زراعی شهرستان شوش
محمد عبیات - مرتضی عبیات - مصطفی عبیات
- 513 تأثیر پساب شهری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک و عملکرد ذرت سیگل کراس 704
فاطمه علیزادگان - محمدعلی غلامی سفیدکوهی - سعید شیوخی
- 527 ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS
سعیده پورانتظاری - کاظم اسماعیلی - علیرضا فریدحسینی - الهه غفاری



Investigating the Role of Natural and Human Factors on Intensification of Floods and Flooding in Kalat City

S. Attaran¹, A. Mosaedi^{2*}, H. Sojasi³

Received: 06-07-2022

Revised: 30-07-2022

Accepted: 04-09-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Attaran, S., Mosaedi, A., & Sojasi, H. (2022). Investigating the Role of Natural and Human Factors on Intensification of Floods and Flooding in Kalat City. *Journal of Water and Soil* 36(4): 421-438. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/jsw.2022.77163.1173](https://doi.org/10.22067/jsw.2022.77163.1173)

Introduction

The world population has grown rapidly over the last 150 years and continues to do so, resulting in impacts on hydrologic resources at both a local and global scale (Yang et al., 2012). The competition for water between humans and ecosystems leads to complex interactions between hydrologic and social systems (liu et al., 2015). From the beginning of human history, it is located in floodplains. Floods can have large societal impacts, such as severe damage to urban areas, which are expected to grow around the world (Alfieriet al., 2018). In traditional hydrology, humans are either conceptualized as an external force to the system under study or taken into account as boundary conditions (Peel and Blöschl, 2011). Sivapalan et al. (2012) proposed a new model for investigating the interactions of the hydrological system and the social system. It explores the procedure coupled human-water system evolves and possible trajectories of its co-evolution, including the possibility of generating emergent, even unexpected, behaviors. Socio-hydrology must strive to be a quantitative science. There are several methods to control and mitigate flood risk, one of these methods is flood zoning (Jha et al., 2012). In last two decates, The Kalat city is flooded almost every year and many houses and historical sites in the city are damaged. Therefore, the main purpose of thisWe paper is to show investigated how changing human behavior with nature can affect the behavior of the natural system.

Method and Materials

Kalat city located in 59° 43' 23" to 59° 47' 41" northern latitude and 36° 59' 35" to 37° 00' 05" eastern longitude. The city is divided into 11 sub-basins. The city has experienced fast and inappropriate urbanization over the past few years. To collect our data, the annual reports of the Regional Water Organization and the Environment Organization of Khorasan Province were used.

SCS method was used to estimate the runoff peak discharge. Precipitation has been estimated for seven return periods: 2, 5, 10, 25, 50, 100, and 200 years. In this study, to analyze the sensitivity of runoff, we considered precipitation and curves number from 20% less to 20% more than the actual values in the study basin (at intervals of 5 %). We used the Cowan method to determine the roughness coefficient in this study. HEC-RAS model has been used for flood zoning. To determine the impact of various factors on the intensification of floods in Kalat city, we obtained questionnaires from relevant authorities. Likert scale was used to measure the results of the questionnaires. We prepared two questionnaires; first one is related to the inner city zone and includes the factors that intensify the occurrence of floods inside the city of Kalat, and it was classified into the following parts: 1) Local community 2) Managerial 3) Physical; and the second one includes the factors that intensify the flood in the

1- Master's Degre in Water Science and Engineering, Water Resources Management, Water and Environment Research Institute, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2- Professor, Water Science and Engineering Department, Water and Environment Research Institute, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

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

3- Associate Professor of Geography & Rural Planning, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

upper part of Kalat city. We classified these factors into three parts: 1) Non-local community 2) Managerial 3) Environmental .

Results and Discussion

Results of sensitivity analyzes demonstrated that land-use and land cover change had a further effect on peak discharge. In sub-basin 1, by 20% increase in the curve number, the level of peak dumping increased by more than 111%, with a return period of 2 year; while a 20% increase in precipitation, in the same return period, rises the peak discharge only 3%. The peak discharge time in some sub-basins was brief due to the presence of impermeable surfaces, so that in sub-basins 4, 6, 7, and 8, the peak discharge time was less than 30 minutes. These results highlight the dangers of these floods and the need for proper flood planning and management in these sub-basins. The results of the Manning coefficient demonstrated that we can reduce flood damage by applying management measures in the future, as well as paying attention to the feedback between urbanization and the flood zone. Roughness control by applying management programs can reduce the area of flood zones to 0.1 square kilometers. In this case, buildings should be removed from the river, and there should be no structure in the path of the river. According to the questionnaires in the inner city part, the most fundamental factor in intensifying the flood damage was related to “activities of local people” with the average of 3.59. In the upper part of the city, the most influential factors were ascribed to “managerial factors” with the average of 3.79.

Conclusion

In a general conclusion, it can be concluded that the role of human factors in the occurrence and intensification of floods was much greater than rainfall. Therefore, in order to manage and control floods, it is necessary to prevent the change of land use and the reduction of permeability. And management programs should be aimed at increasing surface permeability. We suggest that more research be done on the role of economic and social factors in increasing flood risk in other climate zones.

Keywords: Flood management, Kalat city, Rroughness coefficient, Social hydrology, Urban hydrology

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۳۸-۴۲۱

بررسی نقش عوامل طبیعی و انسانی بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در شهر کلات

سارا عطاران^۱ - ابوالفضل مساعدی^{۲*} - حمداله سجاسی قیداری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

چکیده

علی‌رغم توسعه علم و فن‌آوری، شواهد نشان می‌دهند که آسیب‌پذیری نسبت به سیل در مقایسه با گذشته افزایش یافته‌است. فعالیت‌های انسانی، تاثیر به سزایی در وقوع سیل و خسارات ناشی از آن دارد. به این منظور نیاز است تاثیرات متقابل سیستم انسانی و هیدرولوژیک به دقت بررسی شود. پژوهش حاضر باهدف بررسی تاثیر عوامل طبیعی و انسانی بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در شهر کلات (واقع در استان خراسان رضوی) انجام شده‌است. این شهر هر ساله شاهد سیل‌هایی است که خسارات زیادی به ساختمان‌های مسکونی، اداری و بناهای تاریخی شهر وارد می‌کند. برای این منظور تاثیر تغییر شدت بارش و تغییر کاربری اراضی بر دبی اوج رواناب بررسی شد، به‌طوری که تغییرات دبی اوج نسبت به افزایش و کاهش ۲۰ درصدی شدت بارندگی و همچنین افزایش و یا کاهش عدد منحنی (CN) برآورد شد. همچنین با ارائه چند سناریو، تاثیر تغییر در رویکردهای مدیریتی به منظور کاهش ضریب‌زبری با مدل‌سازی پهنه سیل و با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS مورد آزمون قرار گرفت. از طرفی به منظور تعیین مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی، پرسشنامه‌هایی تهیه و نظرات کارشناسی و فنی متخصصین و کارشناسان اجرایی مورد تحلیل قرار گرفت. پرسشنامه‌های مذکور بر اساس طیف لیکرت پنج امتیازی طراحی شد، به‌گونه‌ای که عدد ۵ نشان‌دهنده بیش‌ترین تاثیر و عدد ۱ بیان‌گر کم‌ترین تاثیر می‌باشد. نتایج نشان داد که تاثیر تغییرات عدد منحنی بر میزان دبی اوج حدود ۳۷ برابر بیشتر از تاثیر تغییرات بارش است. همچنین بررسی سناریوهای مختلف به منظور اصلاح ضریب‌زبری نشان می‌دهد که با انجام برنامه‌های مدیریتی مساحت پهنه سیل در بعضی از زیر حوضه‌ها تا ۱۵ درصد می‌تواند کاهش یابد. تحلیل نتایج پرسشنامه‌ها نشان می‌دهد که مهم‌ترین عوامل درون‌شهری در تشدید وقوع سیل در داخل شهر کلات عوامل "فعالیت‌های مردم محلی" با میانگین امتیاز ۳/۵۹، و در خارج از شهر عوامل "مدیریتی" با میانگین امتیاز ۳/۷۹ هستند.

واژه‌های کلیدی: ضریب‌زبری، کلات، مدیریت سیل، هیدرولوژی اجتماعی، هیدرولوژی شهری

مقدمه

دشت‌های سیل‌گیر مستقر شدند، زیرا در این مناطق شرایط مناسب برای تجارت، کشاورزی و توسعه اقتصادی فراهم بود (Di Baldassarre et al., 2010). دشت‌های سیلاب‌گیر مناطقی هستند که به‌طور دوره‌ای به‌دلیل طغیان رودخانه‌ها به زیر آب می‌روند (Junk et al., 1989). این مناطق از لحاظ فرایندهای هیدرولوژیک به‌وضوح از زمین‌های هم‌جوار خود متمایز هستند (Nardi et al., 2006). همچنین از نظر ارزش اکوسیستم و تولید محصولات کشاورزی و تنوع

جمعیت جهان در طی ۱۵۰ سال گذشته به سرعت افزایش یافته‌است، این رشد جمعیت تأثیراتی بر منابع آب و پاسخ هیدرولوژیک در مقیاس محلی و جهانی داشته‌است (Yang et al., 2012). حوادث طبیعی از ابتدای تاریخ، زندگی بشر را تحت تاثیر قرار داده‌است، اما با افزایش روزافزون جمعیت، قدرت تخریب و خسارات ناشی از وقوع این حوادث افزایش یافته‌است. از زمان ثبت نخستین تمدن‌ها، مردم در

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، پژوهشکده آب و محیط زیست، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

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

۳- دانشیار گروه جغرافیا، رشته جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

باعث می‌شود فعل و انفعالات و مکانیسم‌های بازخورد مرتبط بین فرآیندهای هیدرولوژیک و اجتماعی تا حد زیادی ناشناخته بماند (DiBaldassarre, 2013). در هیدرولوژی اجتماعی تمرکز، بر درک انسان و آب به‌عنوان یک سیستم منحصر به فرد است که با روش‌های حل مسئله قدیمی مدیریت آب متفاوت است (Blair and Buytaert, 2016). سیواپالان و همکاران (Sivapalan et al., 2012) مدل جدیدی برای بررسی تعاملات سیستم هیدرولوژیک و سیستم اجتماعی ارائه کردند. این روند تکامل سیستم انسان و آب و مسیرهای احتمالی تکامل همزمان آن‌ها را بررسی می‌کند (Viglione et al., 2014). روش‌های مختلفی برای کنترل و کاهش خطر سیل وجود دارد که یکی از این روش‌ها پهنه‌بندی سیل است (Jha et al., 2012). محققان متعددی از روش‌های بسیاری برای شبیه‌سازی، ارزیابی و پیش‌بینی اثرات شهرنشینی بر واکنش هیدرولوژیک حوضه‌های آبخیز استفاده کرده‌اند (Valeo, 2021; Munawar et al., 2022). افتخاری و همکاران (Eftekhari et al., 2011)، پژوهشی با موضوع ارزیابی پهنه‌بندی سیل با تغییرات ضریب‌زبری بر روی رودخانه اترک توسط مدل HEC-RAS انجام دادند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش ضریب‌زبری، گستره پهنه سیل افزایش یافته‌است. بایونی (Baioni, 2011)، با مطالعه تاثیر تغییرات الگوهای بارش و فعالیت‌های انسانی بر افزایش تعداد وقایع سیل و رانش زمین در جزیره مادیرا، به این نتیجه رسید که الگوهای بارش در طی قرن بیستم تغییری در میزان بارندگی سالانه را در منطقه مورد نظر نشان نمی‌دهند، ولی فعالیت‌های انسانی و از بین رفتن پوشش سطح زمین به دلیل جنگل‌زدایی و ایجاد معدن، کاهش سطوح نفوذپذیر به دلیل عدم کنترل شهرنشینی و ساخت ساختمان‌ها و جاده‌ها، افزایش تجاوزات در مناطق سیلاب‌دشت از مهم‌ترین عوامل موثر بر تشدید وقوع و خسارات سیل و رانش زمین در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. دلیران فیروز و همکاران (Daliran firooz et al., 2015) در پژوهش خود در رابطه با عوامل خسارات سیل در حوضه‌های آبریز قهرود و قمصر به این نتیجه رسیدند که تغییرات کاربری اراضی و افزایش ساخت و سازهای بی‌رویه در امتداد و حریم رودخانه که باعث تغییر در ضریب رواناب، ضریب‌زبری، نفوذپذیری و همچنین تنگ‌شدگی مقطع رودخانه گردیده‌است می‌تواند عوامل اصلی افزایش دبی پیک سیلاب‌ها، و در نتیجه افزایش سطح و عمق پهنه‌های سیل‌گیر باشند. صابری تسوان و همکاران (Saberi tansavan et al., 2020)، با بررسی تاثیر ضریب‌زبری بر عمق، سرعت و پهنه سیل در حوضه رودخانه اترک به این نتیجه رسیدند که با افزایش ضریب‌زبری، عمق و سطح سیل‌گیر افزایش، و سرعت حرکت سیلاب کاهش می‌یابد. محمدی و همکاران (Mohamadi et al., 2017)، هم با شبیه‌سازی و نحوه گسترش پهنه‌های سیلابی در حوضه رود کارون در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از نرم‌افزار HEC-RAS به این نتیجه رسیدند

زیست‌محیطی بسیار شاخص هستند (Opperman et al., 2009). سیل در ۲۰ سال گذشته سومین بلای خسارت‌ساز در جهان بوده‌است (Chan et al., 2022; CRED, 2015). ایران ششمین کشور حادثه‌خیز جهان است و سیل، خسارت‌بارترین حادثه پس از زلزله و خشکسالی است (Asadi et al., 2015). تعداد حوادث سیل و خسارت‌های ناشی از آن در دهه‌های گذشته به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌است (Du et al., 2013; Di Baldassarre et al., 2012; Aerts et al., 2014; Dankers et al., 2014; Tripathi et al., 2022). سیل‌ها می‌توانند اثرات اجتماعی قابل توجهی، مانند آسیب‌های شدید به مناطق شهری، داشته باشند (Alfieri et al., 2018; Qi et al., 2021; Winsemius et al., 2016). تغییرات آب و هوایی و توسعه اجتماعی-اقتصادی در افزایش تعداد رویدادها و خسارات سیل نقش اساسی دارند (Jha et al., 2012). با افزایش فعالیت‌های انسانی، درک تعاملات و بازخوردها، بین منابع آب و سیستم‌های اجتماعی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌است (Troy et al., 2015; Blair and Buytaert, 2016). برای به حداقل رساندن خطرات و ارائه واکنش اضطراری در زمان وقوع بلایای طبیعی، باید اقدامات مختلفی از سوی مسئولان مدیریت حوادث قبل از وقوع سیل انجام شود (Munawar et al., 2022). خسارات سیل تنها ناشی از مخاطرات طبیعی نمی‌باشد، بلکه به وسیله سیستم اقتصادی، سیاسی و اجتماعی نیز گسترش می‌یابد (Diaconu et al., 2018; Badri et al., 2021). یکی از محورهای اخیر در مدل‌سازی هیدرولوژیک، ارزیابی اثرات کاربری زمین و تغییرات پوشش گیاهی بر منابع آب و سیل است (Yang et al., 2012). گسترش شهرنشینی یکی از عوامل مهم در تغییرات کاربری اراضی و پوشش زمین است که این عوامل بر پاسخ هیدرولوژیک حوضه و مقدار رواناب و سیلاب‌ها در حوضه‌های آبخیز تاثیر بسیار زیادی دارند (Du et al., 2012). گسترش مناطق شهری به‌طور جدی باعث کاهش نفوذپذیری سطحی می‌شوند، در نتیجه این موضوع تاثیرات زیادی بر فرایندهای هیدرولوژیک می‌گذارد (Feng et al., 2006; Dougherty et al., 2021; Ogden et al., 2011).

تعاملات و بازخوردهای پیچیده بین انسان و آب موضوعات بسیار مهمی هستند که در رویکردهای سنتی سیستم هیدرولوژیک به‌خوبی شناخته نشده‌اند. با وجود مطالعات گسترده در مورد نحوه سازگاری انسان‌ها با سیل (White, 1945)، اما در نگاه سنتی به هیدرولوژی، انسان یا به‌عنوان یک نیروی خارجی برای سیستم مورد مطالعه تصور می‌شود، یا به‌عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته می‌شود (Peel and Blöschl, 2011). رویکردهای مدل‌سازی سنتی فرض می‌کنند که هیچ بازخوردی بین سیستم‌های هیدرولوژیک و انسانی وجود ندارد و بنابراین، نمی‌توانند بینشی در مورد چگونگی تأثیر فعالیت‌های انسانی بر سیستم طبیعی ارائه دهند (Thompson et al., 2013). این نگرش

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

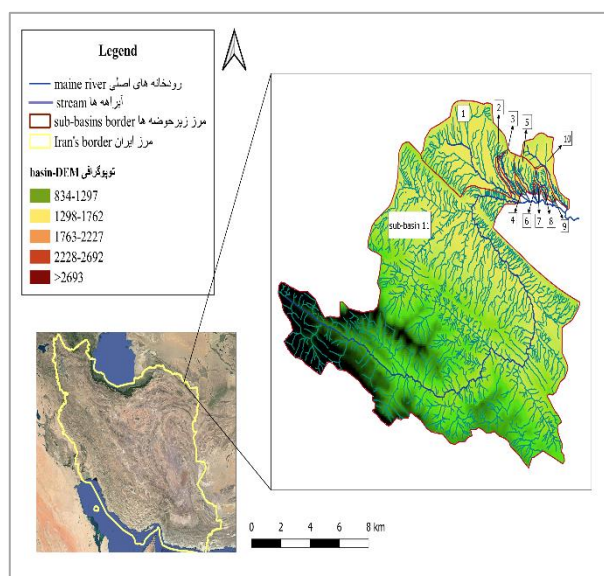
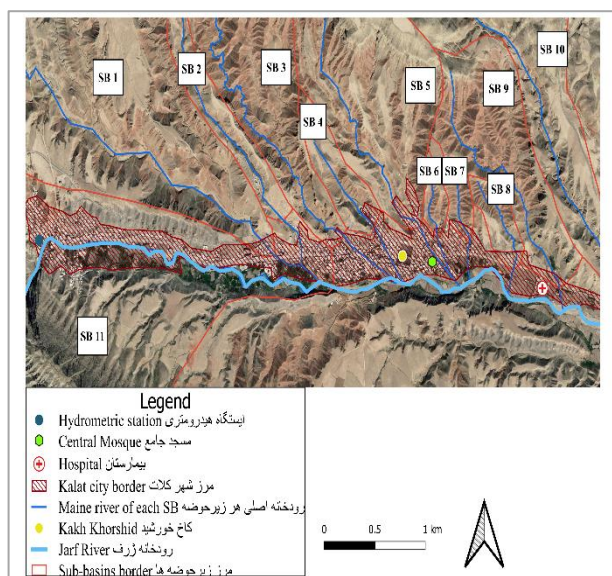
شهرستان کلات نادر در ۵۹ درجه و ۹ دقیقه و ۴۰ ثانیه تا ۶۰ درجه و ۲۷ دقیقه و ۲۵ ثانیه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۴ دقیقه و ۲۰ ثانیه تا ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. این شهرستان در شمال شرقی کشور قرار گرفته است. شهر کلات و ارتفاعات مشرف بر آن را می‌توان به ۱۱ زیر حوضه تقسیم نمود. موقعیت شهر کلات در ایران و همچنین زیرحوضه‌های مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

شهر کلات در یک منطقه نیمه کوهستانی قرار گرفته است. در محدوده شهر کلات یک رودخانه در راستای غرب به شرق جریان دارد که شهر در امتداد آن و به صورت خطی گسترش یافته است. این رودخانه، رود اصلی کلات است که از حوضه‌ای به نام حوضه آبریز ژرف منشأ می‌گیرد. در منطقه مورد مطالعه در این پژوهش یک ایستگاه هیدرومتری در ابتدای شهر کلات به نام ایستگاه دربند کلات نادر وجود دارد. این ایستگاه بر روی رودخانه اصلی کلات (ژرف رود) قرار دارد. انواع کاربری اراضی در این منطقه شامل کاربری شهری، کشاورزی، مرتع و بایر است. در این میان، کاربری شهری، عمده‌ترین نوع کاربری زمین در محدوده شهر می‌باشد.

که افزایش و کاهش CN اثر افزایشی و کاهش بر دبی سیلابی حوضه داشته است.

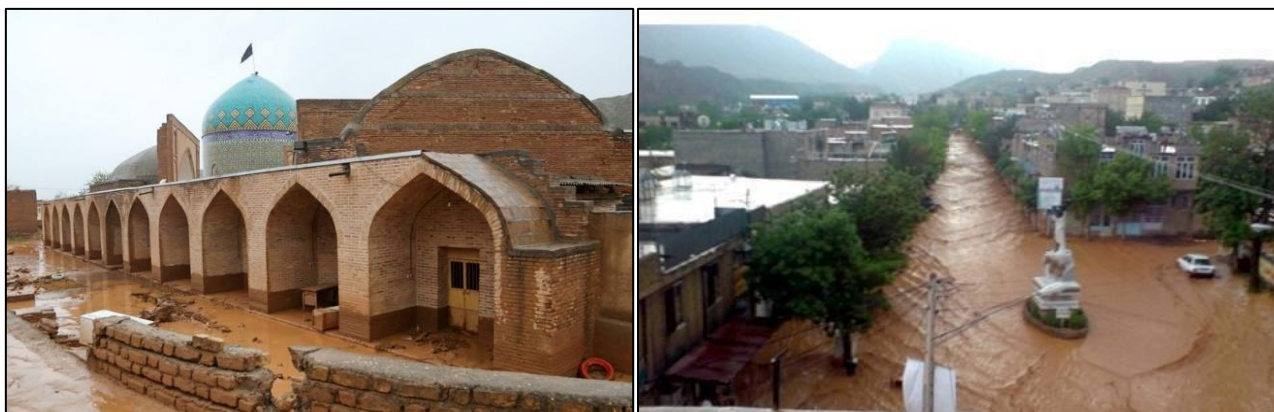
ما و همکاران (Ma et al., 2019) هم با ارزیابی خطر سیل‌های ناگهانی در استان یونان (Yunnan) چین بر اساس عوامل هواشناسی، هیدرولوژیک، زمین‌شناسی و انسان‌شناختی، به این نتیجه رسیدند که مقدار عدد منحنی بیش‌ترین تأثیر را بر افزایش خطر سیل‌های ناگهانی دارد.

با توجه به موارد بیان شده، قرار گرفتن شهرها و روستاها در مناطق کوهپایه‌ای، از میان رفتن پوشش گیاهی، رعایت نکردن حریم رودخانه‌هایی که غالباً از میان و یا کنار شهرها می‌گذرند، ساخت و سازهای بی‌رویه در مسیر رودخانه‌ها، و یا زیرک‌شدن بردن بخشی از اراضی حریم رودخانه‌ها و سایر عوامل مشابه از دلایل اصلی وقوع سیلاب می‌باشند. در دو دهه اخیر شهر کلات تقریباً هر ساله دچار آب‌گرفتگی می‌شود و بسیاری از منازل مسکونی و یا اماکن تجاری، اداری و تاریخی شهر دچار آسیب می‌شوند. با توجه به خسارات روزافزون ناشی از وقوع سیلاب در ایران و نقش عوامل انسانی در آن، می‌بایست با یک رویکرد جدید تعاملات بین سیستم هیدرولوژیک و اجتماعی با دیدگاه مدیریت سیل مورد بررسی قرار گیرد. از این رو، در این پژوهش به بررسی چگونگی تأثیر عوامل طبیعی (بارش) و انسانی بر پاسخ هیدرولوژیک در شهر کلات پرداخته شده است.



شکل ۱- (الف) موقعیت حوضه مورد مطالعه در ایران و سیستم رودخانه‌ها و زیرحوضه‌ها در محدوده مورد مطالعه. (ب) موقعیت شهر کلات، ایستگاه هیدرومتری و مکان‌های مهم شهر و زیرحوضه‌ها

Figure 1- (a) Location of the study basin in Iran and the system of rivers and sub-basins in the study area. (b) Locations of Kalat city, hydrometric station and important places of the city and sub-basins



شکل ۲- تصاویر آبگرفتگی معابر و مسجد جامع شهر کلات

Figure 2- Images of flooding of passages and the Central Mosque of Kalat

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هیدرومتری در بند کلات نادری

Table 1- Specifications of Darband Kalat Naderi hydrometric station

نام ایستگاه Station name	کد ایستگاه Station code	حوضه Basin	X-UTM	Y-UYM	ارتفاع Height	متوسط دبی (m ³ /s) Average Discharge
در بند کلات نادری Darband Kalat	66-010	قره قوم Ghareghom	742634	4098007	960	0.27

لیکرت برای عوامل درون حوضه‌ای و بالادست حوضه طراحی شد؛ که هر بخش شامل سوالاتی در حوزه‌های مدیریتی، فعالیت‌های مردمی و عوامل طبیعی بود. روابط و روش‌های مورد استفاده در ادامه شرح داده شده‌اند.

برآورد دبی اوج

برای برآورد دبی اوج سیلاب از روش SCS استفاده شد (Salami et al., 2017; Jha et al., 2012; Alizadeh, 2007). روش SCS به علت دارا بودن پارامترهای حساس کمتر، از کارایی به مراتب بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار می‌باشد رودکی و عزیزیان (Roodaki and Azizian, 2020) بر اساس این روش، دبی اوج سیلاب از رابطه ۱ برآورد شد.

$$Q_p = \frac{2.08 * A * R}{T_p} \quad (1)$$

در این رابطه Q_p : دبی اوج (متر مکعب در ثانیه)، A : مساحت حوضه آبریز (کیلومتر مربع)، R : ارتفاع رواناب (میلی‌متر)، T_p : زمان رسیدن به دبی اوج (ساعت) هستند. مقدار ارتفاع رواناب (R) با استفاده از رابطه ۲ برآورد شد.

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (2)$$

در این معادله P مقدار ارتفاع بارندگی (میلی‌متر) و S عامل مربوط به نگهداشت آب (میلی‌متر) هستند.

این شهر در دو دهه اخیر به سرعت گسترش یافته‌است. همچنین افزایش سریع جمعیت و تغییر بافت روستایی به شهری منجر به ساخت و سازهای غیر اصولی و تجاوز به حریم رودخانه شده‌است. از طرفی، مشکل آب‌گرفتگی و سیل به یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های ساکنین تبدیل شده‌است. بنابراین، ارزیابی اثرات هیدرولوژیک و هیدرولیکی تغییرات کاربری زمین برای وضعیت کنونی شهر کلات و همچنین سناریوهای آتی ضروری است. شکل ۲ تصاویری از آب‌گرفتگی در شهر کلات را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

این پژوهش به منظور بررسی شرایط سیل‌خیزی و عوامل موثر در وقوع سیل در شهر کلات انجام شده‌است. برای این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های بارش روزانه مقدار دبی اوج رواناب و زمان تمرکز هر زیرحوضه بر اساس روش SCS برآورد شد. از طرفی برای بررسی تأثیر دو پارامتر کلیدی بارش (P) و عدد منحنی (CN) بر میزان دبی اوج سیل در منطقه مورد مطالعه، آنالیز حساسیت در رابطه با تعیین میزان حساسیت تغییر دبی اوج سیل به تغییر مقادیر بارش و عدد منحنی انجام شد. سپس به منظور مدل‌سازی پهنه سیل مقادیر ضریب‌زبری در هر زیرحوضه برآورد شد. پهنه‌بندی سیل در دوره‌های بازگشت مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار HRC-RAS انجام گرفت. همچنین جهت تعیین مهم‌ترین عوامل تشدید وقوع سیل در این حوضه از دیدگاه مسئولین، پرسشنامه‌هایی بر اساس طیف پنج درجه‌ای

مربوط به کاربری اراضی استفاده شد. در این پژوهش از تغییرات شرایط پوشش گیاهی در طول سال صرف نظر شد، همچنین رطوبت پیشین با فرض اینکه خاک قبل از بارش در وضعیت رطوبتی ۳ (خاک مرطوب) باشد در نظر گرفته شد. با توجه به این که در شبیه سازی های مهندسی و بخصوص موارد مرتبط با سیل، عموماً بحرانی ترین شرایط در نظر گرفته می شود، و با توجه به اینکه در شرایطی که رطوبت اولیه خاک بالا باشد (وضعیت رطوبتی ۳)، مقدار رواناب تولید شده بیشترین مقدار است، بنا بر این، وضعیت رطوبتی خاک در وضعیت مرطوب (وضعیت ۳) در نظر گرفته شد. با این وجود به منظور بررسی تغییر احتمالی شرایط رطوبتی و همچنین تغییر عدد منحنی، آنالیز حساسیت مقدار دبی اوج سیل نسبت به CN و بارش انجام شد.

آنالیز حساسیت

در آنالیز حساسیت میزان تاثیر پارامترها، روی نتایج مدل مورد بررسی قرار می گیرد. از جمله پارامترهای هیدرولوژیک تاثیرگذار در مقدار دبی، میزان بارش و عدد منحنی (CN)، است. در این پژوهش برای تحلیل حساسیت دبی رواناب حاصل از بارش، مقادیر بارش و عدد منحنی از ۲۰٪ کمتر تا ۲۰٪ بیشتر از مقادیر برآورد شده برای حوضه مورد مطالعه (با فواصل ۵٪) در نظر گرفته شد.

برآورد ضریب زبری (n)

ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه به درجه مقاومت در مقابل جریان گفته می شود. قضاوت مهندس در تخمین این ضریب نقش مهمی دارد. راه مناسب در تخمین صحیح تر ضریب n، شناخت عوامل موثر در آن است. برای برآورد این ضریب در این پژوهش از رابطه کاون (معادله ۸) استفاده شده است (Cowan, 1956).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m \quad (۸)$$

در این معادله n_0 ضریب زبری جنس بستر، n_1 ضریب میزان بی نظمی سطح، n_2 ضریب تغییر سطح مقطع، n_3 ضریب موانع بر سر راه جریان، n_4 ضریب پوشش گیاهی و m ضریب تاثیر متاندر هستند (Marcus et al., 1992).

به منظور بررسی تأثیر تغییرات احتمالی ضریب زبری بر پهنه سیل، مقادیر این ضریب به گونه ای تغییر داده شد تا تأثیر تغییرات احتمالی شرایط بستر و سیلاب راه مانند: تغییر در مصالح و دانه بندی بستر و جداره ها، افزایش یا کاهش پوشش گیاهی، تغییر در شکل کانال و...، در سه سناریو مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور سه سناریو به شرح زیر در نظر گرفته شد و پهنه سیلاب در منطقه مورد مطالعه تحت این سه سناریو مدل سازی شد.

ضریب زبری در شرایط فعلی منطقه مورد مطالعه. تو سعه نامنا سب شهر و افزایش فعالیت های انسانی به صورت

در دسترس بودن شدت بارندگی در دوره های بازگشت مختلف برای بسیاری از مدل سازی های هیدرولوژی الزامی است. به همین منظور در این پژوهش از روابط شدت-مدت-بارندگی که توسط قهرمان و آبخر (Ghahraman and Abkhezr, 2004) بر اساس معادلات ۳ و ۴ ارائه شده، استفاده شده است.

$$P_{60}^{10} = 1.34 * (P_{24})^{0.649} \quad (۳)$$

$$P_T^t = (0.4524 + 0.247 \ln(T - 0.6)) * (0.3710 + 0.6184 * t^{0.4484}) * P_{60}^{10} \quad (۴)$$

در این معادلات P_{60}^{10} میزان بارش یک ساعته با دوره بازگشت ۱۰ سال، P_{24} میانگین حداکثر بارش ۲۴ ساعته در حوضه، T دوره بازگشت و t تداوم بارش بر حسب دقیقه می باشد.

با توجه به اینکه بیشترین دبی اوج در هر زیرحوضه در حالتی رخ می دهد که زمان تداوم بارندگی با زمان تمرکز همان زیرحوضه برابر باشد، در نتیجه می بایست زمان تمرکز هر زیر حوضه تعیین شود. به منظور برآورد زمان تمرکز زیر حوضه ها از روش (NRCS 2010) استفاده شد. این روش به نام روش زمان تاخیر معروف است و طبق این روش زمان تمرکز حوضه از رابطه ۵ برآورد می شود.

$$t_c = 1.67 * t_{lag} \quad (۵)$$

در این رابطه t_{lag} زمان تاخیر (ساعت) است که از رابطه ۶ برآورد می شود.

$$t_{lag} = \frac{0.304 * L^{0.8} * (S + 1)^{0.7}}{1900 * y^{0.5}} \quad (۶)$$

که در این معادله، L: طول رودخانه اصلی (متر)، S: نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه (میلی متر)، y: متوسط شیب حوضه (درصد) است. مقدار نمایه نگهداشت آب از رابطه ۷ برآورد شد.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (۷)$$

در این رابطه S عامل مربوط به نگهداشت آب (میلی متر) و CN عدد منحنی حوضه آبریز (بی بعد) می باشد.

برآورد عدد منحنی

عدد منحنی یک نمایه مربوط به خصوصیات نفوذ حوضه می باشد که با توجه به گروه هیدرولوژیکی خاک، مقدار رطوبت اولیه و نوع کاربری اراضی تعیین می شود. هودکینگ و همکاران (Hodgkins et al., 2017) در طراحی های هیدرولوژیک برای تعیین عدد منحنی فرض می شود که گروه هیدرولوژیک خاک تغییر ننماید. رطوبت خاک هم به طور معمول برای وضعیت رطوبت متوسط در نظر گرفته می شود (که در ادامه می توان با توجه به وضعیت رطوبت خاک مقدار عدد منحنی را اصلاح نمود). برای تعیین وضعیت کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک منطقه از عکس های هوایی و نقشه های

نامناسب و سازماندهی نشده و افزایش ضریب زبری. تغییر برنامه‌ها، شیوه‌های مدیریتی و سیاست‌ها به گونه‌ای که فعالیت‌های انسانی، ضریب زبری را کاهش دهد. در سناریوی اول، مدل‌سازی پهنه‌سیلاب با مقادیر دبی با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله با روش SCS انجام شد.

مدل‌سازی پهنه‌سیل

در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی پهنه‌سیلاب از نرم‌افزار HEC-RAS استفاده شده است. این نرم‌افزار قابلیت پردازش اطلاعات در سیستم GIS را دارد و می‌تواند پهنه سیلاب را به صورت دو بعدی شبیه‌سازی کند (Du et al., 2012; Harrower, 2010; Chan et al., 2022). در HEC-RAS، داده‌های مورد نیاز از سه بخش اصلی تشکیل می‌شود که شامل اطلاعات توپوگرافی، اطلاعات جریان و سایر اطلاعات هیدرولیکی جریان می‌باشد. این الزامات باید قبل از اجرای شبیه‌سازی تعیین شوند (Romali et al., 2018). برای اطلاعات توپوگرافی از یک مدل رقومی ارتفاعی به نام شبکه نامنظم مثلثی (TIN) استفاده شد. سپس، داده‌های مقادیر دبی جریان در ایستگاه هیدرومتری دربند کلات نادر به مدل معرفی شدند. اطلاعات هیدرولیکی مورد نیاز (از جمله مقادیر ضریب زبری) با بررسی عکس‌های هوایی و مدل ارتفاعی رقومی منطقه و همچنین با توجه به نقشه‌های موجود و مشاهدات میدانی، تعیین شدند. به منظور پهنه‌بندی سیل، ابتدا اطلاعات توپوگرافی در نرم‌افزار GIS و با استفاده از افزونه HEC-GEORAS (نسخه 10.2) وارد شدند. پس از تعیین مقاطع عرضی با استفاده از این افزونه، اطلاعات به نرم‌افزار HEC-RAS منتقل شد و سایر داده‌های جریان و اطلاعات هیدرولیکی (از قبیل ضریب زبری) به مدل اضافه شدند. پس از انجام مدل‌سازی تحت شرایط مورد نظر (در دوره‌های بازگشت مختلف و تحت سناریوهای ذکر شده برای مقادیر مختلف ضریب زبری)، مقادیر استخراج شده از مدل به منظور مقایسه وضعیت پهنه‌سیل (در دوره‌های بازگشت مختلف و تحت سناریوهای ذکر شده)، در محیط GIS مورد بررسی قرار گرفتند.

پرسشنامه

به منظور تعیین تاثیر عوامل گوناگون بر تشدید وقوع سیل در شهر کلات، پرسشنامه‌ها تهیه و از طریق مصاحبه با سخ‌سؤالات مربوطه از متخصصان و دست‌اندرکاران مرتبط با موضوع سیل و آبگرفتگی در شهر کلات، اخذ شد. به منظور تعیین تعداد پاسخگویان به پرسشنامه‌ها از روش "گلوله برفی نمونه‌گیری خطی" استفاده شد. در این روش هر یک از اعضای نمونه، یک فرد جدید را برای ادامه روند نمونه‌گیری معرفی می‌کنند و تعداد پاسخگویان تا اشباع نظری

ادامه داشت. یعنی تا زمانی که به شکل نظری پاسخ‌ها تقریباً مشابه بودند (Ghaljaee et al., 2017). پاسخگویان شامل متخصصین در رشته‌های مربوط به آب، مانند مهندسی آب، عمران آب، منابع طبیعی، کشاورزی، آب و فاضلاب و محیط زیست بودند که عموماً در سازمان‌هایی در شهر کلات فعالیت داشتند. پرسشنامه تدوین شده در قالب طیف پنج درجه‌ای لیکرت (با میزان خیلی کم (۱)، کم (۲)، متوسط (۳)، زیاد (۴) و خیلی زیاد (۵)) تهیه شد. بدین ترتیب پاسخ‌های کیفی به اعداد کمی تبدیل می‌شوند. طیف لیکرت به منظور اندازه‌گیری "نگرش" به روش علمی پذیرفته شده است (Schwartz and Smith, 2014). با توجه به بازدهی‌های میدانی و بررسی گزارشات اولیه و همچنین پیش‌مصاحبه با مردم و مسئولین مربوطه، سؤالات پرسشنامه به دو بخش تقسیم شدند:

الف) عواملی که در داخل شهر کلات باعث تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی می‌شوند.

ب) عواملی است که در بالادست شهر کلات باعث ایجاد سیل و ورود سیل به داخل شهر می‌شوند.

سؤالات پرسشنامه اول در سه بخش دسته‌بندی شدند:

الف-۱) جامعه محلی (تغییرات در سیستم رودخانه توسط مردم محلی در طول سال‌ها) شامل هشت سوال.

الف-۲) مدیریتی (سیاست‌های نادرست، نبود برنامه‌های مدیریتی مناسب و ...) شامل هشت سوال.

الف-۳) فیزیکی (عدم انجام فعالیت‌های توسعه مناسب در حوضه و ...) شامل سه سوال.

همچنین سؤالات پرسشنامه دوم در سه بخش دسته‌بندی شدند:

ب-۱) اجتماع غیر محلی (فعالیت‌های انسانی و تغییرات رودخانه در بالادست شهر) شامل هفت سوال.

ب-۲) مدیریتی (عوامل مرتبط با مدیریت رودخانه، سیاست‌گذاری و ...) شامل دو سوال.

ب-۳) محیطی (تغییر اقلیم، تغییر الگوی بارش، و سایر عوامل طبیعی که از بالادست بر تغییر دبی رودخانه تاثیر می‌گذارند) شامل سه سوال.

برای تحلیل آماری داده‌های پرسشنامه‌ها از نرم‌افزار SPSS استفاده شد (Bala, 2016).

نتایج و بحث

با توجه به کاربری و پوشش اراضی منطقه مورد مطالعه، مقدار عدد منحنی، زمان اوج سیلاب و زمان تمرکز (برابر با زمان اوج) با استفاده از رابطه ۵ و بر اساس رابطه NRCS برای هر زیرحوضه تعیین شد. این مقادیر در جدول ۲ آورده شده است. با توجه به جدول ۲ زمان تمرکز در اکثر زیرحوضه‌ها، بخصوص

نتایج آنالیز حساسیت

به منظور تحلیل حساسیت دبی اوج نسبت به تغییرات بارش و تغییر کاربری اراضی، آنالیز حساسیت روی افزایش و یا کاهش دو پارامتر بارش (P) و عدد منحنی (CN) انجام شد. همچنین به دلیل عدم قطعیت‌های موجود به بررسی شکل تغییرات دبی در مقایسه با تغییر بارش و عدد منحنی پرداخته شد، تا بررسی شود که اگر موارد فوق، به دلیل عدم قطعیت‌ها و برخی عوامل تاثیر گذار که به دلیل ساده سازی از آن‌ها صرف نظر شده است، بیشتر یا کمتر از مقادیر برآورد شده باشند، چه تغییرات احتمالی در نتایج ایجاد می‌شود. از این رو آنالیز حساسیت روی افزایش و یا کاهش دو پارامتر P و CN با فرض افزایش و یا کاهش مقادیر هر یک از این متغیر تا میزان ۲۰٪ مقدار اولیه انجام شد. از آنجا که بزرگترین مقدار ممکن برای شماره منحنی عدد ۱۰۰ می‌باشد و مقدار CN برخی زیرحوضه‌ها در منطقه شهری مقادیر بالاتر از حدود ۸۵ را به خود اختصاص می‌دهند، با ۲۰٪ افزایش در CN، مقدار آن از ۱۰۰ (که ماکسیمم مقدار برای این پارامتر است) بیشتر خواهد شد. برای رفع این مشکل در تمام زیرحوضه‌هایی که این شرایط را دارند، حداکثر مقدار CN برابر ۱۰۰ در نظر گرفته شده است.

در زیرحوضه‌های ۴، ۶، ۷ و ۸ بسیار کوتاه و کمتر از نیم ساعت است. کوتاه بودن زمان تمرکز این زیرحوضه‌ها می‌تواند خطر ناک بودن رواناب‌های ناشی از این زیرحوضه‌ها و در اختیار نداشتن زمان کافی برای انجام اقدامات آنی را نشان دهد. پس از پردازش اطلاعات اولیه مقدار دبی اوج برای هر زیرحوضه از رابطه ۱ برآورد شد که این مقادیر در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

طبق مشاهدات به عمل آمده از شهر کلات، بیشترین آسیب‌های سیلاب ناشی از سیلاب‌های زیرحوضه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ می‌باشد که بیشترین خسارات را به منازل مسکونی، مغازه‌ها و بناهای تاریخی شهر مانند کاخ خورشید و مسجد جامع شهر وارد می‌کند. هیدروگراف سیل زیرحوضه‌های ذکر شده در دوره‌های بازگشت مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. براساس روش هیدروگراف واحد مصنوعی هیدروگراف SCS و با توجه به مشخص بودن مقادیر Q_p/Q_p در مقابل مقادیر t/t_p و با در دسترس بودن مقادیر Q_p برای دوره‌های بازگشت مورد نظر، هیدروگراف‌های مشخص شده در شکل ۳ در زمان‌های مشخص برای هر یک از زیرحوضه‌ها بدست می‌آیند. در شکل ۳ زمان دبی اوج سیلاب و مقدار دبی اوج برای زیرحوضه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲- زمان تمرکز و شماره منحنی هر زیرحوضه

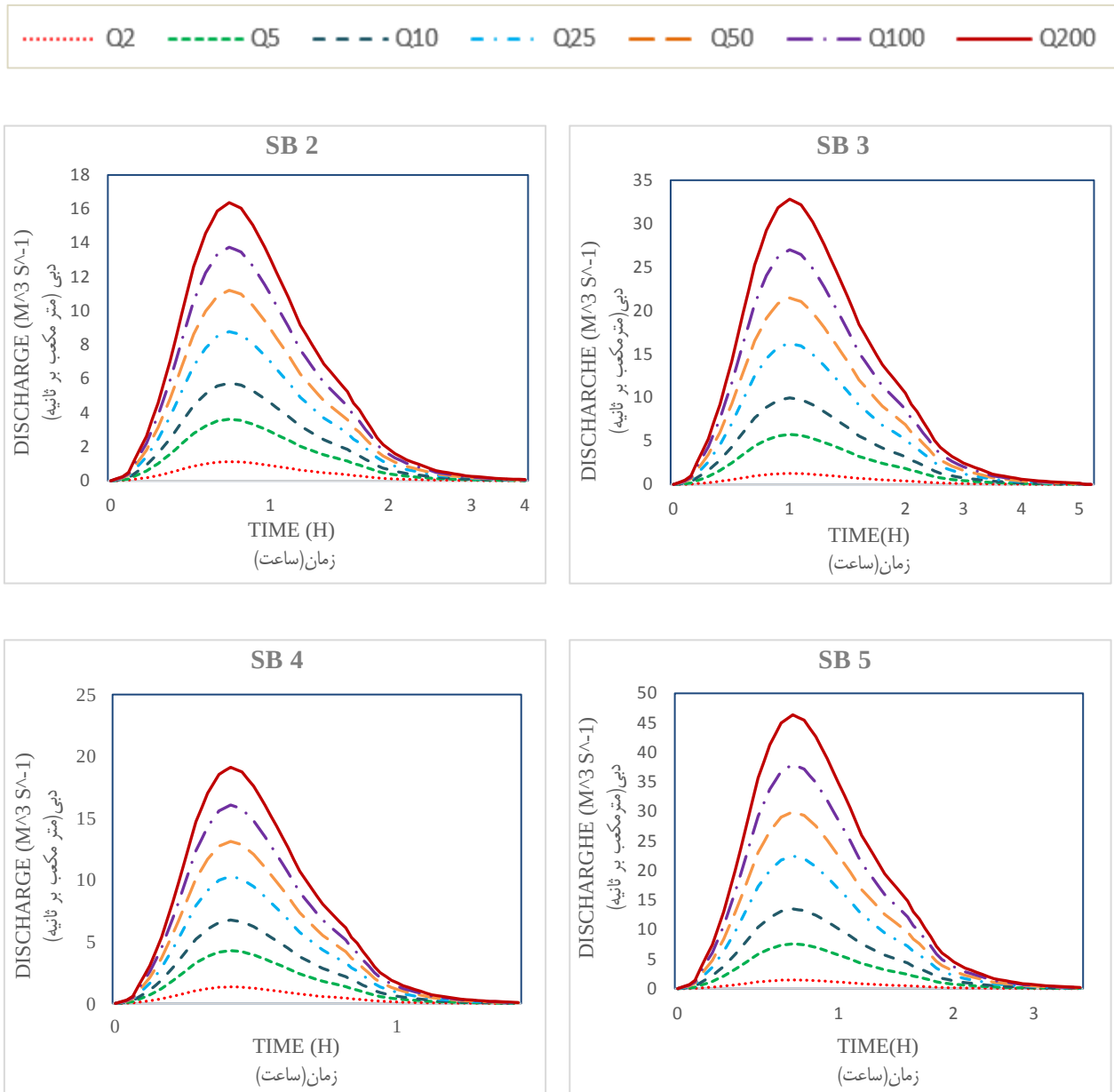
Table 2- Concentration time and Curve Number of each sub-basin

شماره زیر حوضه Sub-basin no.	SB 1	SB 2	SB 3	SB 4	SB 5	SB 6	SB 7	SB 8	SB 9	SB 10	SB 11
شماره منحنی CN	84	94	92	95	92	95	95	95	91	89	76
زمان تمرکز (ساعت) $t_c(h)$	2.3	0.7	0.9	0.3	0.7	0.2	0.2	0.3	0.6	1.1	8.5

جدول ۳- مقادیر دبی اوج سیلاب (m^3/s) در دوره‌های بازگشت مختلف برای هر زیرحوضه

Table 3- Flood peak discharge values (m^3/s) for different return periods in each sub-basin

شماره زیرحوضه Sub-basins no.	دوره بازگشت (سال) Return Period (year)						
	2	5	10	25	50	100	200
SB 1	1.72	8.93	22.42	46.13	67.68	91.88	118.40
SB 2	1.13	3.63	5.75	8.78	11.21	13.75	16.37
SB 3	1.26	5.75	9.96	16.25	21.46	27.00	32.82
SB 4	1.34	4.27	6.75	10.28	13.11	16.06	19.11
SB 5	1.48	7.59	13.50	22.45	29.94	37.93	46.37
SB 6	0.53	1.80	2.90	4.48	5.75	7.08	8.47
SB 7	0.80	2.70	4.33	6.67	8.56	10.53	12.57
SB 8	1.10	3.33	5.20	7.84	9.95	12.13	14.39
SB 9	1.45	6.58	11.39	18.57	24.52	30.84	37.48
SB 10	1.30	9.46	17.99	31.33	42.69	54.98	68.07
SB 11	7.15	21.33	51.65	119.54	183.80	257.56	339.72



شکل ۳- هیدروگراف سیل زیر حوضه‌های ۲، ۳، ۴ و ۵ در دوره‌های بازگشت مورد نظر
Figure 3- Flood hydrograph of sub-basins 2, 3, 4 and 5 in the desired return period

مدل‌سازی پهنه‌سیل

از آنجایی که شرایط زیرحوضه‌های ۱ تا ۱۰ از نظر وضعیت زمین‌شناسی و سازندهای تشکیل‌دهنده آن، مصالح و جنس بستر، توپوگرافی و کاربری اراضی و همچنین تغییرات مقطعی، وجود موانع و پوشش گیاهی تقریباً مشابه می‌باشند، برای این زیرحوضه‌ها مقادیر یکسانی برای ضریب‌زبری آبراهه‌های آنها در نظر گرفته شد. در زیرحوضه ۱۱ به دلیل متفاوت بودن شرایط کانال اصلی و سیلاب‌دشت، مقدار ضریب‌زبری متفاوت با آبراهه‌های حوضه‌های ۱ تا ۱۰ می‌باشد.

شکل‌های ۴ و ۵ میزان تغییرات مقادیر دبی در دوره‌های بازگشت مختلف را نسبت به تغییر CN و بارش در زیرحوضه‌های ۱ و ۴ نشان می‌دهند.

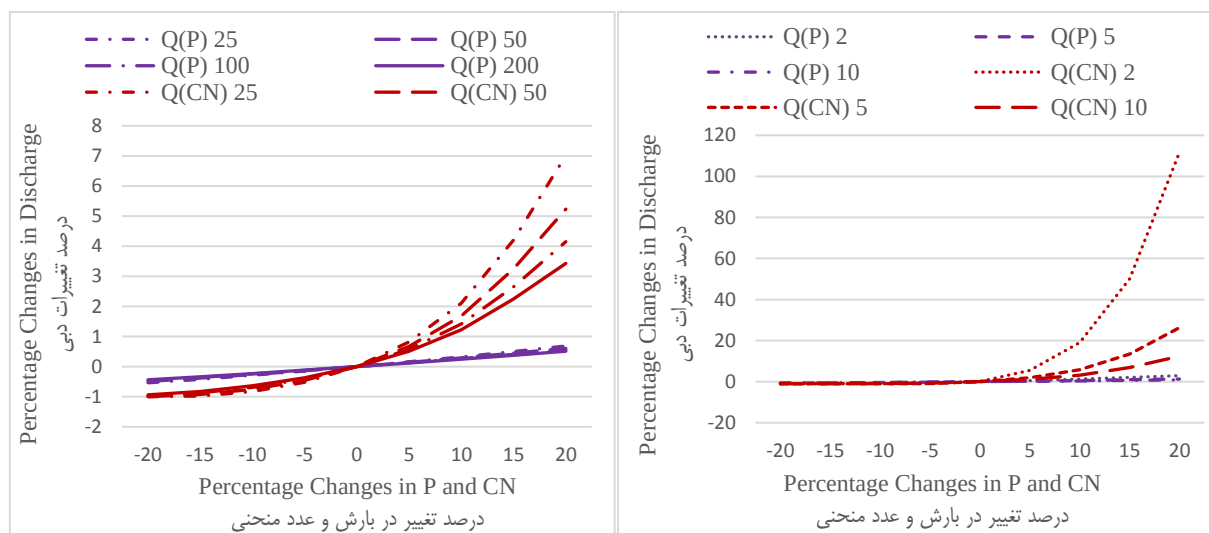
نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که تغییر کاربری اراضی و پوشش زمین تأثیر بیشتری بر دبی اوج دارد. به‌طوری که در زیرحوضه ۱، با ۲۰ درصد افزایش در عدد منحنی، دبی اوج با دوره بازگشت ۲ سال بیش از ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش ۲۰ درصدی بارندگی، در همان دوره بازگشت، دبی اوج را تنها ۳ درصد افزایش می‌دهد.

شکل‌های ۶ و ۷ تراز آب را در زیرحوضه‌های ۱ و ۸ تحت سناریوهای مورد بحث، با مقدار دبی با دوره‌های بازگشت ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال نشان می‌دهند.

شکل ۸ پهنه سیل در سه سناریوی مذکور (در شرایط فعلی منطقه، افزایش ضریب‌زبری، کاهش ضریب‌زبری) را در محدوده تعدادی از زیرحوضه‌ها و همچنین رودخانه اصلی (حوضه شماره ۱۱) نشان می‌دهد.

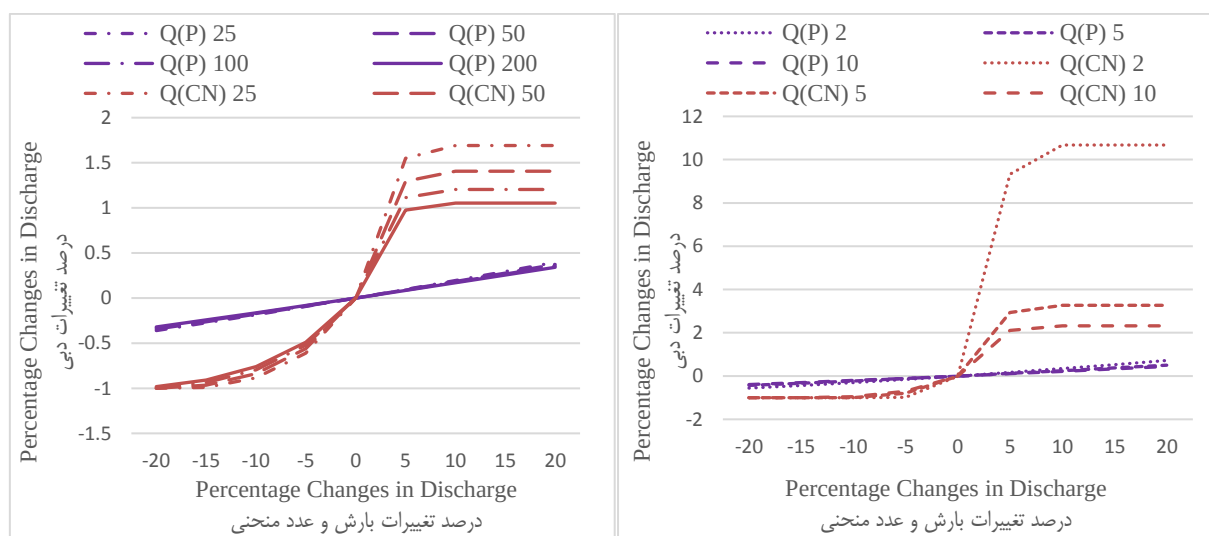
مقادیر ضریب‌زبری آبراهه‌ها، رودخانه اصلی (رودخانه ژرف) و سیلاب‌دشت رودخانه با استفاده از معادله ۸ و بر اساس سه سناریوی یاد شده (شرایط فعلی منطقه، افزایش ضریب‌زبری، کاهش ضریب‌زبری) در جدول ۴ نشان داده شده‌است. مدل‌سازی سیلاب تحت این ۳ سناریو انجام شد.

برای شبیه‌سازی سیلاب در منطقه مورد نظر حدود ۵۰ مقطع عرضی بر روی رودخانه اصلی و سایر رودخانه‌ها در نظر گرفته شد.



شکل ۴- درصد تغییرات مقادیردبی در دوره‌های بازگشت مختلف ۲ تا ۱۰۰ سال نسبت به تغییرات CN و بارش (۲۰٪ کم‌تر تا ۲۰٪ بیش‌تر از مقادیر واقعی) در زیرحوضه ۱

Figure 4- Percentage changes in discharge values in different return periods (2-100 years) relative to changes (20% less to 20% more than actual values) CN and precipitation in sub-basin 1



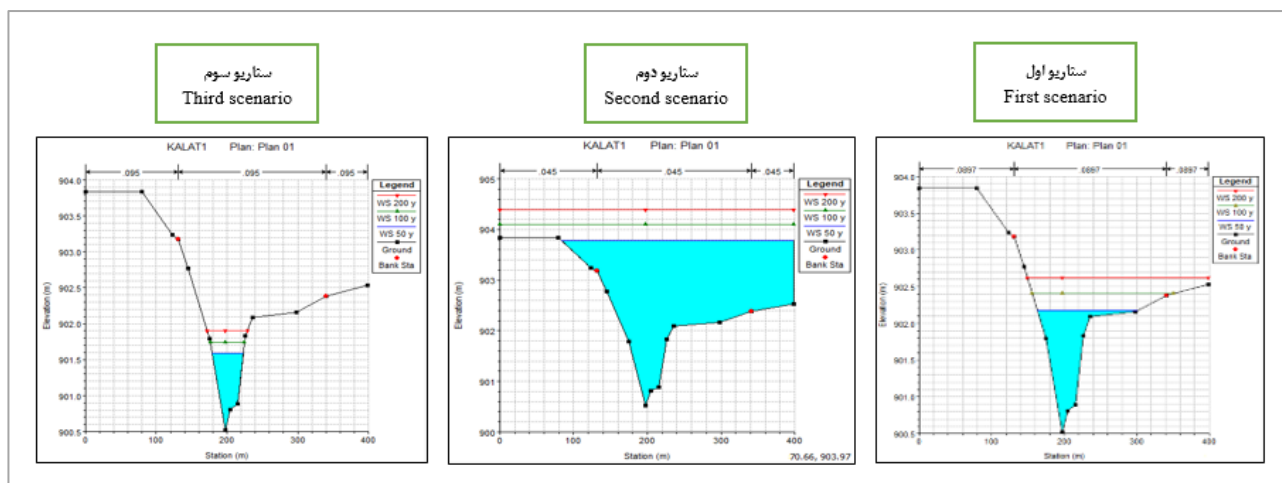
شکل ۵- درصد تغییرات مقادیردبی در دوره‌های بازگشت مختلف ۲ تا ۱۰۰ سال نسبت به تغییرات CN و بارش (۲۰٪ کم‌تر تا ۲۰٪ بیش‌تر از مقادیر واقعی) در زیرحوضه ۴

Figure 5. Percentage of changes in discharge values during different return periods (2-100 years) compared to changes CN and precipitation (20% less to 20% more than actual values) in sub-basin 4

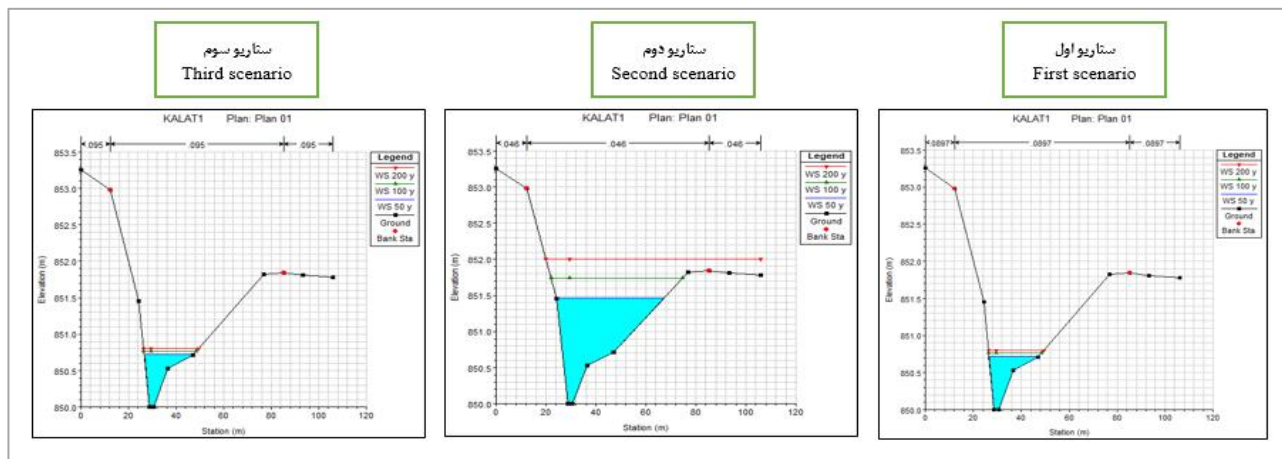
جدول ۴- مقادیر ضریب زبری رودخانه و آبراهه‌ها در سناریوهای مختلف

Table 4- Roughness coefficient values for main river and streams in different scenarios

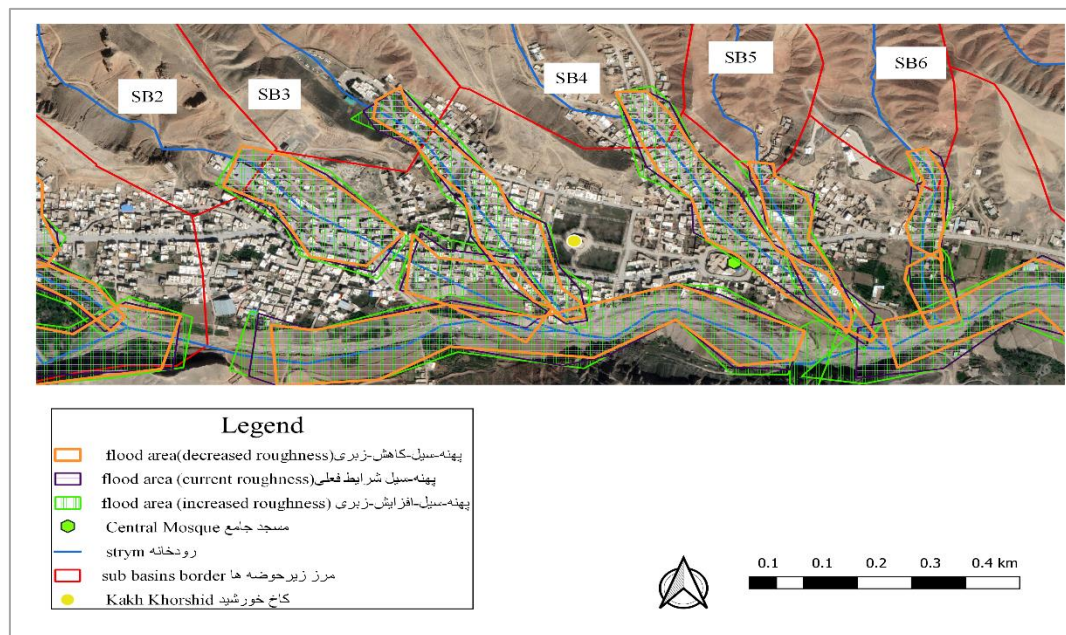
موقعیت جریان Flow position	شماره سناریو Scenarios No.		
	First اول	Second دوم	Third سوم
مجرای کانال رودخانه ژرف (زیرحوضه ۱۱) Main channel of the sub-basin 11	0.077	0.096	0.049
سیلاب‌دشت زیرحوضه ۱۱ Flood plain of the sub-basin 11	0.100	0.149	0.060
سیلاب‌دشت و کانال اصلی زیرحوضه‌های ۱ تا ۱۰ Flood plain and Main channels of sub-basins 1 to 10	0.075	0.095	0.046



شکل ۶- تراز سطح آب تحت ۳ سناریو یادشده در زیرحوضه ۱
Figure 6- Water level under the 3 scenarios in sub basin 1



شکل ۷- تراز سطح آب تحت ۳ سناریو یادشده در زیرحوضه ۸
Figure 7- Water level under the 3 scenarios in sub basin 8



شکل ۸- پهنه‌بندی سیل بر اساس سه سناریو (شرایط فعلی منطقه، افزایش ضریب‌زبری، کاهش ضریب‌زبری) در محدوده تعدادی از زیرحوضه‌ها و رودخانه اصلی

Figure 8- Flood zoning base on three scenarios (roughness reduction, current conditions and surface roughness increase) in some basins and main river

HEC-RAS با استفاده از افزونه HEC-GeoRAS به نرم‌افزار GIS انتقال داده‌شد، و پهنه سیل در هر کدام از سناریوهای ذکر شده مشخص شد. شکل ۸ پهنه سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ سال در سه سناریو ذکر شده را در فاصله زیرحوضه ۲ تا ۶ (متراکم‌ترین ناحیه شهر) نشان می‌دهد. همچنین مساحت پهنه سیل برای تمامی زیرحوضه‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌است.

با توجه به بازدیدهای میدانی و استفاده از تصاویر هوایی، می‌توان دریافت که جمعیت شهر کلات در زیرحوضه‌های ۲ تا ۶ متراکم شده‌است. همچنین بر اساس گزارشات موجود، هر ساله محدوده‌های کاخ خورشید و مسجد جامع شهر و همچنین منازل مسکونی واقع در زیرحوضه‌های ۲ تا ۶ شاهد بیشترین آسیب‌ها و آب‌گرفتگی شدید هستند (گزارش فنی آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۱۳۹۴). بنابر این پس از تکمیل فرایند مدل‌سازی، برای تهیه نقشه پهنه سیلاب، مدل

جدول ۵- مساحت پهنه سیل (m^2) در سناریوهای مختلف با دوره بازگشت ۲۰۰ سال و در زیر حوضه‌های مورد بررسی

Table 5- Area of flood zone (m^2) for different scenarios in sub basins

شماره زیرحوضه	ضریب‌زبری کنونی، سناریو ۱	افزایش ضریب‌زبری، سناریو ۲	کاهش ضریب‌زبری، سناریو ۳
Sub-basin number	Current roughness coefficient, Sen. 1	Increased roughness coefficient, Sen. 2	Decreased roughness coefficient, Sen. 3
SB 1	38877	51818	34617
SB 2	22162	29781	21073
SB 3	77702	90249	71368
SB 4	46340	60133	42359
SB 5	51656	65697	49845
SB 6	22080	27722	21378
SB 7	22914	26726	21000
SB 8	25932	28190	24731
SB 9	21352	25306	20149
SB 10	91268	104825	78651
SB 11	993738	1165734	880193

توسعه شهری بر خطر وقوع سیل، در این مرحله از پژوهش تاثیر عوامل مختلف بر تشدید وقوع سیل در منطقه مورد مطالعه از طریق طرح پرسشنامه‌ای از متخصصین و مسئولین ارگان‌های مختلف بررسی شد. مجموع پاسخگویان به این پرسشنامه‌ها با توجه به روش پژوهش ۱۷ نفر بودند.

تحلیل ویژگی‌های فردی پاسخ‌دهندگان

سطح تحصیلات پاسخ‌گویان در سه رده لیسانس، فوق لیسانس و دکتری طبقه‌بندی شد. بیش‌ترین درصد فراوانی در رده تحصیلات لیسانس برابر ۵۳٪ می‌باشند. در رده تحصیلات فوق لیسانس فراوانی برابر ۴۱٪ و در رده دکتری فراوانی پاسخگویان ۶٪ می‌باشد. توزیع پاسخ‌گویان در ۵ رشته تحصیلی قابل بررسی است. تخصص پاسخ‌گویان در ۵ رشته سازه‌های آبی، مدیریت منابع طبیعی، مدیریت منابع آب، عمران و مهندسی آبخیزداری می‌باشد. بیش‌ترین درصد فراوانی در رشته عمران و ۲۹/۴٪ می‌باشد، بعد از آن مدیریت منابع آب در ردیف دوم با ۲۳/۵ درصد، پس از آن سازه‌های آبی و مدیریت منابع طبیعی هریک با ۱۷/۶٪ در رده سوم و در آخر مهندسی آبخیزداری با ۱۱/۸٪ قرار دارد.

تحلیل ویژگی‌های توصیفی پرسشنامه‌ها

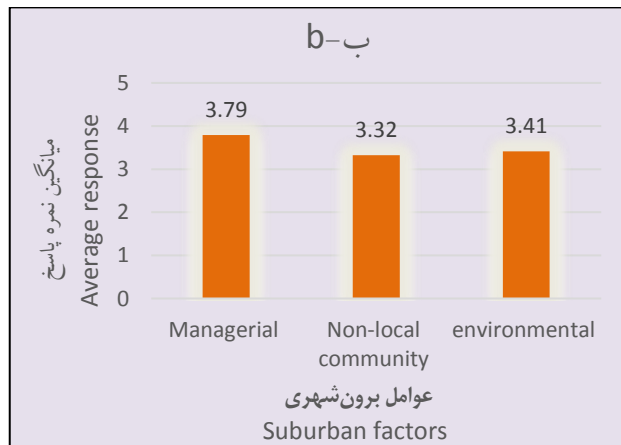
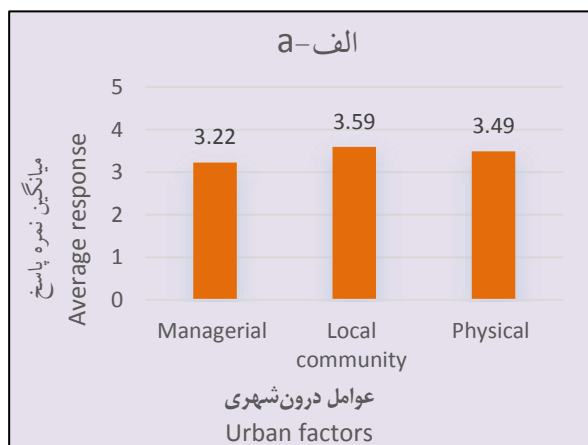
همان‌گونه که بیان شد، پرسشنامه تدوین شده در قالب طیف لیکرت پنج درجه‌ای (با میزان خیلی کم (۱)، کم (۲)، متوسط (۳)، زیاد (۴) و خیلی زیاد (۵)) تهیه شد. که با این شیوه و با استفاده از نرم افزار SPSS می‌توان پاسخ‌های کیفی را به نتایج کمی تبدیل کرد

با توجه به شکل‌های ۶، ۷ و ۸ و همچنین جدول ۵، در صورتی که وضع موجود (سناریوی اول) تغییر یافته و توسعه نامناسب شهری و تجاوز به حریم رودخانه بیش از شرایط موجود اتفاق افتد (سناریوی دوم) ارتفاع و پهنه سیل به شدت افزایش خواهد یافت. در حالی که با آزادسازی حریم و بستر رودخانه و آبراهه‌ها (سناریوی سوم) و در نتیجه کاهش ضریب‌زبری، ارتفاع سیل (شکل‌های ۶ و ۷) و پهنه سیل (جدول ۵ و شکل ۸) کاهش خواهند یافت.

از آنجایی که هر چه دوره بازگشت بارندگی بیشتر باشد، رواناب بیشتری هم تولید می‌شود (علیزاده، ۱۳۸۶)، در این مطالعه نتایج پهنه‌بندی سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ سال ارائه شد، تا پهنه سیل و در نتیجه مساحتی که در هنگام وقوع سیل دچار آبگرفتگی می‌شود، برای این دوره بازگشت نشان داده شود. از طرفی در شرایطی که طول دوره آماری کوتاه باشد، برآورد رواناب برای دوره بازگشت بالا، دارای صحت پایینی خواهد بود (Van den Brink, 2005). بنا بر این، با توجه به طول دوره آماری در دسترس (نزدیک به ۳۰ سال) از بارش‌های منطقه مورد مطالعه، مدل‌سازی سیل با دوره‌های بازگشت بیشتر از ۲۰۰ سال از واقعیت دور خواهد بود. از طرف دیگر به نظر می‌رسد که به دلیل تغییر اقلیم فراوانی وقوع سیل‌ها و سایر رویدادهای فرین آب و هوایی بیشتر شود (Van den Brink, 2005). از این رو، مقدار سیل با دوره بازگشت ۲۰۰ سال به عنوان سیلی که خطرات زیادی را به همراه خواهد داشت و با توجه به شرایط تغییر اقلیم، احتمال وقوع آن بیش از گذشته شده‌است، انتخاب شد.

تعیین عوامل موثر بر سیل از دیدگاه هیدرولوژی اجتماعی

همانطور که بیان شد، به منظور بررسی نقش عوامل انسانی و



شکل ۹- (الف) میزان تاثیر عوامل درون شهری بر تشدید وقوع سیل. (ب) میزان تاثیر عوامل برون شهری بر تشدید وقوع سیل درون شهر کلات
Figure 9- (a) The extent of the impact of urban factors on the intensification of floods. (b) The extent of the impact of suburban factors on the intensification of floods inside the city

بر اساس نتایج استخراج شده از پرسشنامه‌ها از میان عوامل درون‌شهری موثر بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در داخل شهر کلات، مهم‌ترین عامل، عوامل مربوط به جامعه محلی (فعالیت‌های مردم محلی ساکن در شهر) می‌باشد (شکل ۹ الف). همچنین بر اساس نتایج استخراج شده از پرسشنامه‌ها از میان عوامل مرتبط با خارج از حوضه شهری که بر تشدید وقوع سیل و آبگرفتگی در داخل شهر کلات موثر هستند، مهم‌ترین عامل، مربوط به عوامل مرتبط با مدیریت حوضه آبخیز می‌باشد. (شکل ۹ ب).

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹ در بخش عوامل درون‌شهری بیش‌ترین فراوانی در حوزه اقدامات مردم محلی با میانگین پاسخ ۳/۵۹ است؛ به این معنی که بر اساس طیف لیکرت، تاثیر اقدامات مردم محلی بر تشدید وقوع سیل بیشتر از "متوسط (۳)" و نزدیک به "زیاد (۴)" می‌باشد. به عبارت دیگر اقدامات ساکنین داخل شهر (شکل ۹-الف) مهم‌ترین عامل افزایش تعدد وقوع سیل و آبگرفتگی در داخل شهر می‌باشد. از این اقدامات می‌توان مواردی مانند ساخت و ساز در مسیر و حریم آبراهه‌ها و انسداد مسیر آبراهه‌ها را نام برد. همچنین در بخش عوامل برون‌شهری بیش‌ترین فراوانی در حوزه مدیریتی با میانگین ۳/۷۹ و کم‌ترین فراوانی در حوزه فعالیت‌های مردم غیر محلی میانگین ۳/۳۲ می‌باشد که بر اساس طیف لیکرت تاثیر عوامل مدیریتی که در بالادست شهر موجب افزایش سیلاب در داخل شهر کلات می‌شود نسبتاً "زیاد (۴)" است. همان‌گونه که بیان شد با توجه به شبکه هیدروگرافی و موقعیت شهر کلات، عوامل دیگری در خارج از حوضه شهری بر وقوع سیل و آبگرفتگی موثر هستند، که در این میان "اقدامات مدیریتی" مهم‌ترین عامل از نظر وقوع سیل در این شهر می‌باشند (شکل ۹-ب). این اقدامات عموماً به مدیریت حوضه آبخیز در بالادست شهر مربوط می‌شود. از جمله اقدامات مدیریتی در حوضه آبخیز می‌توان به جلوگیری از چرای مفرط دام، حفظ و توسعه پوشش گیاهی، تراس‌بندی و کاهش فرسایش و تولید رسوب، اشاره نمود. این موارد مدیریت رشد هوشمند و برنامه‌ریزی شده را در گسترش شهری و توسعه متراکم درون شهری برای کاهش خطر سیل ضروری می‌سازد (Beshir and Song, 2021).

نتیجه‌گیری

همان‌گونه که بیان شد، در شهر کلات در سالیان اخیر مشکلات ناشی از وقوع سیل و آبگرفتگی به شدت افزایش یافته‌است. در این پژوهش علل وقوع این مشکل از دو دیدگاه فنی و اجتماعی مورد بررسی قرار گرفت. با مدل‌سازی روابط بارش رواناب در زیرحوضه‌های منتهی به شهر و انجام آنالیز حساسیت، نتایج نشان می‌دهد که تغییر

کاربری اراضی و پوشش سطح زمین (CN)، در مقایسه با تغییرات بارندگی، تاثیر بیشتری بر دبی اوج سیل دارد. به‌طوری که در یکی از زیرحوضه‌ها، با ۲۰ درصد افزایش عدد منحنی، دبی اوج با دوره بازگشت ۲ سال بیش از ۱۱۰ درصد افزایش می‌یابد. در حالی که افزایش ۲۰ درصدی بارندگی، در دوره بازگشت ۲ سال، دبی اوج را تنها ۳ درصد افزایش می‌دهد. نتایج تحقیقات ما و همکاران (Ma et al., 2019) نیز تاثیر قابل توجه عدد منحنی بر دبی اوج رواناب را تایید می‌کند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر در مقدار بارش تاثیر چندانی در افزایش دبی اوج سیلاب در این منطقه نخواهد داشت؛ اما تغییر در عدد منحنی (CN) به شدت بر بزرگی سیل (دبی اوج و حجم سیل) تاثیر می‌گذارد. همان‌طور که ذکر شد، کاربری اراضی و پوشش سطح زمین یکی از عوامل موثر بر عدد منحنی است؛ از طرفی نوع پوشش زمین و نوع کاربری به راحتی توسط ساکنان منطقه تغییر می‌کند. در نتیجه، نقش فعالیت‌های انسانی در افزایش خطر سیل می‌تواند بیشتر از تغییرات الگوی بارندگی در منطقه مورد مطالعه قرار گیرد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، زمان تمرکز حوضه و زمان اوج سیلاب (به دلیل وجود سطوح غیرقابل نفوذ و کوچک بودن سطح زیرحوضه‌ها) در حدود ۷۰ درصد از زیرحوضه‌ها کمتر از ۱ ساعت و در برخی از زیرحوضه‌ها حتی کمتر از ۳۰ دقیقه است. این موضوع لزوم برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح سیل در این زیرحوضه‌ها و در سطح شهر را پررنگ‌تر می‌کند. در منطقه مورد مطالعه توسعه نامناسب و بی برنامه شهر و کاهش پوشش گیاهی و نفوذپذیری، باعث کوتاه‌تر شدن زمان اوج سیل و افزایش دبی اوج سیل شده‌است. بنا بر این، پیشنهاد می‌شود در این شهر از روش‌های نوین مدیریت سیلاب شهری از جمله استفاده از آسفالت تراوا و سایر روش‌های توسعه کم‌اثر به منظور افزایش نفوذپذیری و کاهش دبی اوج سیلاب استفاده شود.

نتایج پهنه‌بندی سیل در ۳ سناریو نشان می‌دهد که ضریب ماندینگ تاثیر قابل توجهی در ارتفاع و مساحت سیل دارد. در نتیجه می‌توان با اعمال تدابیر مدیریتی در آینده و همچنین توجه به بازخورد بین شهرنشینی و پهنه سیل، خسارات ناشی از سیل را کاهش داد. در این صورت ساختمان‌ها و سازه‌های انسانی باید تا حد امکان از مسیر رودخانه حذف شوند و ساخت این سازه‌ها در مناطق سیل‌گیر متوقف شود. به منظور افزایش نفوذپذیری، برخی از مناطق سیل‌گیر می‌توانند به فضای سبز (مانند پارک) اختصاص داده شوند. به این ترتیب می‌توان مقداری از سیلاب را به این نواحی هدایت کرد تا در زمین نفوذ نموده و از جاری شدن به سمت پائین دست بازداشته شود.

بر اساس نتایج حاصل از تحقیقات میدانی و تحلیل پرسشنامه‌های تکمیل شده توسط کارشناسان و دست‌اندرکاران مربوطه، اساسی‌ترین عاملی که در درون شهر باعث افزایش خسارات سیل و آبگرفتگی می‌شود، اقدامات مردم محلی و ساکنان شهر کلات است. از جمله

بالادست موجب وقوع سیل در داخل شهر کلات می‌شوند شامل "عدم اجرای فعالیت‌های آبخیزداری" و "عدم ساماندهی آبراهه‌ها در بالادست حوضه" می‌باشند.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان نتیجه گرفت که نقش عوامل انسانی در وقوع و تشدید سیل و همچنین افزایش خسارات سیل در شهر کلات، بسیار بیشتر از عوامل طبیعی (مانند تغییر شدت بارندگی) است. بنابراین برای کنترل سیلاب باید برنامه‌های مدیریتی در منطقه اعمال شود و این برنامه‌ها باید شامل جلوگیری از: کاهش نفوذپذیری، احداث ساختمان و سایر موانع در حریم رودخانه، مسدود نمودن آبراهه‌ها و یا تغییر جهت مسیر آبراهه‌ها باشند. ضمن آنکه باید برنامه ریزی‌هایی برای افزایش پوشش گیاهی در بالادست شهر انجام شود. پیشنهاد می‌شود، پژوهش‌های دیگری در مورد نقش عوامل اقتصادی و اجتماعی در افزایش خطر سیل و میزان خسارات آن انجام گیرد.

مهم‌ترین این فعالیت‌ها می‌توان به "تعرض به حریم و حتی بستر رودخانه"، "ساخت و ساز ساختمان‌های مسکونی در حریم رودخانه"، "افزایش تراکم جمعیت در پهنه سیل‌گیر"، و حتی "احداث ساختمان‌های اداری در حریم رودخانه" اشاره کرد. براساس نتایج حاصل از پرسشنامه‌ها بیش‌ترین خسارت در داخل شهر ناشی از فعالیت مردم محلی است، بنابر این می‌توان با اجرای برنامه‌های آگاه سازی و برنامه‌ریزی برای جلوگیری از گسترش نامناسب شهر در حریم رودخانه، خسارات سیل را به میزان قابل‌توجهی کاهش داد که نتایج پژوهش هاندایانی و همکاران (Handayani et al., 2020) نیز این موضوع را تایید می‌کند. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل پرسشنامه‌ها، مهم‌ترین عواملی که در خارج از شهر و از بالادست باعث تشدید وقوع سیلاب در داخل شهر کلات می‌شوند، مربوط به "عوامل مدیریتی" می‌باشد. مهم‌ترین عوامل مدیریتی تاثیر گذار که از

منابع

1. Aerts, J.C., Botzen, W.W., Emanuel, K., Lin, N., De Moel, H., & Michel-Kerjan, E.O. (2014). Evaluating flood resilience strategies for coastal megacities. *Science* 344: 473-475. <https://doi.org/10.1126/science.1248222>.
2. Alizadeh, A. (2007). *Principles of Applied Hydrology*. The seventh edition. (In Persian)
3. Alfieri, L., Dottori, F., Betts, R., Salamon, P., & Feyen, L. (2018). Multi-model projections of river flood risk in Europe under global warming. *Climate* 6: 6. <https://doi.org/10.3390/cli6010006>.
4. Asadi, R., Karami, M., & Jafari, Gh. (2015). *Investigating the main factors of aggravating flood damage in Iran and its control methods*. 10th International Seminar on River Engineering, Ahvaz.
5. Badri, A., Sadeghloo, T., & Kazemi, N. (2018). *Crisis management (with emphasis on rural areas)*. Noor e Elm Publications, Tehran. (In Persian)
6. Baioni, D. (2011). Human activity and damaging landslides and floods on Madeira Island. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11: 3035-3046. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3035-2011>.
7. Bala, J. (2016). Contribution of SPSS in Social Sciences Research. *International Journal of Advanced Research in Computer Science* 7.
8. Beshir, AA., & Song, J. (2021). Urbanization and its impact on flood hazard: the case of Addis Ababa, Ethiopia. *Natural Hazards* 109(1): 1167-1190. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04873-9>.
9. Blair, P., & Buytaert, W. (2016). Socio-hydrological modelling: a review asking "why, what and how?". *Hydrology and Earth System Sciences* 20: 443-478. <https://doi.org/10.5194/hess-20-443-2016>.
10. Chan, SW., Abid, SK., Sulaiman, N., Nazir, U., & Azam, K.A. (2022). systematic review of the flood vulnerability using geographic information system. *Heliyon* e09075. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09075>.
11. Cowan, W.L. (1956). Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering* 37: 473-475.
12. CRED, U. (2015). *The human cost of weather related disasters*. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR). [org/10.1017/CBO9781107415324](https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324), 4.
13. Daliran firooz, H., Mokhtari, F., Soltani, S., & Moosavi, A. (2015). Evaluation of flood damage in Ghamsar and Qahroud watersheds using HEC-FIA software. *Journal of Soil and Water Sciences* 19: 63-75. (In Persian with English abstract)
14. Dankers, R., Arnell, N.W., Clark, D.B., Falloon, P.D., Fekete, B.M., Gosling, S.N., & Satoh, Y. (2014). First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 3257-3261. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>.
15. Diaconu, DC., Costache, R., & Popa, MC. (2021). An overview of flood risk analysis methods. *Water* 13(4): 474. <https://doi.org/10.3390/w13040474>.
16. Di Baldassarre, G., Montanari, A., Lins, H., Koutsoyiannis, D., Brandimarte, L., & Blöschl, G. (2010). Flood fatalities in Africa: from diagnosis to mitigation. *Geophysical Research Letters* 37(22). <https://doi.org/10.1029/2010GL045467>.
17. Di Baldassarre, G., Viglione, A., Carr, G., Kuil, L., Salinas, J., & Blöschl, G. (2013). Socio-hydrology: conceptualising human-flood interactions. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 3295-3303. <https://doi.org/10.1002/2014WR016416>.
18. Dougherty, M., Dymond, R.L., Grizzard Jr, T.J., Godrej, A.N., Zipper, C.E., & Randolph, J. (2007). Quantifying

- long-term hydrologic response in an urbanizing basin. *Journal of Hydrologic Engineering* 12: 33-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(33\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(33)).
19. Du, J., Qian, L., Rui, H., Zuo, T., Zheng, D., Xu, Y., & Xu, C.-Y. (2012). Assessing the effects of urbanization on annual runoff and flood events using an integrated hydrological modeling system for Qinhuai River basin, China. *Journal of Hydrology* 464: 127-139. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.057>.
 20. Eftekhari, A., Salajeghe, A., & Hoseini, A. (2011). Evaluation of flood zoning with changes in roughness coefficient Case study: Atrak river. *Journal of Natural Geography* 22: 91-106. (In Persian)
 21. Feng, B., Zhang, Y., & Bourke, R. (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards* 106(1): 613-627. <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
 22. Ghahraman, B., & Abkhezr, H. (2004). Correction and relations of intensity-duration-frequency of rainfall in Iran. *Soil and Water Sciences* 8(2): 1-14. (In Persian). <http://20.1001.1.24763594.1383.8.2.1.4>.
 23. Ghaljaee, F., Naderifar, M., & Goli, H. (2017). *Snowball, a purposive sampling method in qualitative research*. Strides in Development of Medical Education.
 24. Handayani, W., Chigbu, UE., Rudiarito, I., & Putri, IHS. (2020). Urbanization and Increasing Flood Risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An Assessment towards Better Land Use Policy and Flood Management. *Land* 9(10): 343. <https://doi.org/10.3390/land9100343>.
 25. Harrower, M.J. (2010). Geographic Information Systems (GIS) hydrological modeling in archaeology: an example from the origins of irrigation in Southwest Arabia (Yemen). *Journal of Archaeological Science* 37: 1447-1452. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.004>.
 26. Hodgkins, G., Dudley, R., Archfield, S.A., & Renard, B. (2019). Effects of climate, regulation, and urbanization on historical flood trends in the United States. *Journal of Hydrology* 573: 697-709. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.102>.
 27. Jha, A.K., Bloch, R., & Lamond, J. (2012). *Cities and flooding: a guide to integrated urban flood risk management for the 21st century*. World Bank Publications.
 28. Junk, W.J., Bayley, P.B., & Sparks, R.E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* 106: 110-127.
 29. Khorasan Razavi water technical report. (2014). *Report of Khorasan Razavi floods (2014-2015)*.
 30. Ma, M., Liu, C., Zhao, G., Xie, H., Jia, P., Wang, D., & Hong, Y. (2019). Flash flood risk analysis based on machine learning techniques in the Yunnan Province, China. *Remote Sensing* 11: 170. <https://doi.org/10.3390/rs11020170>.
 31. Marcus, W.A., Roberts, K., Harvey, L., & Tackman, G. (1992). An evaluation of methods for estimating Manning's n in small mountain streams. *Mountain Research and Development* 227-239. <https://doi.org/10.2307/3673667>.
 32. Mohamadi, J., Khoda Rahmi, Y., & Golabi, M. (2017). *Estimation of flood hydrograph with HEC-HMS model and simulation of flood zoning using HEC-RAS model Case study: Bakhtiar catchment, Karun river*. The second national hydrological conference of Iran, Shahrekord. (In Persian)
 33. Munawar, HS., Hammad, AW., & Waller, ST. (2022). Remote Sensing Methods for Flood Prediction: A Review. *Sensors* 22(3): 960. <https://doi.org/10.3390/s22030960>.
 34. Nardi, F., Annis, A., & Biscarini, C. (2018). On the impact of urbanization on flood hydrology of small ungauged basins: The case study of the Tiber river tributary network within the city of Rome. *Journal of Flood Risk Management* 11: S594-S603. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12186>.
 35. NRCS. (2010). *National Engineering Handbook Hydrology*. USDA Soil Conservation Service
 36. Ogden, F.L., Raj Pradhan, N., Downer, C.W., & Zahner, J.A. (2011). Relative importance of impervious area, drainage density, width function, and subsurface storm drainage on flood runoff from an urbanized catchment. *Water Resources Research* 47(12). <https://doi.org/10.1029/2011WR010550>.
 37. Opperman, J.J., Galloway, G.E., Fargione, J., Mount, J.F., Richter, B.D., & Secchi, S. (2009). Sustainable floodplains through large-scale reconnection to rivers. *Science* 326: 1487-1488. <https://doi.org/10.1126/science.1178256>.
 38. Peel, M.C., & Blöschl, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world. *Progress in Physical Geography* 35: 249-261. <https://doi.org/10.1177/0309133311402550>.
 39. Qi, W., Ma, C., Xu, H., Chen, Z., Zhao, K., & Han, H. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards* 108(1): 31-62. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>.
 40. Regional Water Company of Khorasan Razavi. (2015). *Comprehensive Studies of Floods in Kalat*. (In Persian)
 41. Romali, NS., Yusop, Z., & Ismail, AZ. (2018). Application of HEC-RAS and Arc GIS for floodplain mapping in Segamat town, Malaysia. *GEOMATE Journal* 15(47): 7-13. <https://doi.org/10.21660/2018.47.3656>.
 42. Roodaki, S., & Azizian, A. (2020). Uncertainty analysis due to the application of different infiltration estimation methods on the performance of the HEC-HMS rainfall-runoff model using the GLUE algorithm. *Iran Water Resources Research* 16(2): 50-66. (In Persian). <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=562645>.
 43. Saberi tansavan, M., Ganji, Z., Delghand, M., & Dorostkar, V. (2020). Investigation of sensitivity analysis of flood parameters to roughness changes (Case study: Shirvan region). *Irrigation and Water Engineering of Iran* 10: 167-180. (In Persian)
 44. Salami, A.W., Bilewu, S.O., Ibitoye, B.A., & Ayanshola, M.A. (2017). Runoff hydrographs using Snyder and SCS

- synthetic unit hydrograph methods: A case study of selected rivers in south west Nigeria. *Journal of Ecological Engineering* 18(1). <http://10.12911/22998993/66258>.
45. Schwartz, S.S., & Smith, B. (2014). Slowflow fingerprints of urban hydrology. *Journal of Hydrology* 515: 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.019>.
46. Sivapalan, M., Savenije, H.H., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrol. Process* 26: 1270-1276. <http://doi.org/10.1002/hyp.8426>.
47. Thompson, S., Sivapalan, M., Harman, C., Srinivasan, V., Hipsey, M., Reed, P., & Blöschl, G. (2013). Developing predictive insight into changing water systems: use-inspired hydrologic science for the Anthropocene. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 5013-5039. <https://doi.org/10.5194/hess-17-5013-2013>.
48. Tripathi, G., Pandey, A.C., & Parida, B.R. (2022). Flood Hazard and Risk Zonation in North Bihar Using Satellite-Derived Historical Flood Events and Socio-Economic Data. *Sustainability* 14(3): 1472. <https://doi.org/10.3390/su14031472>.
49. Troy, T., Konar, M., Srinivasan, V., & Thompson, S. (2015). Moving sociohydrology forward: a synthesis across studies. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 3667-3679. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3667-2015>.
50. Valeo, C., He, J., & Kasiviswanathan, K.S. (2021). Urbanization under a Changing Climate—Impacts on Hydrology. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute* 13(4): 393. <https://doi.org/10.3390/w13040393>.
51. Viglione, A., Di Baldassarre, G., Brandimarte, L., Kuil, L., Carr, G., Salinas, J.L., & Blöschl, G. (2014). Insights from socio-hydrology modelling on dealing with flood risk—roles of collective memory, risk-taking attitude and trust. *Journal of Hydrology* 518: 71-82. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.018>.
52. Winsemius, H.C., Aerts, J.C., Van Beek, L.P., Bierkens, M.F., Bouwman, A., Jongman, B., & Van Vuuren, D.P. (2016). Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change* 6: 381-385. <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>.
53. Van den Brink, H., Können, G., Opsteegh, J., Van Oldenborgh, G., & Burgers, G. (2005). Estimating return periods of extreme events from ECMWF seasonal forecast ensembles. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 25(10): 1345-1354.
54. White, G.F. (1945). *Human adjustment to floods. A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States*. In: Chicago, T.U.O., Ed., Research Paper No. 29, The University of Chicago, Chicago.
55. Yang, X., Ren, L., Singh, V., Liu, X., Yuan, F., Jiang, S., & Yong, B. (2012). Impacts of land use and land cover changes on evapotranspiration and runoff at Shalamulun River watershed, China. *Hydrology Research* 43: 23-37. <https://doi.org/10.2166/nh.2011.120>.



Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River)

M. Mohammadi Ghaleni^{1*}, H. Kardan Moghaddam²

Received: 11-07-2022

Revised: 30-07-2022

Accepted: 08-08-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Mohammadi Ghaleni, M., & Kardan Moghaddam, H. (2022). Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River). *Journal of Water and Soil* 36(4): 439-458. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.77413.1177](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.77413.1177)

Introduction

The water quantity and quality has always been one of the main challenges in the issue of allocating water resources for different uses. Water quality management requires the collection and analysis of large amounts of water quality parameters that will be evaluated and concluded. Many tools have been found to simplify the evaluation of water quality data, and the water quality index (WQI) is one of these widely used tools. In summary, the WQI can be defined as a number obtained from the combination of several quality parameters based on standards for its extraction. The aim of this study was to develop and introduce the new Surface Drinking Water Quality Index (SDWQI) adopt the water quality parameters measured on hydrometric stations of Iran. In developing this index, criteria such as the availability of required parameters in most rivers and simple and accurate methods have been considered. Also, the ability to calculate with the minimum general parameters of water quality, simple calculations and in terms of the international standard WHO for drinking is one of the advantages of the introduced index.

Materials and Methods

For this purpose, 12 water quality parameters including Total Dissolved Solids (TDS), Electrical Conductivity (EC), Total Hardness (TH), pH, Chloride (Cl^-), Sulfate (SO_4^{2-}), Carbonate (CO_3^{2-}), Bicarbonate (HCO_3^-), Magnesium (Mg^{2+}), Sodium (Na^+), Calcium (Ca^{2+}) and Potassium (K^+) have been used from Rudbar and Astaneh hydrometric stations located on Sefidroud river. Then initial preprocessing on data e.g. correlation analysis, and multivariate statistical methods including cluster analysis (CA) and principal components analysis (PCA) are used to selecting and weighting of water quality parameters using the “clustering” and “factoextra” packages in R 4.1.1. In order to develop the SDWQI were performed four steps including, parameter selection, sub-indexing, weighting and aggregation of the index. Also, in order to evaluate the index of the present research, the results of the SDWQI have been compared with the WHO drinking water quality index and Schoeller drinking water quality classification.

Results and Discussion

Correlation analysis between water quality parameters shows a significant correlation between TDS, EC and TH parameters and also with Cl^- , Ca^{2+} and Mg^{2+} parameters at the level of 1% in both Astaneh and Rudbar stations. On the other hand, the lowest values of Pearson correlation coefficient are related to pH and CO_3^{2-} parameters with other quality parameters. The results of CA indicate that most of the water quality parameters are located in separate clusters. So only the parameters TDS, EC, Cl^- and Na^+ in both Rudbar and Astaneh stations are in the same cluster. The weights of the parameters showed that TDS and K^+ are assigned with the

1- Assistant Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran

(*- Corresponding Author Email: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)

2- Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran

highest and lowest weights equal to 0.163 and 0.031 based on PCA method. Also, PCA results show that first and second principal components covered 59.3% and 67.6% of the total variance of measured water quality parameters in Rudbar and Astaneh stations, respectively. Water quality classification results indicate that (40.5%, 16.4% and 23.7%) and (90.1%, 73.1% and 57.3%) of data in Rudbar and Astaneh stations, respectively, fell into the excellent and good categories for drinking purposes based on Schoeller classification, WHOWQI and SDWQI.

Conclusion

Generally, the comparison of the SDWQI with the WHO index and the Schoeller classification shows the rigidity of the new index in the classification of water quality for drinking purposes. Each water quality index developed in order to evaluate the uncertainty of results, should be tested for data with different characteristics in terms of the range of variation with different limit values (minimum and maximum). The index developed in the present study is no exception to this rule and in order to evaluate the results better, it is suggested that to be evaluated and analyzed with data from other hydrometric stations. Another important point that should be considered in using any water quality index, including the present research index, is to examine the allowable limits of water quality parameters that are not considered in these indicators. The results of the study indicated that two most important steps in the development of a quality index that have a great impact on its results are sub-indexing and weighting of parameters. According to the results, two ideas recommended for future research. One, choosing an appropriate method such as non-deterministic (fuzzy) and intelligent (machine learning) methods to sub-index the parameters and two, to weigh the parameters more effectively, multivariate statistical methods such as clustering, factor analysis and principal component analysis should be used.

Keywords: Clustering, Hydrometric stations, Principal component analysis, Sefidroud river, Water quality index

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۵۸-۴۳۹

معرفی شاخص جدید کیفیت منابع آب سطحی جهت مصارف شرب با استفاده از روش‌های چندمتغیره آماری (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)

مهدی محمدی قلعه‌نی^{۱*} - حمید کاردان مقدم^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

چکیده

هدف از تحقیق حاضر توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب شرب (SDWQI)، با استفاده از پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه سفیدرود است. به این منظور ۱۲ پارامتر کیفی ماهانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl⁻)، سولفات (SO₄⁻²)، کربنات (CO₃⁻²)، بی‌کربنات (HCO₃⁻)، منیزیم (Mg²⁺)، سدیم (Na⁺)، کلسیم (Ca²⁺) و پتاسیم (K⁺) طی دوره آماری ۹۹-۱۳۶۶ در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه واقع در رودخانه سفیدرود استفاده شده است. پس از پردازش‌های اولیه روی داده‌ها مانند تحلیل همبستگی پارامترها، از روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی و تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) به منظور انتخاب و وزن‌دهی پارامترهای کیفیت آب با استفاده از بسته‌های "cluster" و "factoextra" در نرم‌افزار R 4.1.1 برای توسعه شاخص جدید کیفیت آب استفاده شده است. نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO) و دسته‌بندی کیفیت آب شرب شولر مقایسه شده است. وزن‌دهی پارامترها با استفاده از روش PCA حاکی از اختصاص بیشترین و کمترین وزن به ترتیب به پارامترهای TDS و K⁺ و برابر ۰/۱۶۳ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از پوشش ۵۹/۳ و ۶۷/۶ درصدی مؤلفه‌های اصلی اول و دوم از واریانس تغییرات کل پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی به ترتیب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد. نتایج دسته‌بندی کیفیت آب بیانگر قرار گرفتن به ترتیب (۴۰/۵، ۱۶/۴ و ۲۳/۷ درصد) و (۹۰/۱، ۷۳/۱ و ۵۷/۳ درصد) داده‌های ایستگاه‌های رودبار و آستانه در رده‌ی خوب و عالی جهت مصارف شرب بر اساس دسته‌بندی شولر، شاخص WHO و شاخص جدید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ایستگاه هیدرومتری، پارامترهای کیفیت آب، خوشه‌بندی، رودخانه سفیدرود، شاخص کیفیت آب

مقدمه

موضوع کمیت و کیفیت آب، همواره از چالش‌های اساسی در مسئله تخصیص منابع آب به مصارف مختلف می‌باشد. عوامل طبیعی و فعالیت‌های انسانی معمولاً باعث تخریب کیفیت منابع آب سطحی و

زیرزمینی می‌شوند. شرایط آب و هوایی، ریزش‌های جوی، خشکسالی، سیلاب، فرسایش خاک، زمین‌شناسی منطقه و انحلال مواد معدنی از جمله عوامل طبیعی کاهش کیفیت منابع آب می‌باشند. از طرف دیگر فعالیت‌های انسانی مانند رشد جمعیت، تخلیه آلاینده‌های شهری و صنعتی، دفن پسماندها و فعالیت‌های کشاورزی از جمله مهم‌ترین عوامل کاهش کیفیت آب در رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی می‌باشند. کاهش کیفیت منابع آب با توجه به حدود مجاز استانداردهای لازم بر اساس نوع مصارف شرب، کشاورزی، خدمات و یا صنعت، استفاده از این‌گونه منابع آبی را محدود می‌سازد (Kumar and Sangeetha, 2020).

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران
(Email: m-mohammadighaleni@araku.ac.ir)
* - نویسنده مسئول
۲- استادیار موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران
DOI: 10.22067/JSW.2022.77413.1177

مهم‌ترین مزیت شاخص معرفی شده است که کاربرد آن را در همه رودخانه‌هایی که دارای ایستگاه هیدرومتری می‌باشند، امکان‌پذیر می‌سازد. به منظور توسعه شاخص جدید، ۱۱ پارامتر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کربنات (CO_3^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) در مقیاس ماهانه طی یک دوره آماری ۳۴ ساله (۹۹-۱۳۶۶) استفاده شده است. ۲- توسعه شاخص به منظور کاربرد مصارف شرب: با توجه به محدودیت‌های منابع آبی به خصوص جهت مصارف شرب، قابلیت ارزیابی اولیه و آسان کیفیت آب در بازه‌های مختلف رودخانه‌ها به منظور کاربرد جهت مصارف شرب از دیگر مزایای شاخص جدید معرفی شده می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری می‌باشد که ارزیابی کیفیت آب جهت مصارف شرب با لحاظ تمامی استانداردها و حساسیت‌های مصرف شرب، نیاز به پارامترها و بررسی‌های بسیار زیادی دارد. اما هدف از این تحقیق ارزیابی اولیه کیفیت آب رودخانه‌ها با توجه به حداقل پارامترهای اندازه‌گیری شده بر اساس استاندارد کیفیت آب سازمان بهداشت جهانی^۳ (WHO) است. ۳- روش توسعه شاخص معرفی شده: در این تحقیق سعی شده است مواد و روش‌هایی جامع، ساده و دقیق برای توسعه شاخص کیفیت آب ارائه شود تا روش تحقیق بیان شده قابل فهم و کاربرد برای تمامی محققان فعال در زمینه مباحث کیفیت آب باشد. به منظور توسعه شاخص جدید در هر مرحله تمامی روش‌ها به طور مختصر بیان و روش مورد استفاده به طور کامل شرح داده شده است.

هدف اصلی از تحقیق حاضر توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب‌های سطحی به منظور کاربرد برای مصارف شرب^۴ (SDWQI) می‌باشد. در توسعه این شاخص ملاک‌هایی مانند در دسترس بودن پارامترهای موردنیاز در اکثر رودخانه‌ها و روش کار ساده و دقیق مد نظر قرار گرفته است. به طور خلاصه قابلیت محاسبه با حداقل پارامترهای عمومی کیفیت آب، محاسبات ساده و لحاظ استاندارد بین‌المللی WHO برای مصارف شرب از مزایای شاخص معرفی شده می‌باشد.

مدیریت کیفیت آب نیازمند جمع‌آوری و تحلیل حجم زیادی از داده‌های پارامترهای کیفیت آب است که ارزیابی و نتیجه‌گیری از آنها مشکل خواهد بود. ابزارهای زیادی برای ارزیابی ساده‌تر داده‌های کیفیت آب توسعه یافته است که شاخص کیفیت آب^۱ یکی از این ابزارهای پرکاربرد می‌باشد. جذابیت استفاده از یک عدد به عنوان شاخص کیفیت آب به جای مجموعه داده‌های پیچیده پارامترهای کیفیت آب برای مدیران و سایر مردم به خاطر درک راحت‌تر آن وجود دارد (Uddin et al., 2021). اگرچه تعاریف متفاوتی از شاخص کیفیت آب وجود دارد اما به طور خلاصه شاخص کیفیت آب را می‌توان یک عدد حاصل از ترکیب چند متغیر با لحاظ استانداردهایی برای استخراج آن برشمرد (Darapu et al., 2011). از زمان پیدایش مفهوم شاخص کیفیت آب، مطالعات بسیار زیادی به منظور افزایش دقت و کاهش عدم قطعیت مقادیر شاخص انجام شده است. هر شاخص توسعه داده شده دارای مزایا و معایب بوده و در یک شرایط محدود و به منظور اهداف خاصی قابل کاربرد می‌باشد. عدم قطعیت زیاد، کاربرد خاص و محدود و بیش‌برآورد یا کم‌برآورد کردن از جمله مهم‌ترین معایب اکثر شاخص‌های کیفیت آب توسعه داده شده است (Dao et al., 2020).

اگرچه توسعه شاخص‌های کیفیت آب محدود به ۵۰ سال اخیر می‌باشد، اما استفاده از این شاخص‌ها به منظور طبقه‌بندی کیفیت آب به اواسط قرن هجدهم میلادی باز می‌گردد (Abbasi and Abbasi, 2012). نخستین شاخص کیفیت آب توسط هورتون در دهه ۱۹۶۰ میلادی با استفاده از ۱۰ پارامتر کیفی قابل لحاظ برای اکثر پیکره‌های آبی توسعه داده شد (Horton, 1965). براون و همکاران (Brown et al., 1970) با حمایت بنیاد ملی بهداشت^۲ (NSF) شاخص ارائه شده توسط هورتون را اصلاح و با عنوان شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSF-WQI) ارائه کردند. شاخص‌های کیفیت آب دیگری نیز بر اساس شاخص NSF-WQI توسعه داده شده است (Uddin et al., 2021). تا به حال بیش از ۳۵ شاخص کیفیت آب توسط کشورها یا سازمان‌های مختلف به منظور ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی در سراسر جهان معرفی شده است (Abbasi and Abbasi, 2012; Dadolahi-Sohrab et al., 2012; Kannel et al., 2007; Stoner, 1978). یکی از مهم‌ترین معایب اکثر شاخص‌های کیفیت آب، عدم امکان استفاده از آنها به خاطر عدم اندازه‌گیری و در دسترس بودن پارامترهای کیفی مورد استفاده در آنها می‌باشد.

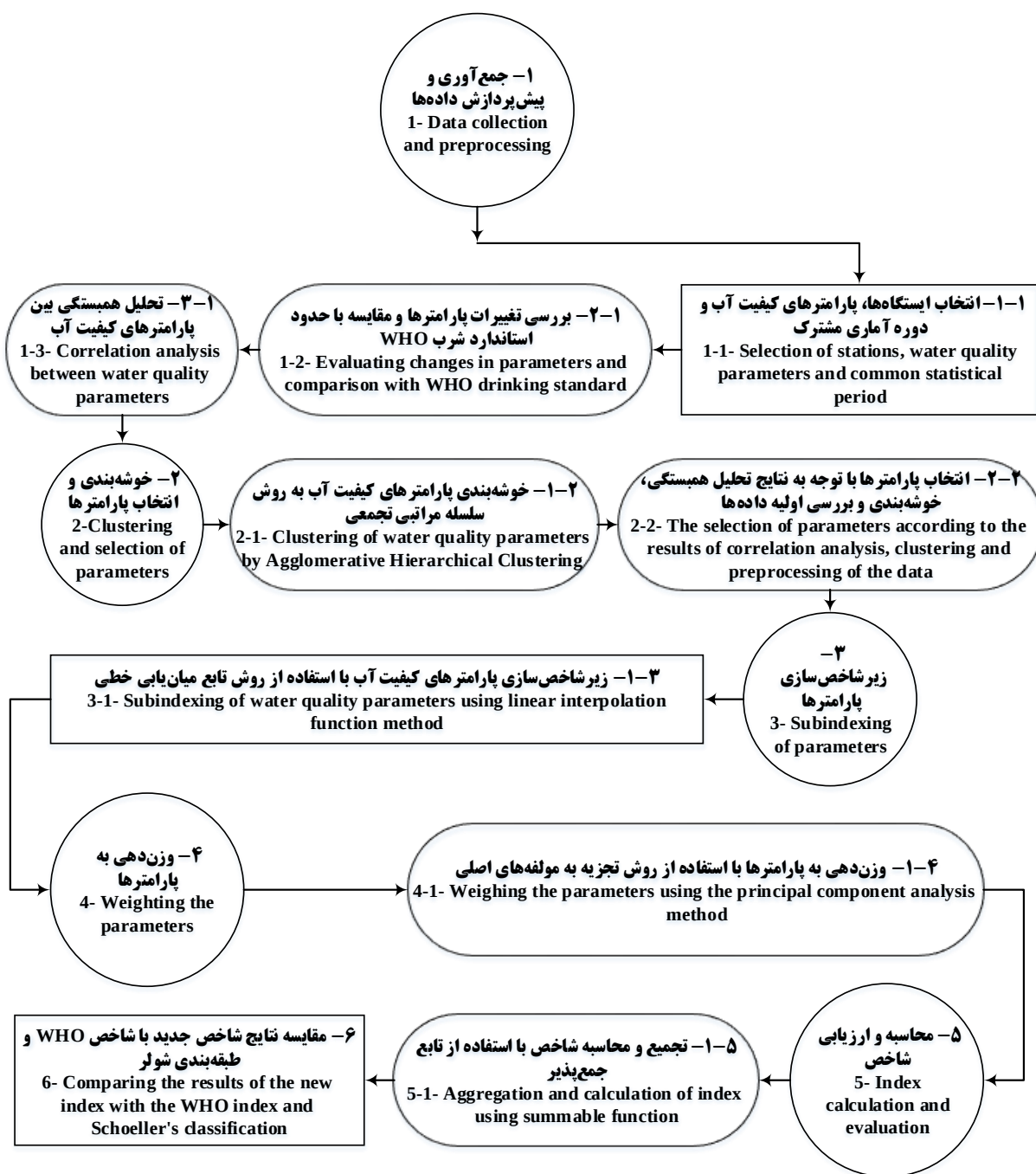
۱- پارامترهای کیفیت آب موردنیاز برای محاسبه شاخص: توسعه شاخص جدید با استفاده از پارامترهای معمول اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری روی رودخانه سفیدرود انجام شده است. این

3- World Health Organization (WHO)

4- Surface water Drinking Water Quality Index (SDWQI)

1- Water Quality Index

2- National Sanitation Foundation (NSF)



شکل ۱- مراحل انجام تحقیق حاضر
Figure 1- Flowchart of the present research

انتخاب پارامترها^۱، ۲) زیرشاخص‌سازی^۳ پارامترها، ۳) وزن‌دهی به

مواد و روش‌ها

توسعه یک شاخص کیفیت آب دارای چهار مرحله کلی شامل؛ ۱)

1- Parameter selection

2- Sub-indexing

مکانی نادرست، و طبیعت داده‌ها (جهش در داده‌ها به صورت طبیعی) رخ دهد. تشخیص داده‌های پرت در تحقیق حاضر با استفاده از آزمون ناپارامتری گرابز انجام شده است (Casillas et al., Grubbs, 1950); (2021).

خوشه‌بندی و انتخاب پارامترها

انتخاب پارامتر اولین مرحله از توسعه یک شاخص کیفیت آب می‌باشد که باید نوع و تعداد متغیرها با دلایل انتخاب‌شان در این مرحله مشخص شود. اغلب شاخص‌ها بین ۸ تا ۱۱ پارامتر و اغلب شامل دمای آب، کدورت^۳، pH، جامدات معلق^۴ (SS)، کل مواد جامد محلول^۵ (TDS)، فکال کلیفرم^۶ (FC)، اکسیژن محلول^۷ (DO)، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی^۸ (BOD) و نیتروژن نیتراتی (NH₃-N) می‌باشد. پارامترهای شاخص کیفیت آب بر اساس داده‌های موجود، نظرات کارشناسان و یا درجه اهمیت زیست‌محیطی انتخاب می‌شوند. در برخی از تحقیقات پارامترها بر اساس نوع استفاده از آب مانند شرب، کشاورزی و یا اثرات زیست‌محیطی انتخاب شده است (Kannel et al., 2007). اگرچه به طور کلی هیچ قاعده و قانون مشخصی برای انتخاب پارامترهای یک شاخص کیفیت آب وجود ندارد اما، تاثیرگذارترین عامل محدودیت‌های موجود در داده‌های در دسترس می‌باشد (Naubi Ma et al., 2020 Uddin et al., 2021); (et al., 2016).

موجود نبودن پارامترهای استفاده شده در یک شاخص، نخستین و اصلی‌ترین چالش در استفاده از شاخص‌های کیفیت آب توسعه داده شده برای پیکره‌های آبی با داده‌های محدود می‌باشد. در اکثر رودخانه‌های ایران به جزء برخی بازه‌های محدود که دارای طرح پایش کیفی مستمر و جامع می‌باشند، پارامترهای کیفی در دسترس به پارامترهای پایه‌ای که در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری می‌شوند، محدود است. این محدودیت در پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده با مشخصات زمانی و مکانی مناسب، دلیل اصلی توسعه شاخص کیفی معرفی شده در تحقیق حاضر می‌باشد. دو اصل در انتخاب پارامترهای کیفیت آب تحقیق حاضر ملاک قرار گرفته است.

پارامترها^۱ و^۲ فرآیند تجمیع^۳ شاخص می‌باشد. روش مورد استفاده در تحقیق حاضر برای هر یک از این مراحل در ادامه شرح داده شده است. در مرحله انتخاب پارامترها یک یا چند پارامتر کیفی برای مدنظر قرار دادن در شاخص کیفیت آب انتخاب می‌شوند. در مرحله دوم با توجه به متفاوت بودن واحدهای پارامترهای انتخاب شده، تمامی واحدها به صورت بدون بعد تبدیل می‌شوند. وزن‌دهی به پارامترهای کیفی با توجه به درصد اهمیت آنها در مرحله سوم توسعه شاخص کیفی انجام می‌شود. تجمیع پارامترها و تبدیل تمامی پارامترها به یک شاخص عددی در مرحله نهایی محاسبه شاخص کیفی انجام می‌شود (Uddin et al., 2021). فلوجارت انجام تحقیق حاضر به صورت شکل ۱ می‌باشد.

جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها

با توجه به هدف تحقیق حاضر، پارامترهای کیفیت آب که به طور معمول در ایستگاه‌های هیدرومتری اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند، به منظور توسعه یک شاخص کیفیت آب به منظور مصارف شرب مورد استفاده قرار گرفته است. به این منظور ۱۱ پارامتر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl⁻)، سولفات (SO₄⁻²)، کربنات (CO₃⁻²)، بی کربنات (HCO₃⁻)، منیزیم (Mg²⁺)، سدیم (Na⁺)، کلسیم (Ca²⁺) و پتاسیم (K⁺) در مقیاس ماهانه طی یک دوره آماری ۳۴ ساله (۱۳۶۶-۹۹) استفاده شده است. طول دوره آماری داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر (۱۳۶۶-۹۹) با در نظر گرفتن مشخصاتی مانند بلندمدت بودن طول دوره آماری (حداقل ۳۰ سال)، دوره زمانی یکسان آمار موجود در دو ایستگاه هیدرومتری و کیفیت داده‌ها از لحاظ داده‌های گمشده، کمتر، انتخاب شده است. محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه در شکل ۲ نشان داده شده است.

از مجموع ۴۴۸۸ داده پارامترهای کیفیت آب (۴۰۸ ماه برای ۱۱ پارامتر) اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه هیدرومتری در ۳۴ سال آمار مورد استفاده به ترتیب ۱۴ (۳۱٪ درصد) و ۳۰ (۶۷٪ درصد) داده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه جزء داده‌های ناقص می‌باشد، که این داده‌ها با استفاده از روش‌های رگرسیونی و همبستگی حداکثر بین متغیرها کامل شده است. داده‌های پرت می‌تواند به دلایلی مانند اشتباه انسانی در اندازه‌گیری و ثبت داده‌ها، خطاهای وسایل اندازه‌گیری، روش‌های اشتباه در تشخیص داده‌های پرت، پردازش داده‌ها و نمونه‌برداری، داده‌برداری اشتباه در اثر طرح‌ریزی زمانی -

3- Turbidity

4- Suspended Solids (SS)

5- Total Dissolved Solids (TDS)

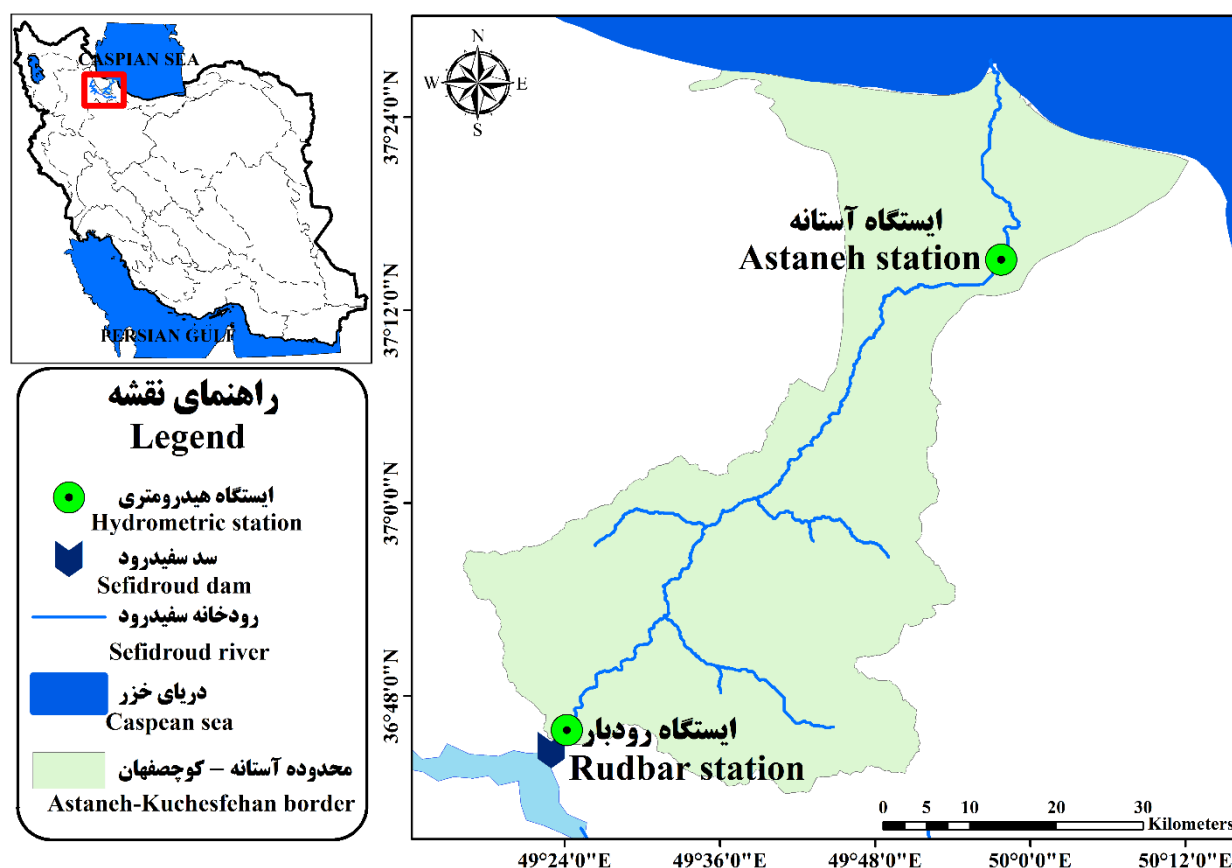
6- Fecal Coliforms (FC)

7- Dissolved Oxygen (DO)

8- Biochemical Oxygen Demand (BOD)

1- Parameter weighting

2- Aggregation process



شکل ۲- محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه
Figure 2- Location of the case study and Astaneh and Rudbar hydrometric stations

شاخص $CCME-WQI^2$ مرحله زیرشاخص‌سازی را حذف کرده و
تجمیع شاخص را با لحاظ مستقیم غلظت پارامترها بدون
زیرشاخص‌سازی انجام داده‌اند (Neary *et al.*, 2001).
سه روش شامل استفاده مستقیم از غلظت پارامترها^۳ بدون بی‌بعد
سازی، توابع میان‌یابی خطی^۴، توابع منحنی رتبه‌بندی^۵ برای مرحله
زیرشاخص‌سازی انواع پارامترهای کیفی مورد استفاده شده است.
شاخص‌هایی مانند هورتن^۶، دینیوس^۷، دالماتین^۸، لیو^۹ و ساید^{۱۰} بدون

نخست پارامترهای موجود و در دسترس (دسترسی آسان به
پارامترها در تمامی رودخانه‌ها با دارابودن حداقل یک ایستگاه
هیدرومتری) و دومی معیار قرار دادن مصارف شرب (با توجه به
محدودیت منابع آب زیرزمینی جهت مصارف شرب) به عنوان
ملاک‌های انتخاب پارامترهای کیفیت آب در تحقیق حاضر است.

زیرشاخص‌سازی^۱ پارامترها

هدف اولیه از مرحله زیرشاخص‌سازی تبدیل غلظت پارامترهای با
واحدهای مختلف به مقادیر بدون بعد متناظر با مقدار غلظت
اندازه‌گیری شده‌ی هر پارامتر در زمان و مکان مختلف می‌باشد
(Abbasi and Abbasi, 2012). برخی از شاخص‌ها از
دستورالعمل‌های استاندارد برای زیرشاخص‌سازی پارامترها استفاده
کرده‌اند (Abbasi and Abbasi, 2012; Liou *et al.*, 2004; Sutadian *et al.*, 2016). در حالی که برخی از شاخص‌ها مانند

2- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) WQI

3- Parameter concentrations

4- Linear interpolated functions

5- Rating curve functions

6- Horton index

7- Dinius index

8- Dalmatian index

9- Liou index

10- Said index

1- Sub-indexing

متغیرهای S_1 و S_2 در روابط (۱) و (۲) باتوجه به روش مورد استفاده به ترتیب برابر ۱۰۰ و صفر می‌باشد. به عبارتی حدود مقادیر پارامترهای کیفیت آب بعد از زیرشاخص‌سازی شدن بین صفر تا صد متغیر خواهد بود. مقادیر سایر متغیرهای مورد نیاز در روابط (۱) و (۲)، شامل X_1 ، X_2 و حد مجاز WHO، برای محاسبه مقادیر زیرشاخص‌سازی شده‌ی پارامترهای کیفیت آب (S_i) در جدول ۱ ارائه شده است.

وزندگی پارامترها

به طور کلی، وزن پارامترها بر اساس اهمیت نسبی پارامترهای کیفی یا بر طبق استانداردهای مناسب برآورد می‌شود. اکثر شاخص‌های کیفی توسعه داده شده برای پارامترهای مورد استفاده وزن‌هایی نابرابر و با مجموع برابر با یک در نظر گرفته‌اند (Sarkar and Abbasi, 2006). با توجه به تابع تجمیع به کار رفته برای محاسبه شاخص WQI، وزن مربوط به هر پارامتر کیفی تأثیر زیادی روی عدد نهایی محاسبه شده دارد. بر اساس نوع استفاده (شرب، کشاورزی، محیط‌زیست و ...) از شاخص کیفیت آب وزن‌های اختصاص داده شده به هر پارامتر متفاوت است. دو روش وزندگی یکی بر اساس نظرات کارشناسان و دیگری استفاده از تحلیل سلسله مراتبی^۵ (AHP) در توسعه بسیاری از شاخص‌های کیفیت آب استفاده شده است (Sarkar and Sutadian et al., 2017; Abbasi, 2006; Uddin et al., 2021).

در تحقیق حاضر به منظور تعیین وزن برای پارامترهای کیفیت آب از روش تجزیه به مولفه‌های اصلی^۶ (PCA) استفاده شده است. در این روش با در نظر گرفتن مقادیر میانگین بردارهای ویژه (α_i) مربوط به ۱۰ مولفه اصلی اول، بردار وزنی مربوط به پارامترهای کیفی i تا j (Ω_i) با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\Omega_i = \sum_{i=1}^j \lambda_i \alpha_i / P^{(j)} \quad (3)$$

$$P^{(j)} = \sum_{i=1}^j \lambda_i \quad (4)$$

در رابطه (۳)، λ_i واریانس مولفه اصلی i ام و $P^{(j)}$ واریانس تجمعی (رابطه ۴) تا مولفه اصلی j ام می‌باشد. وزن نهایی پارامترها با توجه به مقادیر محاسبه شده Ω_i برای هر پارامتر i محاسبه می‌شود (Casillas et al., 2021).

تغییر در مقادیر غلظت پارامترها از آنها به عنوان مقادیر مورد استفاده در محاسبه شاخص کیفیت آب استفاده کردند. همچنین شاخص‌هایی مانند شاخص کیفیت محیط‌زیست^۱ (EQI)، شاخص دریاچه بزرگ نیرشر^۲ (GLNI) و شاخص کیفیت آب رودخانه مالزی^۳ (MRWQI) از روش توابع منحنی رتبه‌بندی برای زیرشاخص‌سازی پارامترها در شاخص کیفیت مورد نظر استفاده کرده‌اند. مشابه شاخص‌های NSF-WQI و WJWQI^۴، در تحقیق حاضر از روش توابع میان‌یابی خطی به منظور زیرشاخص‌سازی پارامترهای کیفیت آب استفاده شده است (Uddin et al., 2021). جزئیات این روش در ادامه توضیح داده شده است.

توابع میان‌یابی خطی

مقیاس پارامترها در این روش در محدوده ۰ تا ۱۰۰ قرار می‌گیرند. هنگامی که مقدار غلظت پارامتر پایین‌تر از حد مجاز باشد مقدار ۱۰۰ و در غیر این صورت مقدار صفر به پارامتر اختصاص داده می‌شود (Lobato et al., 2015; Hoseinzadeh et al., 2015; Misaghi et al., 2017; Medeiros et al., 2017). در تحقیق حاضر بر اساس این طبقه‌بندی و مشابه با شاخص WJWQI از دو رابطه (۱) و (۲) برای مرحله زیرشاخص‌سازی پارامترها استفاده شده است.

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_i - X_1}{X_2 - X_1} \right) \right] \quad (1)$$

$$S_i = S_1 - \left[(S_1 - S_2) \left(\frac{X_1 - X_i}{X_1 - X_2} \right) \right] \quad (2)$$

در رابطه (۱) و (۲)، S_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده برای پارامتر کیفیت آب i ام محاسبه شده برای مقدار غلظت X_i ، S_1 و S_2 حداکثر و حداقل مقادیر زیرشاخص‌سازی شده برای مقادیر حداکثر (X_1) و حداقل (X_2) بر اساس راهنمای موردنظر می‌باشد. رابطه (۱) برای مقادیر اندازه‌گیری شده بالاتر از حد مجاز و رابطه (۲) برای مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر از حد مجاز استفاده می‌شود (Dunnette, 1979; Sutadian et al., 2016). با توجه به کاربرد شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر به منظور مصارف شرب، استاندارد شرب سازمان بهداشت جهانی (WHO) برای مشخص کردن مقادیر حداکثر و حداقل (X_1 و X_2) در روابط (۱) و (۲) استفاده شده است. مقادیر

1- Environmental Quality Index (EQI)

2- Great Lakes Nearshore index (GLNI)

3- Malaysia river WQI (MRWQI)

4- West Java WQI (WJWQI)

5- Analytic Hierarchy Process (AHP)

6- Principal Component Analysis (PCA)

جدول ۱- مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای کیفیت آب و حدود مجاز استاندارد WHO (Cotruvo, 2017)

Table 1- The maximum and minimum of water quality parameters and standard allowable threshold of WHO (Cotruvo, 2017)

پارامتر Parameters	واحد Unit	استاندارد WHO، ۲۰۱۷ WHO standard, 2017 حد مجاز Standard allowable threshold	ایستگاه رودبار Rudbar station		ایستگاه آستانه Astaneh station	
			حداقل Minimum (X ₂)	حداکثر Maximum (X ₁)	حداقل Minimum (X ₂)	حداکثر Maximum (X ₁)
TDS	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	1000	327	1920	137	1472
EC	میکروزیمنس بر سانتی متر (μS cm ⁻¹) ^۱	-	520	2861	130	2336
TH	میلی گرم بر لیتر CaCO ₃ mg L ⁻¹ of CaCO ₃	300	180	830	94	500
pH	-	6.5-8.5	5.7	8.6	6.4	11.5
Cl ⁻	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	250	14	737	5	553
SO ₄ ²⁻	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	500	16	800	10	354
CO ₃ ²⁻	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	-	0	9	0	15
HCO ₃ ⁻	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	120	66	659	79	409
Mg ²⁺	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	30	0	104	2	67
Na ⁺	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	200	15	421	3	360
Ca ²⁺	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	300	28	205	26	142
K ⁺	میلی گرم بر لیتر (mg L ⁻¹)	12	0	12	0	10

$(0 < w_i < 1)$ ، و Q_i مقدار پارامتر زیرشاخص سازی شده برای پارامترهای کیفی i ام، $(0 \leq Q_i \leq 100)$ می‌باشد (Rai et al., 2011; Uddin et al., 2021). طبقه مربوط به شاخص کیفی با توجه به عدد نهایی محاسبه شده برای شاخص WQI مطابق با جدول ۲ مشخص شده است.

طبقه‌بندی شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر (جدول ۲) مطابق با شاخص NSFQWI در نظر گرفته شده است. بر این اساس عدد صفر نشان‌دهنده بدترین کیفیت آب و هر چه این عدد به سمت ۱۰۰ بیشتر شود، بیانگر کیفیت مطلوب‌تر آب خواهد بود (Uddin et al., 2021). به منظور ارزیابی نتایج شاخص توسعه داده شده باید نتایج حاصل از آن با یک طبقه‌بندی یا شاخص کیفی دیگر مقایسه شود. در تحقیق حاضر نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با نتایج شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی^۴ (WQI_{WHO}) و طبقه‌بندی شولر مقایسه شده است.

تجمیع و ارزیابی شاخص

تجمیع شاخص کیفی آخرین مرحله از توسعه یک شاخص می‌باشد. در این مرحله با استفاده از پارامترهای زیرشاخص سازی شده و وزن‌های مربوط به هر پارامتر، یک عدد به عنوان امتیازی برای کیفیت آب بدست می‌آید. تابع تجمیع شاخص کیفی می‌تواند به صورت توابع جمع‌پذیر^۱، ضرب‌پذیر^۲ و یا ترکیبی^۳ از این دو تابع باشد (Sutadian et al., 2016). در تحقیق حاضر مشابه با شاخص‌هایی مانند هورتون و NSFQWI از تابع جمع‌پذیر برای تجمیع شاخص کیفی مطابق با رابطه (۵) استفاده شده است.

$$SDWQI = \sum_{i=1}^n w_i Q_i \quad (5)$$

در رابطه (۵)، SDWQI شاخص کیفی محاسبه شده در $(0 \leq SDWQI \leq 100)$ ، w_i وزن مربوط به پارامتر کیفی i ام

4- Water Quality Index World Health Organization (WQI_{WHO})

1 Additive functions
2 Multiplicative functions
3 Combination functions

جدول ۲- طبقه‌بندی کیفیت آب بر اساس مقدار شاخص محاسبه شده (Uddin et al., 2021)
 Table 2- Water Quality classification based on value of calculated index (Uddin et al., 2021)

کلاس کیفیت	خیلی بد	بد	متوسط	خوب	عالی
Class of quality	Very bad	Bad	Medium	Good	Excellent
حدود شاخص کیفیت	0 - 24	25 - 49	50 - 69	70 - 89	90 - 100
Boundary of quality index					

جدول ۳- دسته‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس طبقه‌بندی شولر (Schoeller, 1965; Babanezhad et al., 2018)
 Table 3- Schoeller classification for drinking water quality (Schoeller, 1965; Babanezhad et al., 2018)

رتبه	کلاس	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	TDS	TH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Rank	class								
1	خوب Good	<100	<25	<120	<522	<262	<184	<145	<182
2	قابل قبول Permissible	100-198	25-49	120-238	522-1003	262-517	184-362	145-288	182-358
3	نسبتاً مناسب Moderately suitable	198-384	49-95	238-456	1003-1996	517-996	362-700	288-590	358-737
4	نامناسب Unsuitable	384-770	95-194	456-928	1996-4050	996-2010	700-1420	590-1198	737-1495
۵	کاملاً نامناسب Quite unsuitable	770-2500	194-387	928-1886	4050-8100	2010-4010	1420-2830	1198-2385	1495-2955
6	غیر قابل شرب Non drinking	>2500	>387	>1886	>8100	>4010	>2830	>2385	>2955

* واحد تمامی پارامترهای کیفیت آب بر حسب میلی گرم در لیتر می‌باشد.

شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WQI_{WHO})

کیفیت و درجه تناسب آب جهت مصارف شرب می‌تواند با استفاده از یک شاخص کیفی مشخص شود. در برخی از شاخص‌های کیفیت آب، استانداردهای شرب مانند استاندارد شرب WHO، به عنوان یک دستورالعمل حدود مجاز مورد استفاده قرار می‌گیرند (Varol and Adimalla et al., 2018; Yadav et al., 2015; Davraz, 2015; Verma et al., 2020). حدود مجاز و وزن‌های برخی از پارامترهای کیفیت آب جهت مصارف شرب بر اساس استاندارد WHO, 2017 در جدول ۴ ارائه شده است.

وزن مطلق (w_i) پارامترها در جدول ۴ بر اساس درجه اهمیت هر پارامتر به منظور مصارف شرب عددی بین ۱ تا ۵ اختصاص داده می‌شود. حداکثر وزن مطلق پارامترها با توجه به اهمیت زیاد آنها در کیفیت آب شرب به پارامترهای TDS، Cl⁻، SO₄²⁻ و NO₃⁻ برابر ۵ و حداقل آن به پارامتر HCO₃⁻ و برابر یک، اختصاص داده شده است (Tiwari et al., 2018; Vasanthavigar et al., 2010). وزن نسبی (W_i) پارامترها در جدول ۴ با استفاده از نسبت وزن مطلق هر پارامتر تقسیم بر مجموع وزن کل پارامترها (رابطه ۶) محاسبه می‌شود.

دلایل انتخاب طبقه‌بندی شولر جهت اعتبارسنجی نتایج شاخص تحقیق حاضر شامل الف) معتبر بودن و کاربرد بسیار زیاد طبقه‌بندی شولر در تحقیقات گذشته جهت مصارف آب شرب، ب) یکسان بودن پارامترهای کیفیت آب مورد استفاده در شاخص تحقیق حاضر و طبقه‌بندی شولر و ج) عدم نیاز به محاسبات جدید برای طبقه‌بندی شولر و وجود دسته‌بندی جدول و نموداری برای آن می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی مقادیر شاخص تحقیق حاضر، کلاس کیفیت تشخیص داده شده با استفاده از این شاخص با طبقه بدست آمده از طبقه‌بندی شولر مقایسه شده است. طبقه‌بندی شولر اولین بار در سال ۱۹۶۵ به منظور ارزیابی کیفیت آب به منظور مصارف شرب انجام شده است (Schoeller 1965, 1967). این طبقه‌بندی بر اساس ۸ پارامتر کلسیم، منیزیم، سدیم، سولفات، کلر، بی‌کربنات، سختی کل و کل مواد جامد محلول مطابق جدول ۳ طبقه‌بندی می‌شود.

جهت اعتبارسنجی شاخص کیفیت آب توسعه داده شده در تحقیق حاضر برای کل ماه‌های نمونه‌برداری (۳۷۲ ماه) کلاس کیفیت آب بر اساس شاخص و طبقه‌بندی شولر مشخص و با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۴- وزن و حدود مجاز پارامترهای کیفیت آب در شاخص شرب WHO (Jesuraja et al., 2021)

Table 4- Weight and threshold of water quality parameters in drinking WHO index (Jesuraja et al., 2021)

پارامتر Parameter	وزن مطلق Absolute weight (w _i)	وزن نسبی Relative weight (W _i)	حد مجاز WHO, 2017 Threshold of WHO, 2017 (mg L ⁻¹)
pH	3	0.083	8.5
TDS	5	0.139	500
HCO ₃ ⁻	1	0.028	300
Cl ⁻	5	0.139	250
SO ₄ ²⁻	5	0.139	400
NO ₃ ⁻	5	0.139	45
Ca ²⁺	3	0.083	75
Mg ²⁺	3	0.083	50
Na ⁺	4	0.111	200
K ⁺	2	0.056	10
مجموع	36	1	-

جدول ۵- طبقه‌بندی کیفیت آب شرب بر اساس مقدار شاخص WQI_{WHO} (Jesuraja et al., 2021)

Table 5- Water Quality classification based on WQI_{WHO} (Jesuraja et al., 2021)

کلاس کیفیت Quality class	عالی Excellent	خوب Good	ضعیف Fair	خیلی ضعیف Very Fair	غیرقابل شرب Non drinking
حدود شاخص کیفیت Threshold of quality index	< 50	50 - 100	100 - 200	200 - 300	> 300

ادامه نتایج چهار مرحله توسعه شاخص (انتخاب پارامترها، زیرشاخص‌سازی، وزن‌دهی و تجمیع شاخص) ارائه شده است. در انتهای بخش نتایج ارزیابی نتایج شاخص توسعه داده شده ارائه شده است.

پیش پردازش داده‌ها

بررسی محدوده تغییرات پارامترهای کیفی به منظور تعیین تغییرات کلی مقادیر پارامترها در ۳۴ سال آمار مورد مطالعه (۱۳۶۶-۱۳۹۹) انجام شده است. نمودار ویولن^۱ برای ۱۲ پارامتر کیفیت آب مورد بررسی در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه در شکل ۳ نشان داده شده است.

شکل ۳ بیانگر بالاتر بودن میانه مقادیر متغیرهای EC، TDS، TH، کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه می‌باشد. دلیل بالاتر بودن مقادیر این متغیرها در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه می‌تواند عوامل مختلفی مانند اثرات دریاچه سد سفیدرود (حلالیت، لایه‌بندی حرارتی، تغذیه‌گرایی و ...) روی متغیرهای کیفیت آب در ایستگاه رودبار (بعد از سد) و یا اضافه‌شدن شاخه‌های فرعی (توتکابن، رشته‌رود، ذیلکی‌رود و ...) به رودخانه سفیدرود در پایین‌دست ایستگاه رودبار و در نتیجه بهبود متغیرهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه باشد.

1- Violin plot

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i \quad (۶)$$

در رابطه (۶)، W_i و w_i به ترتیب وزن نسبی و وزن مطلق پارامتر کیفی i ام و n تعداد کل پارامترهای کیفی می‌باشد. مقادیر پارامترهای کیفی به منظور محاسبه شاخص WHO با استفاده از رابطه (۷) زیرشاخص‌سازی می‌شوند.

$$q_i = C_i / S_i \times 100 \quad (۷)$$

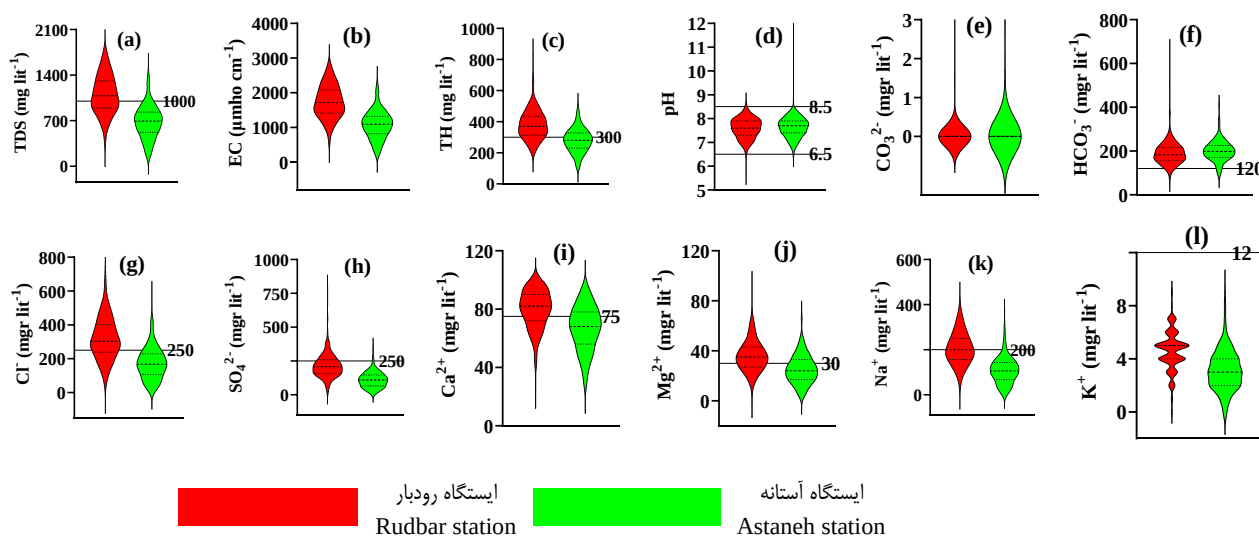
در رابطه (۷)، q_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده پارامتر i ام، C_i غلظت هر پارامتر در نمونه و S_i مقدار مجاز هر پارامتر بر اساس استاندارد شرب WHO به میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. در مرحله آخر مقدار شاخص WQI_{WHO} از مجموع حاصل ضرب وزن نسبی هر پارامتر در مقدار زیرشاخص‌سازی شده‌ی آن محاسبه می‌شود (رابطه ۸).

$$WQI_{WHO} = \sum_{i=1}^n w_i q_i \quad (۸)$$

در رابطه (۸) w_i وزن نسبی هر پارامتر i ام، q_i مقدار زیرشاخص‌سازی شده‌ی پارامتر و WQI_{WHO} مقدار محاسبه شده شاخص کیفی برای هر نمونه آب می‌باشد. دسته کیفیت آب بر اساس مقدار شاخص WQI_{WHO} بر اساس جدول ۵ می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج تحقیق حاضر بر اساس مراحل شرح داده شده در بخش مواد و روش‌ها (شکل ۱) ارائه شده است. بر این اساس ابتدا نتایج پردازش داده‌ها (حدود تغییرات، ضریب همبستگی و خوشه‌بندی) و در



شکل ۳- حدود پارامترهای کیفیت آب ماهانه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه (۱۳۶۶-۹۹)
Figure 3- Variation of monthly water quality parameters measured in Rudbar and Astaneh stations (1987- 2017)

جدول ۶- مقادیر و معنی‌داری ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای کیفیت آب ایستگاه‌های رودبار (الف) و آستانه (ب)
Table 6- Pearson correlation coefficient and significant level between water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

الف-رودبار A- Ru dba r	TDS	EC	TH	pH	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺
TDS	1											
EC	**	1										
TH	**	**	1									
pH	ns	ns	ns	1								
CO ₃ ⁻²	ns	ns	ns	*	1							
HCO ₃ ⁻	*	*	*	ns	ns	1						
Cl ⁻	**	**	**	ns	ns	*	1					
SO ₄ ⁻²	*	*	*	ns	ns	ns	ns	1				
Ca ⁺²	**	**	**	ns	ns	*	*	*	1			
Mg ⁺²	**	**	**	ns	ns	*	*	*	*	1		
Na ⁺	**	**	*	ns	ns	*	**	*	*	*	1	
K ⁺	*	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	*	1

ب-آستانه b- Asta neh	TDS	EC	TH	pH	CO ₃ ⁻²	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺
TDS	1											
EC	**	1										
TH	**	**	1									
pH	ns	ns	ns	1								
CO ₃ ⁻²	ns	ns	ns	*	1							
HCO ₃ ⁻	*	*	*	ns	ns	1						
Cl ⁻	**	**	**	ns	ns	*	1					
SO ₄ ⁻²	**	**	**	ns	ns	*	**	1				
Ca ⁺²	**	**	**	ns	ns	*	*	*	1			
Mg ⁺²	**	**	**	ns	ns	*	**	*	*	1		
Na ⁺	**	**	**	ns	ns	*	**	*	*	*	1	
K ⁺	*	*	*	ns	ns	ns	*	*	*	*	*	1

ضریب همبستگی پیرسون Pearson correlation coefficient (Color) رنگ	-0.1- 0.0	0.0- 0.2	0.2- 0.4	0.4- 0.6	0.6- 0.8	0.8- 0.9	0.9- 1.0
---	-----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

سطوح معنی‌داری همبستگی
Significant level
ns, * and ** are non-significant, and significant at 5% and 1%, respectively.

گرفته است. این در حالی است که در ایستگاه آستانه تنها مقادیر بی‌کربنات (شکل ۳f) بالاتر از مقدار مجاز قرار دارد و در مورد سایر پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه شامل TDS، pH، کلر، سولفات و سدیم، ۷۵ درصد داده‌ها (چارک سوم) کمتر از

بر اساس شکل ۳ بیشتر از ۵۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای کیفی شامل TDS، TH، بی‌کربنات، کلر، کلسیم و منیزیم در ایستگاه رودبار فراتر از حد مجاز استاندارد WHO (جدول ۱) قرار دارند. به عبارتی میانه‌ی این پارامترها بالاتر از حد مجاز قرار

حد مجاز می‌باشد.

ماتریس همبستگی

بررسی همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب به منظور مشخص کردن ارتباط بین انواع پارامترها انجام می‌شود. جدول ۶، مقادیر همبستگی بین این متغیرها را در دو ایستگاه هیدرومتری رودبار و آستانه نشان می‌دهد.

بر اساس جدول ۶، از بین ۱۱ متغیر کیفیت آب مورد بررسی دو پارامتر pH و CO_3^{2-} کمترین مقادیر ضریب همبستگی را با سایر متغیرهای کیفی دارند، به نحوی که این دو متغیر تنها با یکدیگر مقدار همبستگی معنی‌داری در سطح پنج درصد دارند. از طرف دیگر بیشتر همبستگی بین متغیرهای TDS و EC با سایر متغیرهای کیفی مورد بررسی وجود دارد به نحوی که این دو متغیر با تمامی متغیرها به جزء pH و CO_3^{2-} ضریب همبستگی معنی‌داری در سطح یک یا پنج درصد دارند. همچنین بالاترین ضریب همبستگی پیرسون در بین متغیرهای مورد بررسی مربوط به دو پارامتر TDS و EC و برابر ۰/۹۹ برای هر دو ایستگاه رودبار و آستانه است. بین دو ایستگاه رودبار و آستانه تفاوت در برخی مقادیر ضریب همبستگی بین متغیرهای یکسان زیاد است. به عنوان نمونه مقدار همبستگی بین سولفات و کلر در ایستگاه رودبار برابر ۰/۰۷ و غیرمعنی‌دار و در ایستگاه آستانه برابر ۰/۶۸ و معنی‌دار در سطح یک درصد می‌باشد. مشابه این تفاوت‌ها در مقادیر ضریب همبستگی بین متغیرهای پتاسیم-منیزیم و پتاسیم-کلسیم نیز مشاهده می‌شود که در ایستگاه رودبار رابطه‌ای غیرمعنی‌دار و در ایستگاه آستانه معنی‌داری در سطح پنج درصد دارند.

خوشه‌بندی^۱

هدف از خوشه‌بندی پارامترهای کیفیت آب، ارزیابی و دسته‌بندی پارامترهای کیفیت آب به لحاظ مشابهت‌های بین آنها می‌باشد. در تحقیق حاضر به منظور خوشه‌بندی ۱۲ پارامتر کیفیت آب از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی^۲ (AHC) استفاده شده است. در این روش با استفاده از مشابهت^۳ پارامترهای کیفیت آب از لحاظ ضریب همبستگی پیرسون خوشه‌بندی انجام شده است. دندروگرام حاصل از خوشه‌بندی پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار و آستانه در شکل ۴ نشان داده شده است.

تعداد خوشه‌ها در نمودار دندروگرام با توجه به موقعیت برش^۴ شاخه‌های دندروگرام بستگی دارد. به عنوان مثال اگر جهت تعیین تعداد خوشه‌ها در شکل ۴، مقدار مشابهت ضریب همبستگی پیرسون برابر با ۰/۸۰ در نظر گرفته شود، هشت خوشه برای ۱۲ پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشخص می‌شود. بر این اساس در ایستگاه رودبار (شکل ۴-الف)، پارامترهای EC، TDS، Cl^- و Na^+ در خوشه ۱، Ca^{2+} و TH در خوشه ۲ و سایر پارامترها شامل Mg^{2+} ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، K^+ ، CO_3^{2-} و pH هر کدام در خوشه‌های ۳ تا ۸ قرار می‌گیرند. همچنین در ایستگاه آستانه (شکل ۴-ب)، پارامترهای EC، TDS، Cl^- و Na^+ در خوشه ۱ و سایر پارامترها شامل Ca^{2+} ، Mg^{2+} ، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، K^+ و CO_3^{2-} هر کدام در خوشه‌های ۲ تا ۸ قرار می‌گیرند. این خوشه‌بندی بیانگر نتایج همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب (جدول ۶) می‌باشد.

انتخاب پارامترهای شاخص

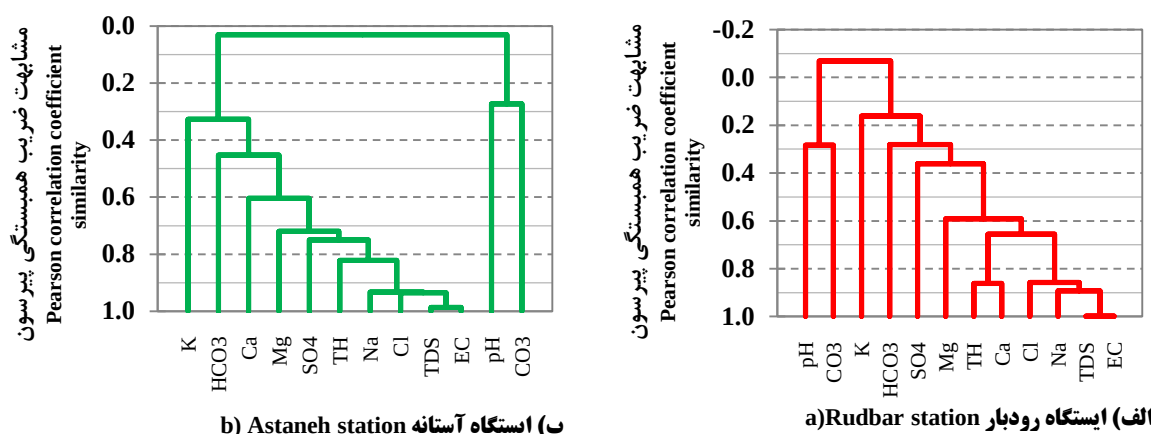
در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل همبستگی و روش‌های چندمتغیره آماری شامل خوشه‌بندی و PCA پارامترهای مورد استفاده در شاخص معرفی شده، انتخاب شده است. در پیش‌پردازش اولیه داده‌های کیفیت آب مشخص شد که اکثر مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامتر CO_3^{2-} برابر صفر ثبت شده است. به طوری که از ۳۷۲ داده اندازه‌گیری شده از پارامتر کربنات، ۳۵۸ داده (۹۶ درصد) در ایستگاه رودبار و ۳۵۰ داده (۹۴ درصد) در ایستگاه آستانه برابر صفر ثبت شده است (شکل ۳e). به این ترتیب به دلیل صفر بودن مقدار پارامتر کربنات در اکثر ماه‌های اندازه‌گیری شده، این پارامتر از پارامترهای مورد استفاده در شاخص حذف شد.

1- Clustering

2- Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC)

3- Similarity

4- Truncation



b) ایستگاه آستانه

a) ایستگاه رودبار

شکل ۴- دندروگرام پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار (الف) و آستانه (ب)

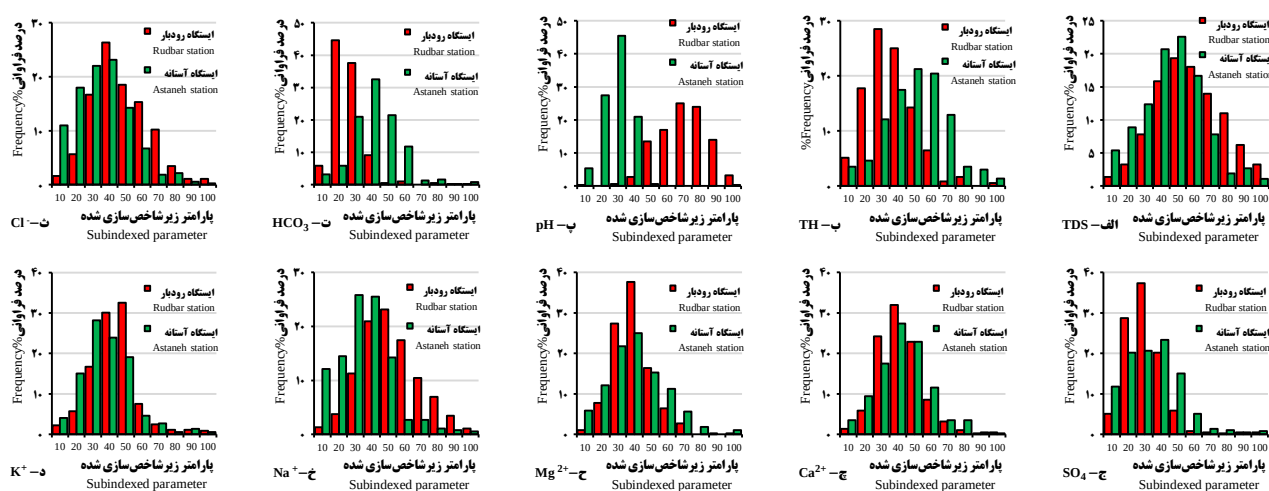
Figure 4- Dendrogram of water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

سولفات (SO_4^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+}) و پتاسیم (K^+) می‌باشد.

زیرشاخص‌سازی پارامترها

زیرشاخص‌سازی برای ۱۰ پارامتر کیفی انتخاب شده با استفاده از روابط (۱ و ۲) انجام شده است. بر این اساس مقادیر پارامترها به عددی بی‌بعد بین صفر تا ۱۰۰ تبدیل می‌شود تا هم‌زمان اثر واحدها و دامنه تغییرات متفاوت پارامترها در مقدار شاخص کیفی اثرگذار نباشد. فراوانی پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه پس از مرحله زیرشاخص‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.

همچنین با توجه به همبستگی بالای بین پارامترهای TDS و EC (ضریب همبستگی پیرسون حدود ۹۹ درصد) و قرار گرفتن این دو پارامتر در یک خوشه (شکل ۴)، از بین دو پارامتر TDS به دلیل مهم‌تر بودن جهت مصارف شرب (قرار داشتن جزء پارامترهای استاندارد WHO) و قرار داشتن در اکثر شاخص‌های کیفی به عنوان اولین پارامتر شاخص انتخاب شد. با توجه به هدف استفاده حداکثری از داده‌های اندازه‌گیری شده و لحاظ تمام پارامترهای موثر جهت مصارف شرب در شاخص توسعه داده شده، سایر پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در توسعه شاخص کیفی تحقیق حاضر استفاده شده است. به عبارتی پارامترهای انتخاب شده جهت توسعه شاخص کیفیت آب تحقیق حاضر دارای ۱۰ پارامتر کیفیت آب شامل کل مواد جامد محلول (TDS)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-).



شکل ۵- فراوانی مقادیر پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه پس از مرحله زیرشاخص‌سازی

Figure 5- Frequency of water quality parameters in Rudbar and Astaneh stations after sub-indexing step

جدول ۷- مقادیر بردار ویژه، سهم پارامترها و ضریب امتیاز مولفه‌های اصلی ۱ و ۲ پارامترهای کیفی

Table 7- Eigenvectors, contribution and scores of quality parameters principal components 1 and 2

پارامتر Parameter	ایستگاه رودبار Rudbar st.		ایستگاه آستانه Astaneh st.		ایستگاه رودبار Rudbar st.		ایستگاه آستانه Astaneh st.		ایستگاه رودبار Rudbar st.		ایستگاه آستانه Astaneh st.	
	بردار ویژه Eigenvector		بردار ویژه Eigenvector		سهم پارامترها Contribution		سهم پارامترها Contribution		ضریب امتیاز Score		ضریب امتیاز Score	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
TDS	0.41	0.05	0.38	-0.01	16.5	0.2	14.2	0.0	0.17	0.05	0.14	-0.01
EC	0.41	0.06	0.37	-0.01	16.5	0.2	13.9	0.0	0.17	0.05	0.14	0.00
TH	0.37	-0.07	0.36	-0.01	13.8	0.6	12.8	0.0	0.15	-0.06	0.14	-0.01
pH	-0.05	0.43	0.02	0.69	0.2	18.5	0.0	48.0	-0.02	0.37	-0.01	0.61
CO ₃ ²⁻	-0.05	0.32	0.01	0.71	0.2	10.4	0.0	49.8	-0.02	0.28	-0.01	0.62
HCO ₃ ⁻	0.17	-0.50	0.22	-0.03	2.9	25.1	4.7	0.0	0.07	-0.43	0.08	-0.02
Cl ⁻	0.35	-0.10	0.35	-0.07	12.5	1.0	12.5	0.2	0.15	-0.09	0.14	0.05
SO ₄ ²⁻	0.19	0.52	0.31	0.10	3.8	27.2	9.7	1.4	0.08	0.45	0.12	0.09
Ca ²⁺	0.32	0.03	0.28	-0.06	10.5	0.1	8.0	0.2	0.13	0.03	0.11	-0.05
Mg ²⁺	0.31	-0.15	0.30	0.04	9.4	2.5	9.2	0.3	0.13	-0.13	0.11	0.04
Na ⁺	0.35	0.10	0.35	-0.01	12.5	0.9	12.2	0.0	0.15	0.09	0.13	-0.01
K ⁺	0.11	0.36	0.17	-0.01	1.3	13.2	2.8	0.0	0.05	0.31	0.06	-0.01

فاکتورهای اصلی ۱^۳ و ۲ برای پارامترهای کیفی ایستگاه‌های رودبار و آستانه در جدول ۷ ارائه شده است.

مقادیر بردار ویژه در جدول ۷ نشان‌دهنده مهم‌تر بودن پارامترهای کیفیت آب در هر مولفه اصلی می‌باشد. در مولفه‌های اصلی اول (D1) ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب مربوط به پارامترهای TDS، EC، TH، Cl⁻ و Na⁺ می‌باشد. با توجه به متعامد بودن مولفه‌های اصلی یک (D1) و دو (D2)، مقادیر بردارهای ویژه دو پارامتر pH و CO₃²⁻ که در مولفه D1 حداقل می‌باشد در مولفه D2 برای هر دو ایستگاه نسبت به سایر پارامترهای کیفی بیشتر می‌باشد. سهم پارامترها در حقیقت نشان‌دهنده درصد پوشش هر پارامتر از واریانس کل پارامترها در هر مولفه اصلی می‌باشد. در مولفه اصلی اول پارامتر TDS در ایستگاه رودبار و آستانه به ترتیب با سهم ۱۶/۵ و ۱۴/۲ درصد بیشترین سهم از پوشش واریانس کل پارامترها را دارد. همچنین در مولفه اصلی دوم سهم پارامترهای pH و CO₃²⁻ نسبت به سایر پارامترها بیشتر می‌باشد.

ضریب امتیاز مولفه‌ها در حقیقت بیانگر ضریب هر یک از پارامترهای کیفیت آب در هر مولفه می‌باشد. به این ترتیب مولفه اصلی اول در هر دو ایستگاه شامل پارامترهای TDS، EC، TH، Cl⁻ و Na⁺ می‌باشد. پارامترهای موثر در مولفه اصلی دوم در دو ایستگاه رودبار و آستانه متفاوت است.

توزیع اکثر پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی در شکل ۵ در ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشابه یکدیگر می‌باشند. البته تفاوت نسبتاً زیادی در توزیع پارامترهای TH (شکل ۵-ب)، pH (شکل ۵-پ) و HCO₃⁻ (شکل ۵-ت) بین ایستگاه‌های رودبار و آستانه مشخص می‌باشد. به طوری که حدود ۹۷ مقادیر زیرشاخص‌سازی شده پارامتر pH در ایستگاه رودبار بیشتر از ۵۰ می‌باشد، اما حدود ۹۹ درصد مقادیر این پارامتر در ایستگاه آستانه کمتر از ۵۰ می‌باشد. علت تفاوت بسیار زیاد توزیع داده‌های پارامتر pH در دو ایستگاه رودبار و آستانه، مقدار ماکزیمم برابر ۱۱/۵ (متغیر X₁ برای پارامتر pH) در ایستگاه آستانه می‌باشد. چون این عدد بزرگ باعث بزرگ شدن مخرج کسر در روابط (۱) و (۲) شده و در نتیجه کوچکتر شدن مقدار زیرشاخص‌سازی شده پارامتر می‌شود. در مورد پارامترهای TH و HCO₃⁻ نیز مقدار حداکثر اندازه‌گیری شده این پارامترها در ایستگاه رودبار (جدول ۱) نیز باعث کوچک شدن مقادیر زیرشاخص‌سازی شده‌ی این پارامترها در ایستگاه رودبار نسبت به ایستگاه آستانه شده است.

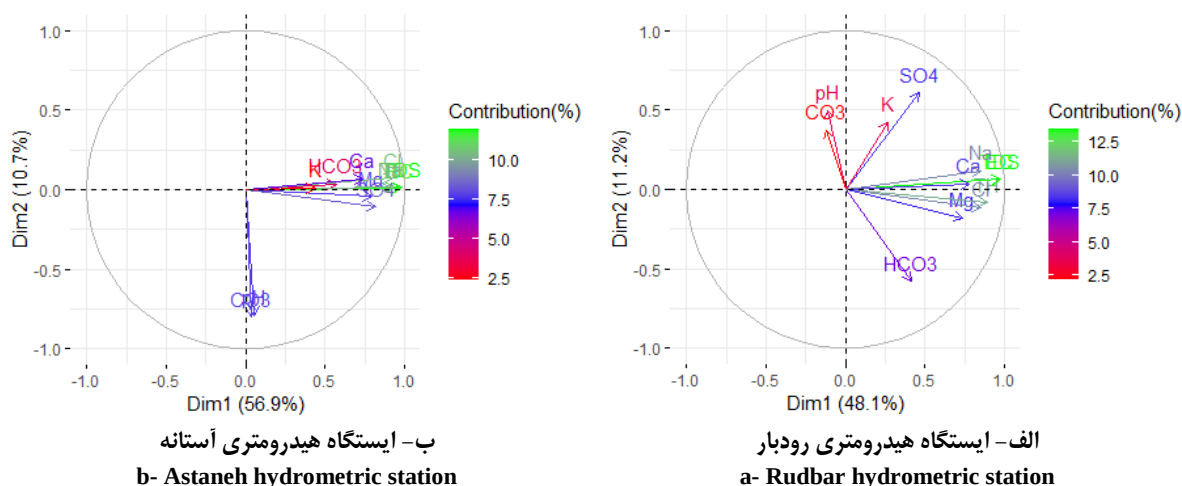
تعیین وزن پارامترها

به منظور محاسبه وزن مربوط به پارامترهای کیفیت آب انتخاب شده از روش PCA استفاده شده است. با وجود حذف دو پارامتر EC و CO₃²⁻ در مرحله انتخاب پارامترها، به منظور بررسی جامع، هر ۱۲ پارامتر کیفیت آب نیز در این مرحله مورد تحلیل قرار گرفته است. جدول مربوط به بردار ویژه^۱، سهم پارامترها^۲ و ضریب امتیاز

1- Eigen vectors

2- Contribution of the variables

3- Component score coefficients



شکل ۶- نمودار تجزیه به مولفه‌های اصلی پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار (الف) و آستانه (ب)
Figure 6- Principal component analysis of water quality parameters in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

پارامترهای کیفی است. به عبارتی هر چه این زاویه کوچکتر باشد، همبستگی بین پارامترها بیشتر می‌باشد. کوچک‌تر بودن زاویه بین پارامترها در ایستگاه آستانه (شکل ۶-ب) نسبت به ایستگاه رودبار (شکل ۶-الف) نشان‌دهنده همبستگی بیشتر پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه می‌باشد. جدول ۸ وزن‌های محاسبه شده برای پارامترهای کیفی انتخاب شده برای توسعه شاخص کیفی تحقیق حاضر را بر اساس رابطه (۳) نشان می‌دهد.

محاسبات شاخص و اعتبارسنجی

به منظور ارزیابی نتایج شاخص کیفی توسعه داده شده، نتایج شاخص تحقیق حاضر با شاخص کیفیت آب شرب سازمان بهداشت جهانی (WQI_{WHO}) و طبقه‌بندی شرب شولر مقایسه شده است. شکل ۷ فراوانی (درصد از ۳۷۲ داده کیفیت آب اندازه‌گیری شده) دسته‌بندی شاخص کیفیت آب قرار گرفته در دسته‌های عالی تا بسیار بد (جدول ۲) را برای سه شاخص شامل شاخص جدید توسعه داده شده، شاخص WQI_{WHO} و دسته‌بندی شولر نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۷-الف) بر اساس شاخص WQI_{WHO} ، ۹۸/۴ درصد از نمونه‌های کیفیت آب ایستگاه رودبار در دسته‌های خوب و متوسط قرار می‌گیرد. درصد نمونه‌های این دو دسته برای شاخص جدید توسعه داده شده و دسته‌بندی شولر به ترتیب برابر ۸۰/۴ و ۹۷/۶ درصد می‌باشد. بیشترین تفاوت بین فراوانی دسته‌های مختلف بین شاخص‌ها در ایستگاه رودبار (شکل ۷-الف) در دسته کیفیت بد و به ترتیب برابر ۱/۳، ۱۸/۸ و ۱/۹ درصد برای شاخص WQI_{WHO} ، شاخص جدید و دسته‌بندی شولر اتفاق افتاده است. بیشترین درصد کیفیت نمونه‌های آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) در دسته خوب برای برای شاخص WQI_{WHO} ، شاخص جدید و دسته‌بندی

به طوری که در مولفه اصلی دوم ایستگاه پارامترهای CO_3^{2-} ، pH، SO_4^{2-} ، HCO_3^- ، K^+ دارای ضرایب بزرگتری نسبت به سایر پارامترها و در مولفه اصلی دوم ایستگاه آستانه ضرایب پارامترهای pH و CO_3^{2-} نسبت به سایر پارامترها بیشتر می‌باشند. شکل ۶ نمودار دوگانه^۱ پارامترهای کیفیت آب در دو ایستگاه رودبار و آستانه را نشان می‌دهد.

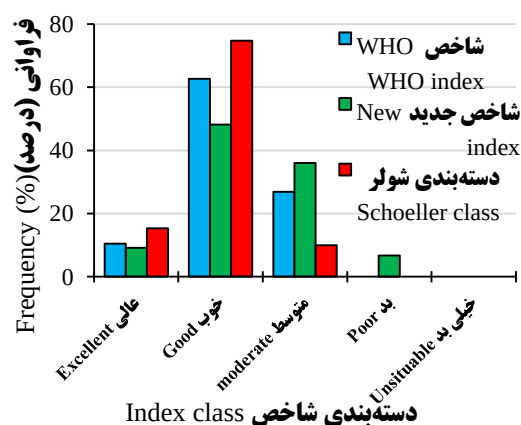
طول بردارها در شکل ۶ بیانگر سهم مشارکت هر یک از پارامترهای کیفیت آب در پوشش واریانس کل پارامترها می‌باشد. بزرگتر بودن طول این بردار نشان‌دهنده سهم و اثر بیشتر آن پارامتر در بین کل پارامترهای مورد بررسی است. شکل ۶ بیانگر سهم حداکثری پارامتر TDS در هر دو ایستگاه رودبار و آستانه نسبت به سایر پارامترهای کیفی می‌باشد. همچنین پارامترهای pH، CO_3^{2-} و K^+ کمترین سهم را در پوشش واریانس کل تغییرات پارامترهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های رودبار و آستانه از خود نشان می‌دهند. مجموع درصد پوشش واریانس کل پارامترهای مورد بررسی در مولفه‌های اصلی اول و دوم ایستگاه‌های رودبار و آستانه به ترتیب برابر ۵۹/۳ درصد (شکل ۶-الف) و ۶۷/۶ درصد (شکل ۶-الف) می‌باشد. این نکته بیانگر پوشش بیشتر مولفه‌های اصلی اول و دوم در ایستگاه آستانه نسبت به ایستگاه رودبار می‌باشد. به عبارتی با توجه به همبستگی قوی‌تر بین پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه نسبت به ایستگاه رودبار، مولفه‌های اصلی قادرند رابطه خطی قوی‌تری بین پارامترهای کیفیت آب در ایستگاه آستانه نسبت به رودبار برقرار سازند. در شکل ۶ کسینوس زاویه بین بردارها بیانگر همبستگی بین

شولر به ترتیب برابر ۶۲/۶، ۴۸/۱ و ۷۴/۷ درصد قرار گرفته است. درصد نمونه‌های دسته کیفیت آب متوسط در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) بر اساس شاخص WHO، شاخص جدید و دسته‌بندی شولر به ترتیب برابر ۲۶/۹، ۳۶/۰ و ۹/۹ درصد می‌باشد. نتایج حاصل از شکل ۷ حاکی از سخت‌گیرتر بودن شاخص جدید توسعه داده شده نسبت به شاخص WHO و دسته‌بندی شولر می‌باشد. به عبارتی دسته کیفیت آب در شاخص جدید توسعه داده شده نسبت به شاخص WHO و دسته‌بندی شولر در دسته نامناسب‌تری به لحاظ مصارف شرب قرار می‌گیرد. به طوری که بیشترین تفاوت فراوانی نمونه‌های قرار گرفته در دو ایستگاه رودبار و آستانه در دسته کیفیت بد می‌باشد. به عنوان مثال در ایستگاه آستانه (شکل ۷-ب) از ۳۷۲ نمونه مورد بررسی، در حالی که بر اساس شاخص WHO و دسته‌بندی شولر هیچ نمونه‌ای در این دسته قرار نگرفته است، اما بر اساس شاخص جدید ۲۵ نمونه (۶/۷ درصد) جزء کلاس کیفیت بد لحاظ شده است.

جدول ۸- وزن محاسبه شده برای پارامترهای کیفیت آب با استفاده از روش PCA

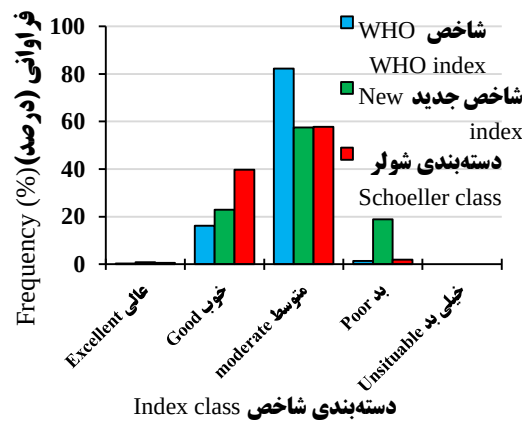
Table 8- The calculated weights for water quality parameters using PCA method

پارامتر کیفیت آب منتخب Selected water quality parameter	TDS	TH	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
میانگین بردارهای ویژه (α_i) Average of Eigenvectors	0.38	0.36	0.19	0.12	0.35	0.31	0.28	0.30	0.35	0.11
واریانس مولفه اصلی (λ_i) Variance of PC	14.32	13.85	2.24	1.71	12.45	9.80	9.95	9.20	12.15	2.82
واریانس تجمعی ($P^{(j)}$) Accumulated variance	33.10	34.95	6.27	4.25	32.59	39.71	27.57	27.40	31.97	9.98
وزن محاسبه شده (Ω_i) Calculated weight	0.163	0.142	0.068	0.048	0.135	0.077	0.102	0.102	0.133	0.031



Index class دسته‌بندی شاخص

b- Astaneh Station ایستگاه آستانه (ب)



Index class دسته‌بندی شاخص

a- Rudbar Station ایستگاه رودبار (الف)

شکل ۷- فراوانی طبقات شاخص‌های کیفیت آب در ایستگاه رودبار (الف) و آستانه (ب)

Figure 7- The frequency of water quality indices class in Rudbar (a) and Astaneh (b) stations

این مسئله اهمیت انتخاب روشی مناسب مانند استفاده از روش‌های غیرقطعی (فازی) و هوشمند (ماشین یادگیری) به منظور زیرشاخص‌سازی پارامترها را نشان می‌دهد. وزن‌دهی پارامترها نیز با توجه به نوع تابع تجمیع به کار رفته اثر زیادی روی نتایج شاخص کیفیت آب دارد. روش ساده‌ی مورد استفاده در شاخص WHO برای وزن‌دهی به پارامترها از معایب این شاخص می‌باشد. به منظور وزن‌دهی موثرتر به پارامترها باید از روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی، تحلیل فاکتور و تجزیه به مولفه‌های اصلی بهره گرفت. به طور کلی مقایسه شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص WHO (Cotruvo, 2017) و دسته‌بندی شولر (Schoeller, 1965) نشان‌دهنده سخت‌گیری بیشتر شاخص جدید در دسته‌بندی کیفیت آب جهت مصارف شرب است. هر شاخص کیفیت آب توسعه داده شده به منظور ارزیابی عدم قطعیت و نتایج حاصل از آن، باید در مورد داده‌هایی با مشخصات مختلف از لحاظ دامنه تغییرات با مقادیر حدی (حداقل و حداکثر) متفاوت مورد آزمون قرار داده شود. شاخص توسعه داده شده در تحقیق حاضر نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد و به منظور ارزیابی بهتر نتایج حاصل از آن پیشنهاد می‌شود با داده‌های سایر ایستگاه‌های هیدرومتری مورد ارزیابی و تحلیل قرار گیرد. حذف پارامتر کربنات به دلیل صفر بودن مقدار این پارامتر در اکثر ماه‌های اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه مورد مطالعه، نکته‌ای است که ممکن است در سایر ایستگاه‌های مورد بررسی اتفاق نیفتد و به عبارتی این پارامتر باید جزء پارامترهای مورد بررسی در شاخص، مدنظر قرار گیرد. همچنین یکی از نکات مهم دیگری که باید در استفاده از هر شاخص کیفیت آب از جمله شاخص تحقیق حاضر در نظر گرفته شود، بررسی حدود مجاز پارامترهایی از کیفیت آب است که در این شاخص‌ها در نظر گرفته نشده است.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر با هدف توسعه و معرفی یک شاخص جدید کیفیت آب شرب (SDWQI) با استفاده از پارامترهای کیفیت آب اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه سفیدرود انجام شده است. به این منظور از داده‌های ماهانه ۱۲ پارامتر کیفیت آب شامل مواد جامد محلول (TDS)، هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل (TH)، اسیدیته (pH)، کلر (Cl^-)، سولفات (SO_4^{2-})، کربنات (CO_3^{2-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+)، کلسیم (Ca^{2+})

و پتاسیم (K^+) اندازه‌گیری شده طی سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۶۶ در ایستگاه‌های هیدرومتری رودبار و آستانه واقع روی رودخانه سفیدرود استفاده شده است. به منظور توسعه شاخص جدید، روش‌های چندمتغیره آماری مانند خوشه‌بندی سلسله مراتبی تجمعی (AHC) و تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از بسته‌های "cluster" و "factoextra" در نرم‌افزار R 4.1.1 به کار رفته است. به منظور توسعه شاخص کیفی علاوه بر انجام چهار مرحله کلی انتخاب پارامترها، زیرشاخص‌سازی، وزن‌دهی و تجمیع شاخص، پردازش‌هایی مانند تحلیل همبستگی نیز روی داده‌ها انجام شده است. همچنین به منظور ارزیابی شاخص تحقیق حاضر، نتایج شاخص جدید توسعه داده شده با شاخص کیفیت آب شرب WHO و دسته‌بندی کیفیت آب شرب شولر مقایسه شده است. آنالیز همبستگی بین پارامترهای کیفیت آب حاکی از معنی‌داری همبستگی بین پارامترهای EC، TDS و TH با یکدیگر و همچنین با پارامترهای Cl^- ، Ca^{2+} و Mg^{2+} در سطح معنی‌داری یک درصد در هر دو ایستگاه آستانه و رودبار دارد. از طرف دیگر کمترین مقادیر ضریب همبستگی پیرسون مربوط به پارامترهای pH و CO_3^{2-} با سایر پارامترهای کیفی و به صورت غیرمعنی‌دار است. نتایج خوشه‌بندی به روش AHC حاکی از قرارگیری اغلب پارامترهای کیفیت آب در خوشه‌هایی مجزا می‌باشد. به طوری که تنها پارامترهای EC، TDS، Cl^- و Na^+ در هر دو ایستگاه رودبار و آستانه در یک خوشه قرار می‌گیرند. با توجه به درجه اهمیت پارامترهای کیفیت آب جهت مصارف شرب و تحلیل همبستگی و خوشه‌بندی انجام شده، دو پارامتر EC و CO_3^{2-} از ۱۲ پارامتر مورد بررسی اولیه حذف و ۱۰ پارامتر باقیمانده به منظور توسعه شاخص جدید کیفیت آب استفاده شده است. وزن‌دهی پارامترها با استفاده از روش PCA حاکی از اختصاص بیشترین و کمترین وزن به ترتیب به پارامترهای TDS و K^+ و برابر ۰/۱۶۳ و ۰/۰۳۱ می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از پوشش ۵۹/۳ و ۶۷/۶ درصدی مولفه‌های اصلی اول و دوم از واریانس تغییرات کل پارامترهای کیفیت آب مورد بررسی به ترتیب در ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد. نتایج دسته‌بندی کیفیت آب بیانگر قرار گرفتن به ترتیب (۴۰/۵، ۱۶/۴ و ۲۳/۷ درصد) و (۹۰/۱، ۷۳/۱ و ۵۷/۳ درصد) داده‌های ایستگاه‌های رودبار و آستانه در رده‌ی خوب و عالی جهت مصارف شرب بر اساس دسته‌بندی شولر، شاخص WHO و شاخص جدید می‌باشد.

1. Abbasi, T., & Abbasi, S.A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier.
2. Adimalla, N., & Venkatayogi, S. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science* 8(1): 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>.
3. Babanezhad, E., Qaderi, F., & Ziri, M.S. (2018). Spatial modeling of groundwater quality based on using Schoeller diagram in GIS base: a case study of Khorramabad, Iran. *Environmental Earth Sciences* 77(9): 1-12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7541-0>.
4. Brown, R.M., McClelland, N.I., Deininger, R.A., & Tozer, R.G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and Sewage Works* 117(10).
5. Casillas-García, L.F., de Anda, J., Yebra-Montes, C., Shear, H., Díaz-Vázquez, D., & Gradilla-Hernández, M.S. (2021). Development of a specific water quality index for the protection of aquatic life of a highly polluted urban river. *Ecological Indicators* 129: 107899. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107899>.
6. Cotruvo, J.A. (2017). WHO guidelines for drinking water quality: first addendum to the fourth edition. *Journal-American Water Works Association* 109(7): 44-51. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2017.109.0087>.
7. Dadolahi-Sohrab, A., Arjomand, F., & Fadaei-Nasab, M. (2012). Water quality index as a simple indicator of watersheds pollution in southwestern part of Iran. *Water and Environment Journal* 26(4): 445-454. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00303.x>.
8. Dao, V., Urban, W., & Hazra, S.B. (2020). Introducing the modification of Canadian water quality index. *Groundwater for Sustainable Development* 11: 100457. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100457>.
9. Darapu, S.S.K., Sudhakar, B., Krishna K.S.R., Rao, P.V., & Sekhar, M.C. (2011). Determining water quality index for the evaluation of water quality of river Godavari. *International Journal of Environmental Research and Application* 1: 174-18.
10. Dunnette, D.A. (1979). A geographically variable water quality index used in Oregon. *Journal of Water Pollution Control Federation* 53-61.
11. Grubbs, F.E. (1950). Sample criteria for testing outlying observations. *The Annals of Mathematical Statistics* 27-58.
12. Horton, R.K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of the Water Pollution Control Federation* 37(3): 300-306.
13. Hoseinzadeh, E., Khorsandi, H., Wei, C., & Alipour, M. (2015). Evaluation of Aydughmush river water quality using the national sanitation foundation water quality index (NSFWQI), river pollution index (RPI), and forestry water quality index (FWQI). *Desalination and Water Treatment* 54(11): 2994-3002. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.913206>.
14. Jesuraja, K., Selvam, S., & Murugan, R. (2021). GIS-based assessment of groundwater quality index (DWQI and AWQI) in Tiruchendur Coastal City, Southern Tamil Nadu, India. *Environmental Earth Sciences* 80(7): 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09542-5>.
15. Kannel, P.R., Lee, S., Lee, Y.S., Kanel, S.R., & Khan, S.P. (2007). Application of water quality indices and dissolved oxygen as indicators for river water classification and urban impact assessment. *Environmental monitoring and assessment* 132(1): 93-110. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1>.
16. Kumar, S., & Sangeetha, B. (2020). Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 10: 100297. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100297>.
17. Liou, S.M., Lo, S.L., & Wang, S.H. (2004). A generalized water quality index for Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment* 96(1): 35-52. <https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1>.
18. Lobato, T.C., Hauser-Davis, R.A., Oliveira, T.F., Silveira, A.M., Silva, H.A.N., Tavares, M.R.M., & Saraiva, A.C.F. (2015). Construction of a novel water quality index and quality indicator for reservoir water quality evaluation: A case study in the Amazon region. *Journal of Hydrology* 522: 674-683. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.021>.
19. Ma, Z., Li, H., Ye, Z., Wen, J., Hu, Y., & Liu, Y. (2020). Application of modified water quality index (WQI) in the assessment of coastal water quality in main aquaculture areas of Dalian, China. *Marine Pollution Bulletin* 157: 111285. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111285>.
20. Medeiros, A.C., Faial, K.R.F., Faial, K.D.C.F., da Silva Lopes, I.D., de Oliveira Lima, M., Guimarães, R.M., & Mendonça, N.M. (2017). Quality index of the surface water of Amazonian rivers in industrial areas in Pará, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 123(1-2): 156-164. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.09.002>.
21. Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., & Myers, B. (2017). Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezal Ozan River. *Science of the Total Environment* 589: 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.226>.
22. Naubi, I., Zardari, N.H., Shirazi, S.M., Ibrahim, N.F.B., & Baloo, L. (2016). Effectiveness of Water Quality Index for Monitoring Malaysian River Water Quality. *Polish Journal of Environmental Studies* 25(1): 231-239.

- <https://doi.org/10.15244/pjoes/60109>.
23. Neary, B., Cash, K., Hebert, S., Khan, H., Saffran, K., Swain, L., & Williamson, D. (2001). Canadian Water quality guidelines for the protection of the aquatic life, CCME water quality index 1.0. Technical Report Canadian Council of Ministers of the Environment.
24. Rai, R.K., Upadhyay, A., Ojha, C.S.P., & Singh, V.P. (2011). *The Yamuna river basin: water resources and environment* (Vol. 66). Springer Science and Business Media.
25. Sarkar, C., & Abbasi, S.A. (2006). Qualidex – A New Software for Generating Water Quality Indice. *Environmental Monitoring and Assessment* 119: 201–231. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-9023-6>.
26. Schoeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development, UNESCO 5483.
27. Schoeller, H. (1967). Geochemistry of groundwater—an international guide for research and practice, *Chap.* 15: 1–18.
28. Stoner, J.D. (1978). *Water-quality indices for specific water uses*. Department of the Interior Geological Survey.
29. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2016). Development of river water quality indices—a review. *Environmental Monitoring and Assessment* 188(1): 1-29. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>.
30. Sutadian, A.D., Muttill, N., Yilmaz, A.G., & Perera, B.J.C. (2017). Using the Analytic Hierarchy Process to identify parameter weights for developing a water quality index. *Ecological Indicators* 75: 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.043>.
31. Tiwari, A.K., Singh, A.K., & Mahato, M.K. (2018). Assessment of groundwater quality of Pratapgarh district in India for suitability of drinking purpose using water quality index (WQI) and GIS technique. *Sustainable Water Resources Management* 4(3): 601-616. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0144-1>.
32. Uddin, M.G., Nash, S., & Olbert, A.I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators* 122: 107218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
33. Varol, S., & Davraz, A. (2015). Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey). *Environmental Earth Sciences* 73(4): 1725-1744. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3531-z>.
34. Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Rajiv Ganhi, R., Chidambaram, S., Anandhan, P., & Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 171(1): 595-609. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>.
35. Verma, P., Singh, P.K., Sinha, R.R., & Tiwari, A.K. (2020). Assessment of groundwater quality status by using water quality index (WQI) and geographic information system (GIS) approaches: a case study of the Bokaro district, India. *Applied Water Science* 10(1): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1088-4>.
36. Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, V., Sharma, S., & Arya, S. (2015). Water quality assessment of Pahuj River using water quality index at Unnao Balaji, MP, India. *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* 19(1): 241-250.



GIS-Based Land Capability and Suitability Evaluation for Irrigated Agriculture (Case Study: Karaj-Qazvin)

F. Sarmadian^{1*}, S. Teymuri Bardiani², Sh. Rahmani Syalarz³, N. Sayadi⁴

Received: 01-05-2022

Revised: 31-05-2022

Accepted: 28-08-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Sarmadian, F., Teymuri Bardiani, S., Rahmani Syalarz, Sh., & Sayadi, N. (2022). GIS-Based Land Capability and Suitability Evaluation for Irrigated Agriculture (Case Study: Karaj-Qazvin). *Journal of Water and Soil* 36(4): 459-475. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.76330.1159](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.76330.1159)

Introduction

Farmers and agricultural products face many risks, including adverse weather conditions, pests, diseases, and changes in product prices, laws, and regulations. The first step in managing and minimizing many of these risks is often choosing the right crops for the area under cultivation; Therefore, knowing whether these lands are suitable for a particular crop can determine the success or failure of agricultural strategies. Because farmers are exposed to climate change and the economy, where agricultural frameworks are changing at an unprecedented rate, it is vital for them to be able to adapt to new trends. Increasing the availability of land suitability information for agricultural products will be a valuable aid for farmers and managers in this field to develop new agricultural strategies. At the same time, the growth of computational capabilities and increased access to geographic data has made land suitability assessment faster and easier.

Materials and Methods

The study area is located in Abik city, a city located in Qazvin province of Iran, between 50 degrees and 40 minutes to 50 degrees and 41 minutes east longitude and 35 degrees and 52 minutes to 36 degrees and 21 minutes north latitude. The average annual soil temperature at depth of less than 50 cm is 15.8 °C and has thermal heating regime. Furthermore, according to the average rainfall of the region, 222.7 mm, the humidity regime of the region is of Eridic type. Moisture and heat regimes were obtained by Newhall software. According to regional conditions and the size of the area, 60 profiles were drilled for network description and sampling. Field studies including determination, drilling, description of profiles, slope percentage, etc. were determined at the site. Information on soil physical and chemical properties were tested. Parametric, American (USDA) and LSP methods were used to evaluate the land. Necessary climatic characteristics for annual plants include the climatic variables that are necessary to determine the growing season, planting date and type of cultivar. The information of Buin Zahra synoptic station has been used. In this study, CROPWAT software was used to calculate the potential evapotranspiration. Land information such as slope, drainage Condition and flood absorption, as mentioned in the profile description card, was used to assess land suitability. Growth period was also obtained for the region using the area agronomical calendar. To calculate potential of production, the model AEZ which is provided by FAO, is used in this research.

Results and Discussion

The decrease in the suitability of the studied lands for the wheat crop is due to the salinity and sodium content of the lands and the presence of surface gravel and shallow soil depth. According to the provided tables and maps, 18% of the study area is unacceptable, 12.5% is average, 12.5% is good, 25% is very good, or very good and

1- Professor, Soil Science Department, College of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: fsarmad@ut.ac.ir)

2- Masters Student, Soil Science Department, College of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran

3- Masters Student, Soil Science Department, College of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran

4- Graduated with a Master's Degree in Soil Science, Soil Science Department, College of Agriculture, Tehran University, Karaj, Iran

31.25% of the total study area are in the excellent fitness class. The above values have been obtained by considering the rangeland and saline sections as well as the type of product in preparing the fit map. The accuracy of the preferred rational scoring method in land suitability is higher than the parametric method because in this method the land suitability maps of the area are obtained by logical collectors and the output map is the result of all parameters and constraints that the area may have. To have the desired. In the parametric method, this problem is summarized in soil properties and climatic conditions. Due to the lack of direct measurement of product performance, more accurate comparisons were not possible.

Conclusion

Most of the restrictions were in shallow hilly areas with shallow soils and pebbles, and salinity, alkalinity and gypsum did not impose any restrictions in these areas. Traffic in these areas was difficult and they were mostly in the S3 class by the parametric method and the poor and unacceptable class in the LSP. In land evaluation using LSP method, understanding the relationships of criteria with each other and the amount of impact that each has on the potential of land for different uses is essential. The LSP method is sensitive yet flexible, and may not work well if the data accuracy and number of parameters are low. The application of GIS-based LSP method showed a suitable tool to create accurate, flexible and rationally justifiable criteria in assessing the capability and suitability of land in agriculture. In such studies, by using the Bayer LSP method, prerequisites such as precisely defining the goals of users, managers and agricultural expertise should be considered. This method is a multi-criteria evaluation method that has been improved for measurement among decision makers, land management and other specialties.

Keywords: FAO, Land suitability and capability, LSP method, Parametric method

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۷۵-۴۵۹

مقایسه روش‌های پارامتریک و روش امتیازدهی منطقی ترجیحی (LSP) در ارزیابی قابلیت و تناسب اراضی برای زراعت‌های آبی در منطقه آبیگ قزوین

فریدون سرمیدیان^{۱*} - سجاد تیموری بردیانی^۲ - شهلا رحمانی سیالرز^۳ - نیلوفر صیادی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۶

چکیده

کشاورزان و محصولات کشاورزی با خطرات زیادی از جمله آلودگی‌های نامساعد، آفات، بیماری‌ها و تغییر در قیمت محصولات، قوانین و مقررات مواجه هستند. اولین قدم در مدیریت و به حداقل رساندن بسیاری از این خطرات اغلب انتخاب محصولات مناسب برای مناطق زیر کشت است؛ بنابراین، دانستن اینکه آیا این اراضی برای یک محصول خاص مناسب است یا خیر، می‌تواند موفقیت یا شکست استراتژی‌های کشاورزی را تعیین کند. ارزیابی چندمعیاره (MCE) یکی از روش‌های آنالیز مکانی است که می‌تواند به ارزیابی اراضی کمک کند. هدف از این مطالعه بسط دادن روش‌های استاندارد MCE بر پایه GIS، با استفاده از روش امتیازدهی منطقی ترجیحی (LSP) برای ارزیابی اراضی است تا در کنار بررسی معیارهای متعدد برای ارزیابی اراضی و انطباق آنها، از تلفیق خصوصیات شیمیایی و فیزیکی با مسائل اجتماعی و اقتصادی بتوان به یک ارزیابی اراضی کامل‌تر دست یافت. در این تحقیق، به دو روش پارامتریک و امتیازدهی منطقی ترجیحی ارزیابی اراضی انجام شد. منطقه مورد مطالعه در محدوده کرج-قزوین، شهرستان آبیگ قرار گرفته است. در منطقه ۶۰ خاک رخ حفر، نمونه‌برداری شد و آزمایش‌های مربوطه انجام شد. بررسی درجه تناسب اراضی برای کشاورزی به‌طوری‌که علاوه بر خصوصیات خاک و اراضی، مسائل اقتصادی و اجتماعی و زیست‌محیطی هم مطرح باشد، برای این منطقه انجام شد. نقشه‌های تناسب اراضی برای هر دو روش پارامتریک و LSP تهیه شد. روش LSP با استفاده از تعداد بیشتری از پارامترها، ارزیابی دقیق‌تری را ارائه داد و ۳۱/۲۵ درصد از اراضی برای کشت گندم، جو، ذرت دارای تناسب عالی بودند. بر اساس روش پارامتریک برای گندم ۲۸٪، برای جو ۳۶٪ و برای ذرت ۲۰٪ از اراضی برای کشاورزی مناسب بودند.

واژه‌های کلیدی: تناسب و قابلیت اراضی، روش پارامتریک، روش LSP، FAO

مقدمه

در مدیریت و به حداقل رساندن بسیاری از این خطرات اغلب انتخاب محصولات مناسب برای مناطق زیر کشت است؛ بنابراین، دانستن اینکه آیا این اراضی برای یک محصول خاص مناسب است یا خیر، می‌تواند موفقیت یا شکست استراتژی‌های کشاورزی را تعیین کند.

کشاورزان و محصولات کشاورزی با خطرات زیادی از جمله آلودگی‌های نامساعد، آفات، بیماری‌ها و تغییر در قیمت محصولات، قوانین و مقررات مواجه هستند (Mulder et al., 2019). اولین قدم

۱- استاد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
(Email: fsarmad@ut.ac.ir) *نویسنده مسئول

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۴- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

باتوجه به تغییرات اقلیمی و اقتصاد چارچوب‌های کشاورزی با سرعت بی‌سابقه‌ای تغییر می‌کند، برای آنها حیاتی است که بتوانند با روندهای جدید سازگار شوند (Cheshire and Woods, Lennox, 2015). افزایش در دسترس بودن اطلاعات تناسب اراضی برای محصولات کشاورزی کمک ارز شمندی به کشاورزان و مدیران این حوزه در جهت ابداع استراتژی‌های جدید کشاورزی می‌کند. در عین حال، رشد ابزارهای محاسباتی و افزایش دسترسی به داده‌های جغرافیایی، انجام ارزیابی تناسب اراضی را سریع‌تر و آسان‌تر کرده است (Møller et al., 2021).

سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی^۱ امکان بررسی داده‌های مکانی متعدد را فراهم می‌کند (Ahmadi et al., 2021). ادغام سنجش از دور^۲، ابزارها و تکنیک‌های جدید، ایجاد سیستم‌های ترکیبی ارزیابی اراضی با دقت و قابلیت بالا را فراهم می‌سازد (Singha and Swain, 2016). روش امتیازدهی ترجیحی (LSP)^۳ فرصت‌های فراوانی را برای کمی‌سازی اهداف انسانی و روابط منطقی با استفاده از معیارهای ارزیابی قابل توضیح و توجیه ارائه می‌دهد (Shen et al., 2021).

دقت روش‌های ارزیابی تناسب اراضی بستگی به درجه تأثیر خصوصیات اراضی انتخاب شده مؤثر در تولید محصول دارد (Sarmadian et al., 2009). یکی از مزیت‌های روش تصمیم‌گیری چندمعیاره مبتنی بر تحلیل سلسله‌مراتبی این است که پیوستگی اراضی را در کلاس‌های مختلف به صورت پیوسته نشان می‌دهد بعلاوه از مزیت‌های دیگر آن این است که به طبیعت اجازه می‌دهد به صورت ذاتی و مبهم باشد و سعی بر آن ندارد که سیستم پیچیده خاک را با داده‌هایی که توسط محققین علوم خاک اندازه‌گیری می‌شود محدود نماید. این روش تعداد بیشتری از ورودی‌های معیار را در بر می‌گیرد، طیف کاملی از تصمیم‌گیری‌های انسانی را نشان می‌دهد و نقشه‌های قابلیت و تناسب زمین کشاورزی واقعی را تولید می‌کند و در نتیجه آن را به ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزی یکپارچه کاربری منطقه‌ای تبدیل می‌کند (Montgomery et al., 2017). همچنین این روش با دخیل نمودن عوامل بیشتر در ارزیابی تناسب اراضی برای محصولات مختلف نقش مهمی را در ارزیابی و تناسب اراضی ایفا می‌کند (El Baroudy, 2016).

روش‌های پارامتریک استوری، ریشه دوم و فائو نتایج معقول‌تری نسبت به روش‌های محدودیت ارائه می‌کنند. وسعت کلاس‌های تناسب اراضی برای هر یک از تیپ‌های بهره‌وری مورد مطالعه بر اساس روش‌های استوری و ریشه دوم، مؤید این مطلب است (Ahmadi et al., 2021). صرف نظر از نوع مدل و محصول

مورد مطالعه، مقادیر صحت عمومی از سطح کلاس به زیر کلاس تناسب به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. اجزای سرزمین و شاخص‌های سنجش از دور شاخص گیاهی عمودی (PVI)^۴ و شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)^۵، مهم‌ترین پارامترهای محیطی برای پیش‌بینی کلاس و زیر کلاس تناسب کیفی و کلاس تناسب کمی اراضی هستند (Mosleh et al., 2017). روش LSP بر پایه GIS در ارائه یک گردش کاری انعطاف‌پذیر و حساس برای ایجاد نتایج واقعی و قابل توجیه از معیارهای پیچیده که با اهداف و الزامات ذی‌نفعان محدود می‌شود، مؤثر است (Shen et al., 2021). معیارهای محاسباتی LSP را می‌توان در یک سیستم GIS برای پردازش داده‌هایی که نشان‌دهنده مکان‌های مطالعه واقعی هستند ادغام کرد (Dragičević et al., 2018). مطالعات حاضر نمی‌توانند صحت نقشه مناسب را تأیید کند؛ زیرا تنها از یک رویکرد، یعنی رویکرد محاسبات نرم مبتنی بر GIS استفاده می‌کنند. دو یا چند روش چندمعیاره را می‌توان برای کاهش اثر خطاهای این روش به کاربرد (Lennox, 2015).

امتیازدهی منطقی اولویت (LSP) یک روش کلی تصمیم‌گیری چندمعیاره است که ریشه در محاسبات ریاضی و استدلال فازی دارد. این روش تجمیع غیرخطی تعداد زیادی از معیارهای ورودی را بدون کاهش ارزش داده‌ها برای روش‌های MCE مبتنی بر GIS فراهم می‌کند (Hatch et al., 2014). این روش در اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادی برای اولین بار به عنوان یک روش ارزیابی چندمعیاره به منظور ارزیابی سیستم‌های کامپیوتری استفاده و مطرح شد (Dujmović, 1979). باتوجه به قابلیت‌های این روش محققان آمایش سرزمین از روش LSP برای ارزیابی مناطق شهری و کشاورزی استفاده کردند. به عنوان مثال مونتگومری در سال ۲۰۱۶ روش LSP را در ارزیابی کشاورزی انجام داد و به این نتیجه رسید که این روش نسبت به ۶ روش ارزیابی چندمعیاره مانند OWA^۶ و ... و باتوجه به مقادیر AUC^۷ و منحنی ROC^۸ روش بهتری برای ارزیابی اراضی شهری و کشاورزی است و امکان بررسی همه‌جانبه‌تری را فراهم می‌کند (Montgomery et al., 2016b).

ارزیابی تناسب و قابلیت اراضی را برای ایالت کلرادو امریکا انجام دادند. روش LSP در مقایسه با روش ارزیابی قابلیت USDA که پیش‌تر در ارزیابی منطقه مورد نظر به کاررفته بود، تناسب منطقه را حدود ۱۰ درصد افزایش داده است (Montgomery and Dragičević, 2016a). شن و همکاران ۲۰۲۱ نتایج نشان می‌دهد که روش LSP.GIS در ارائه یک گردش کاری انعطاف‌پذیر و حساس

5- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

6- Ordered Weighted Averaging

7- Area Under the Curve

8- Receiver Operating Characteristic

1- Geographic Information System (GIS)

2- Remote Sensing (RS)

3- Logic Scoring of Preference (LSP)

4- Perpendicular Vegetation Index (PVI)

بارندگی منطقه ۲۲۲۰۷ میلی‌متر رژیم رطوبتی منطقه از نوع اریدیک است. رژیم‌های رطوبتی و حرارتی توسط نرم‌افزار نیوهال به دست آمد. منطقه مورد مطالعه در تراز ارتفاعی ۱۴۱۰ متر از سطح دریا قرار دارد.

مطالعات صحرائی و تجزیه‌های آزمایشگاهی

برای انجام این تحقیق منطقه مطالعاتی واقع در قسمتی از دشت قزوین، شهرستان آبیک، در استان قزوین انتخاب شد و با توجه اینکه قبلاً در این منطقه مطالعات دیگری انجام شده، در محدوده آبیک مساحت حدود ۲۴ هزار هکتار که مورد مطالعه قرار نگرفته بود به همین تعداد ۶۰ خاک رخ که باتوجه به واحدهای فیزیوگرافی و شرایط موجود در منطقه همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود انتخاب شدند. همچنین خاک‌رخ‌ها به روش شبکه‌ای نامنظم انتخاب و حفر شد. مطالعات صحرایی شامل حفر، تشریح خاک‌رخ‌ها، درصد شیب، وضعیت سیل‌گیری، زهکشی، پوشش گیاهی و کاربری اراضی، وضعیت آب زیرزمینی، رنگ و ساختمان خاک، عمق مؤثر خاک، و نمونه‌برداری است.

برای انجام مطالعات آزمایشگاهی ابتدا نمونه‌های خاک تهیه شده، هوا خشک گردید و نهایتاً از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شده و ذرات درشت‌تر از ۲ میلی‌متر جداگانه اندازه‌گیری و مورد محاسبه قرار گرفتند. ذرات کوچک‌تر از ۲ میلی‌متر بعد از الک نمودن در ظرف‌های مخصوص جهت انجام آزمایش‌ها نگهداری شدند و سپس آزمایش‌ها فیزیکی و شیمیایی معمول بر روی آنها انجام شد. بافت خاک به روش هیدرومتر، ماده آلی به روش والکلی و بلک و CEC به روش اشباع با اسات آمونیوم اندازه‌گیری شد. برای پیش‌بینی ظرفیت تبادل کاتیونی نیاز به استاندارد کردن اعماق خاک است.

مشخصات اقلیم: برای گیاهان یک‌ساله، اطلاعات اقلیمی لازم شامل آن دسته از متغیرهای اقلیمی می‌شوند که جهت تعیین دوره رشد، تاریخ کاشت و نوع رقم ضرورت دارند. در این مورد از اطلاعات (میانگین ۱۶ ساله) ایستگاه سینوپتیک بوئین‌زهر استفاده شده است.

محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل: در این مطالعه از نرم‌افزار CROPWAT 8.0 برای محاسبه میزان تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده گردید. همچنین، برای تهیه منحنی طول دوره رشد از اطلاعات بارندگی و تبخیر و تعرق ده روزه استفاده گردید. طول دوره رشد نیز برای منطقه با استفاده از تقویم زراعی منطقه به دست آمد.

برای محاسبه تولید پتانسیل هر محصول (گندم، جو، ذرت) از مدل فائو که در آن بر اساس پتانسیل ژنتیکی محصول و ویژگی‌های گیاهی آن، با استفاده از داده‌های اقلیمی همانند تابش خورشیدی و درجه حرارت، مقدار تولید زیست‌توده^۳ محصول برآورد می‌شود.

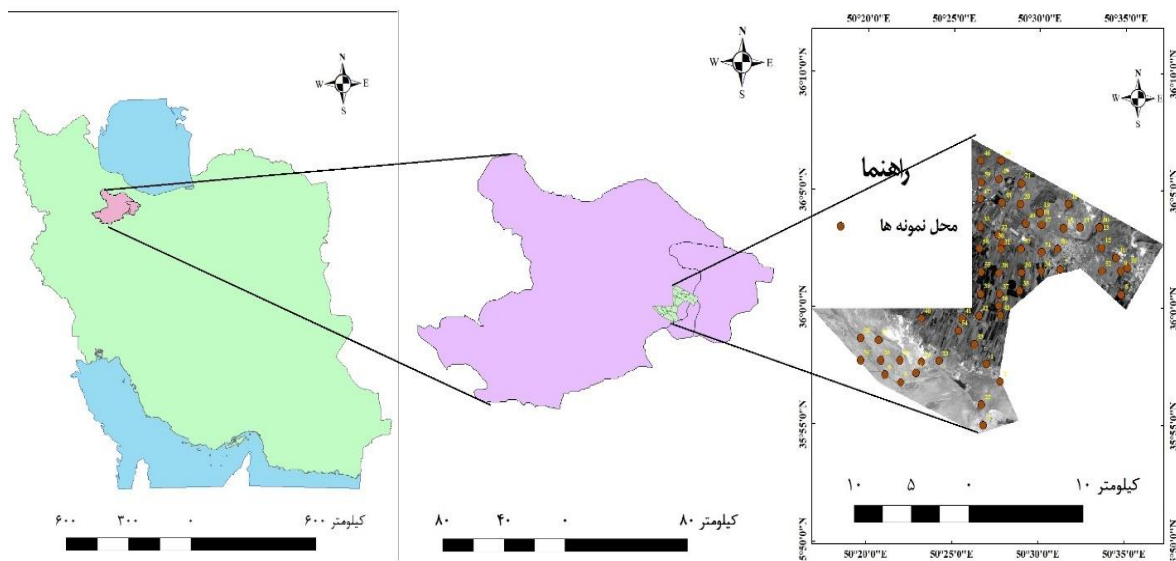
برای ایجاد نتایج واقعی و قابل توجیه از معیارهای پیچیده که با اهداف و الزامات کاربران محدود می‌شود، مؤثر است (Shen et al., 2021).

مطالعات انجام شده اصولاً بر پایه خصوصیات فیزیکی، شیمیایی خاک و گیاه بوده؛ اما مسائل اقتصادی و اجتماعی که تأثیر زیادی روی تداوم کشاورزی و تولید محصول مناسب دارند، مورد بحث قرار نگرفته است. از طرفی دیگر روش‌های ارزیابی چندمتغیره بر پایه سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی توانایی استفاده از داده‌های بیشتر (به طور مثال بیش از ۸ معیار) را ندارند؛ ولی با استفاده از روش LSP می‌توان این نقص را برطرف کرد (Montgomery et al., 2015). رویکرد‌های مبتنی بر MCE^۱ برای تجزیه و تحلیل تناسب اراضی کشاورزی مناسب هستند و LSP به دلیل داشتن رابط کاربرپسند^۲ و انتخاب گسترده گروه‌های تجمع‌کننده با موفقیت برای مطالعه موردی ارزیابی تناسب تراکم شهری و ارزیابی تناسب اراضی استفاده و آزمایش شده است (Shen et al., 2021).

در این مطالعه هدف، پیاده‌سازی روش LSP مبتنی بر GIS به عنوان یک روش بهبودیافته و جدید برای تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور ارزیابی بخشی از اراضی شهرستان آبیک واقع در استان قزوین و مقایسه آن با روش پارامتریک (روش ریشه دوم) است. در ادامه به تهیه نقشه‌های تناسب اراضی منطقه مورد مطالعه برای هر کاربری مشخص پرداخته و سپس نحوه مدیریت اراضی به شکلی که در عین سودمندی، منابع موجود در اراضی حفظ شده و از نظر زیست‌محیطی تأثیرات سوء نداشته باشد، بررسی شد.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه در شهرستان آبیک یکی از شهرستان‌های استان قزوین بین ۵۰ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. منطقه مورد مطالعه جزء مناطق نیمه خشک بوده و دارای رژیم حرارتی ترمیک، رژیم رطوبتی خاک زیر یک خشک و اریدیک ضعیف و ندرتاً دارای رژیم‌های رطوبتی اکوتیک است. بر اساس نقشه هم‌بارش استان، میانگین بارش سالانه در سطح استان از ۲۱۰ میلی‌متر در بخش‌های شرقی تا بیش از ۵۵۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمال شرقی متغیر است و خطوط هم‌بارش کم‌وبیش موازی خطوط تراز هستند. بر اساس میانگین دمای سالیانه مورد مطالعه ۱۴/۸ درجه سانتی‌گراد (بر اساس داده‌های سازمان آب‌وهواشناسی کشور) و افزودن یک درجه سانتی‌گراد به آن، میانگین دمای سالیانه خاک در عمق کمتر از ۵۰ سانتی‌متری ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد بوده و دارای رژیم حرارتی ترمیک بوده است. همچنین باتوجه به میانگین



شکل ۱- تصویر منطقه مورد مطالعه و الگوی نمونه برداری
Figure 1- Image of the study area and sampling points

روش ریشه دوم: در این شاخص اراضی بر اساس معادله زیر محاسبه می‌شود:

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

که در این روش I: شاخص اراضی، $R_{\min}$: حداقل درجه به دست آمده در بین خصوصیات مختلف اراضی و اقلیمی و حروف A، B، C و ... بیانگر سایر خصوصیات مختلف اراضی و اقلیمی است (Storie and Earl, 1976).

روش امتیازدهی ترجیحی منطقی (LSP)

یک روش ارزیابی چندمعیاره است. این روش سه مرحله اصلی دارد: (۱) تعیین درخت ویژگی‌ها، (۲) تعیین امتیازها، (۳) ساختار تجمعی LSP^4 .

درخت ویژگی: بیانگر خصوصیات اراضی و منطقه است که به صورت درختی تقسیم‌بندی و تنظیم شده است که تمام ویژگی‌های موردنیاز در ارزیابی را در این ساختار تعیین می‌کنیم. به طور مثال شیب یک پارامتر اجباری در گروه توپوگرافی است، به این دلیل که در صورت شیب زیاد در منطقه، عملیات کشاورزی، تحت تأثیر قرار گرفته و مناسب برای کشاورزی نیست؛ در نتیجه تناسب کلی برای این گروه اگر زیرگروه دیگری موجود بود صفر خواهد شد. (Montgomery et

سیکل رشد هریک از محصولات گندم، جو، ذرت بر اساس تقویم زراعی منطقه به دست آمد. برای محاسبه تولید پتانسیل، از مدل که پهنه‌بندی اکولوژیکی کشاورزی (AEZ)^۱ توسط فائو ارائه شده است، در این تحقیق استفاده شده است.

مشخصات خاک و زمین‌نما: بعضی اطلاعات مربوط به اراضی از قبیل شیب، وضعیت زهکشی و محدودیت سیل‌گیری که در کارت تشریح خاک رخ ثبت شده وجود دارند و در ارزیابی تناسب اراضی به کارگرفته شده. در شرایط خاص سایر اطلاعات را که در کارت تشریح خاک رخ برای هر افق خاک گزارش می‌شود، لازم است برای عمق معینی بر اساس ضرایب وزنی به دست آورد. نظر به اینکه با افزایش عمق خاک، اهمیت خواص خاک برای رشد گیاه کاهش می‌یابد، در محاسبه مذکور، از ضرایب وزنی قسمت‌های مختلف خاک‌رخ استفاده می‌گردد. نقشه مدل رقومی ارتفاع منطقه از سایت (alaska) بادقت ۱۲/۵ متر دریافت شد و با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 نقشه‌های موردنیاز از آن تهیه گردید.

باتوجه به شرایط و مشخصات اراضی مورد مطالعه و با در نظر گرفتن نیازهای انواع کاربری، کلاس تناسب اراضی برای آن نوع کاربری تعیین می‌شود. برای مشخص کردن کلاس اراضی، روش‌های محدودیت ساده یا حداکثر، روش پارامتریک وجود دارند که در این مطالعه تنها روش پارامتریک (روش ریشه دوم) استفاده شد.

3- Definition of attribute criteria
4- LSP aggregation structure

1- Agro Ecological Zoning (AEZ)
2- Developing Attribute Tree

al., 2017). در جدول ۱ تقسیم‌بندی‌های موجود برای هر سطح آورده شده است که علامت (+) در جدول نشان‌دهنده پارامترهای اجباری است و در این تحقیق تمام پارامترها اجباری در نظر گرفته شده است (Dragičević and Hatch, Hashem and Khiabani, 2015) (2018).

تعیین امتیاز معیارها: هر ویژگی ورودی به صورت جداگانه‌ای با استفاده از حدود معیار برای آن ویژگی ارزیابی می‌شود. حدود معیار هر ویژگی نشان‌دهنده میزان رضایت‌بخشی یا تناسب ویژگی موردنظر است. برای مثال، دوجمویچ و همکاران، در طی تحقیقی در سال ۲۰۱۶ به این صورت عمل کردند که دما - اولین ویژگی از گروه اقلیم

- اگر رشد کامل و رضایت‌بخش گیاه (عملکرد ۱۰۰٪ یا ارزش ۱) را برای دما ۱۹ درجه سانتی‌گراد و دمای بالاتر از ۳۵ درجه هم نامطلوب در نظر بگیریم، در صورتی که دما کمتر یا بیشتر از ۱۹ درجه سانتی‌گراد باشد، درجه رضایت‌مندی یا تناسب دما کمتر از بیشترین ارزش یعنی ۱ خواهد شد و نهایتاً از تناسب کل گروه اقلیم هم کم می‌شود. به همین ترتیب، دمای صفر هم رضایت‌مندی یا تناسب صفر خواهد داشت و از آن جا که پارامتری اجباری است تناسب کل گروه اقلیم صفر خواهد شد. در نتیجه در دامنه دمای $0 \leq t \leq 19$ ساده‌ترین راه برای تعریف درجه رضایت‌مندی x تابع خطی زیر است (Montgomery et al., 2017):

جدول ۱- تعیین خصوصیات اراضی (درخت ویژگی)
Table 1- Determining land characteristics (feature tree)

۱. قابلیت اراضی 1. Lands Capability	۲. تناسب اراضی 2. Lands suitability
۱-۱ توپوگرافی 1-1 Topography	۱-۲ اقلیم 1-2 Climate
۱-۱-۱ شیب (+) 1-1-1 Slope(+)	۱-۱-۲ دما (+) / ۲-۱-۲ تنش آبی (+) 2-1-1 Temperature (+) / 2-1-2 Water stress (+)
۲-۱ خصوصیات خاک 2-1 Soil properties	۲-۲ اقتصادی 2-2 Economic
۱-۲-۱ بافت (+) / ۲-۲-۱ سنگ‌ریزه (+) 1-2-1 Texture (+) / 1-2-2 gravel (+) / 1-2-3 lime(+)	۱-۲-۲ قیمت محصول (+) / ۲-۲-۲ عملکرد محصول (+) 2-2-1 Product price (+) / 2-2-2 Product performance (+)
۳-۱ عمق 3-1 Depth	۳-۲ دسترسی‌ها 3-2 Accessions
۱-۳-۱ عمق خاک و لایه محدودکننده (+) 1-3-1 Soil depth and limiting layer (+) / 1-3-2 water available to plants(+)	۱-۳-۲ دسترسی به جاده‌های اصلی (+) / ۲-۳-۲ دسترسی به جاده‌های فرعی (+) 3-2-1 Access to main roads (+) / 3-2-2 Access to side road (+)
۴-۱ تراکم 4-1 Density	۴-۲ مدیریت 4-2 Management
۱-۴-۱ زهکشی (+) / ۲-۴-۱ جرم مخصوص ظاهری (+) 1-4-1 Drainage (+) / 1-4-2 bulk density (+)	۱-۴-۲ نوع محصول (+) / ۲-۴-۲ کاربری اراضی (+) 2-4-1 Type of product (+) / 2-4-2 land use (+)
۵-۱ حاصلخیزی خاک 5-1 Soil fertility	۵-۲ قابلیت اراضی 5-2 Capability lands
۱-۵-۱ OC (+) / ۲-۵-۱ EC (+) / ۱-۵-۲ شیب (+) / ۲-۵-۲ بافت (+) / ۳-۵-۲ سنگ‌ریزه (+) / ۴-۵-۲ آهک (+) / ۵-۵-۲ عمق خاک (+) / ۶-۵-۲ آب در دسترس (+) / ۷-۵-۲ زهکشی (+) / ۸-۵-۲ جرم مخصوص ظاهری (+) / ۹-۵-۲ OC (+) / ۱۰-۵-۲ SAR کاتیونی (+) / ۱۱-۵-۲ EC (+) / ۱۲-۵-۲ ظرفیت تبادل کاتیونی (+) / ۱۳-۵-۲ گچ (+) 1-5-1 OC (+) / 1-5-2 EC (+) / 1-5-3 SAR (+) / 1-5-4 CAC (+) / 1-5-5 Gypsum (+))	۱-۵-۲ شیب (+) / ۲-۵-۲ بافت (+) / ۳-۵-۲ سنگ‌ریزه (+) / ۴-۵-۲ آهک (+) / ۵-۵-۲ عمق خاک (+) / ۶-۵-۲ آب در دسترس (+) / ۷-۵-۲ زهکشی (+) / ۸-۵-۲ جرم مخصوص ظاهری (+) / ۹-۵-۲ OC (+) / ۱۰-۵-۲ SAR کاتیونی (+) / ۱۱-۵-۲ EC (+) / ۱۲-۵-۲ ظرفیت تبادل کاتیونی (+) / ۱۳-۵-۲ گچ (+) 2-5-1 slope (+) / 2-5-2 texture (+) / 2-5-3 gravel (+) / 2-5-4 lime (+) / 2-5-5 soil depth (+) / 2-5-6 Available water (+) / 2-5-7 Drainage (+) / 2-5-8 bulk density (+) / 2-5-9 OC (+) / 2-5-10 SAR (+) / 2-5-11 EC (+) / 2-5-12 cation exchange capacity (+) / 2-5-13 gypsum (+)

جدول ۲- معیارهای ارزیابی قابلیت اراضی
Table 2- Land Capability standards

طبقه (Class)	1	2	3	4	5	وزن Weight (percentage)
معیار (Criterion)						
شیب Slope (percentage)	<5	5-8	8-15	15-30	>30	30
جهت شیب Slope direction	شمالی Northern	جنوبی South	شرقی Eastern	جنوبی South	-	6
عمق خاک Soil depth (cm)	>75	75-50	50-25	10-25	<10	25
مقدار رس Clay (percentage)	20-30	30-40	0-20	>40	-	20
ماده آلی Organic matter (percentage)	>5	3-5	1-3	<1	-	15
ارتفاع از سطح دریا Height above sea level (meters)	0-2300	2300-2700	2700-3000	>3000	-	4

برای این ویژگی‌ها تعیین خواهد شد. مرحله بعدی، جمع‌آوری این n ویژگی برای تعیین درجات تناسب کلی برای پارامتر ارزیابی شده، با در نظر گرفتن شرایط و اهداف مورد نظر است. برای اندازه‌گیری و ارزیابی دو ویژگی بهتر است مدلی انتخاب شود که دو پارامتر را هم‌زمان بررسی کند یا مدل هم‌زمانی^۱ استفاده شود که این مدل‌ها می‌توانند $hard$ یا $soft$ باشند. در روش $hard$ ، همه ورودی‌ها اجباری هستند و باید با هم بررسی شوند و در صورت صفر بودن یکی از ورودی‌ها، خروجی بدون در نظر گرفتن ارزش بقیه پارامترها صفر خواهد بود؛ در حالی که در همبودی نرم^۲، ورودی‌ها اجباری نیستند و صفر بودن یک ورودی الزاماً به صفر شدن تناسب نمی‌انجامد و صرفاً درجه تناسب را کاهش می‌دهد. در برخی زمینه‌ها باید تمام پارامترها در شرایط مطلوبی باشند، در غیر این صورت اراضی برای کاربرد مورد نظر عملکرد مطلوب را نخواهد داشت؛ لذا، از همبودی سخت^۳ استفاده می‌شود (Montgomery et al., 2017).

مدل‌های هم‌زمانی دارای ۶ جمع‌کننده^۴ بودند که همبودی سخت را مدل‌سازی می‌کنند (C , $C++$, $C+$, $C+-$, CA , $C+$) که از ضعیف‌ترین تا قوی‌ترین هم‌ستگی مرتب شده‌اند. در این تحقیق از مدل $C+$ به منظور تأثیر بیشتر همبودی استفاده شده است. (Montgomery et al., 2017) در این روش، جمع‌کننده‌هایی که در شکل آمده است را تابع GCD^5 که با میانگین توان وزنی^۶ اجرا می‌شود می‌گویند (Montgomery et al., 2016b):

$$GCD(X_1, \dots, X_n) = (W_1 X_1^r + \dots + W_n X_n^r)^{1/r} \quad (5)$$

(۲)

$x = t/19$
و اگر دامنه دما بین $19 \leq t \leq 35$ باشد، درجه رضایت‌مندی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x = (35-t)/(35-19) \quad (3)$$

از این رو، ساده‌ترین حدود معیار برای هر مقداری از بارندگی را می‌توان به شکل زیر تعریف کرد:

$$x = \max(0, \min(1, t/19), 0, \max), x \in [0, 1] \quad (4)$$

تابع امتیاز معیارها برای هر ویژگی ورودی به صورت جداگانه‌ای با استفاده از حدود معیار برای آن ویژگی ارزیابی می‌شود. حدود معیار هر ویژگی نشان‌دهنده میزان رضایت بخشی یا تناسبی ویژگی مورد نظر است (Montgomery et al., 2015; Montgomery et al., 2017). به هر ورودی یک تابع فازی عضویت تعلق می‌گیرد که ۰ متعلق به هیچ مجموعه خاصی نیست در حالی که عدد ۱ تناسبی کامل را نشان می‌دهد. حدود معیار برای قابلیت اراضی توسط توابع تناسب انتخاب شده است درجات تناسب در جداول ۲ و ۳، همان حدود معیار اولیه هستند. (Montgomery et al., 2015).

برای ارزیابی تناسب اراضی، معیارها برای ویژگی‌های اقلیم، اقتصاد، دسترسی‌ها، مدیریت و قابلیت اراضی بیان شده‌اند. این پنج دسته‌بندی برای نمایش تأثیر عوامل اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی در ارزیابی اراضی، انتخاب شدند.

ساختار تجمعی LSP

پس از اعمال معیارهای اولیه، به n ویژگی ورودی، درجات تناسب

4- Aggregator
5- Generalized Conjunction/Disjunction
6- Weighted Power Mean (WPM)

1- Simultaneity
2- Soft Partial Conjunction (SPC)
3- Hard Partial Conjunction (HPC)

جدول ۳- حدود معیارهای ورودی
 Table 3- Limits of Input standards

گروه‌بندی Grouping	معیار یا ویژگی {مقدار عددی 1، تناسب 1}. مقدار عدد n، تناسب {n Criterion or attribute { (numeric value 1 , Suitability 1); (value of number n, Suitability of n)}	واحد‌ها و کدها Codes
اقلیم Climate	معیار دما (Temperature criterion) = {0.0, 1, 19, 35, 0} = {0.0, 1, 19, 35, 0} = تنش آبی (Water stress) = {0.0, 1, 20, 35, 0}	°C Water Capacity Ratio
اقتصادی Economical	قیمت محصول (Product cost) = {0.1000, 1, 1300, 1} = عملکرد محصول (Crop yeild) = {0.0, 1, 9, 1}	Toman Ton/Ha
دسترسی‌ها Access	جاده اصلی (Main road) = {0.0, 1, 100, 1, 200, 0} = جاده فرعی (Side road) = {0.0, 1, 25, 0, 700, 0, 1000, 0}	Meters Meters
مدیریت Management	نوع محصول (Product type) = {1.1, 4.0, 1} = کاربری اراضی (Land use) = {0.1, 3, 1}	Wheat (1), Maize (2), Barely (3), others (4) Urban (1), Dry farming (2), irrigated agriculture (3), Range (4), Sailing pasture (5)
	{0.0, 1, 25, 1, 1} = شیب (Slop)	%
	{0.0, 1, 5, 1} = بافت (Texture)	L (5), CL (4), SiCL-SiC (3), C (2), SL (1), LS-S (0)
	{0.0, 1, 70, 1, 12} = سنگ‌ریزه (Gravel)	%
	{0.0, 1, 50, 1, 15} = آهک (lime)	%
	{0.0, 30, 1, 90, 1} = عمق (depth)	cm
قابلیت اراضی Land Capability	{0.7, 1, 15, 1} = آب در دسترس (Available water)	WD-MWD (3), SPD-SWD-SED (2), PD (1), VPD (0)
	{0.0, 1, 3, 1} = زهکشی (Drainage)	
	{0.0, 1, 1, 1, 1, 1.8} = جرم مخصوص ظاهری (Bulk density)	g/cm ³
	{0.0, 3.0, 1, 0.8} = کربن آلی (Organic carbon)	%
	{0.0, 80, 1, 10, 1} = SAR	((mmol c/l) ^.5)
	{0.0, 16, 1, 8, 1} = EC	(ds/m)
	{0.0, 5, 1, 24, 1} = CEC	(cmolc ⁺ /Kg)
	{0.0, 15, 1, 3, 1} = گچ (Gypsum)	%

$$S(X,Y) = \{(1-W_2)[W_1X_{r1} + (1-W_1)Y_{r1}]r_2/r_1 + W_2X_{r2}\}1/r_2 \quad (۶)$$

$$r_1 > 0, r_2 < 0 \quad (۷)$$

$$Y > 0, S(0, Y) = 0 \quad (۸)$$

$$X > 0, S(X, 0) > 0 \quad (۹)$$

$$a > 0, S(X, X+a) = X + \text{reward}, S(X, X-a) = X - \text{penalty} \quad (۱۰)$$

وزن‌ها (W1, W2) و توان‌ها (r1, r2) می‌توانند توسط میانگین امتیاز منفی مطلوب^۳ و میانگین جبران مطلوب^۴ تنظیم شود (Dujmović, 1979).

به‌طور کلی، هر ساختار LSP در این مطالعه، ترکیبی از توابع

در اینجا $GCD(X_1, \dots, X_n)$ نشان‌دهنده تناسب خروجی برای درجات تناسب ورودی $X_1, \dots, X_n$ است. وزن‌های نرمال شده $\sum_{i=1}^n W_i = 1, i=1, \dots, n, 0 < W_i < 1, W_1, \dots, W_n$ اهمیت نسبی ورودی‌های $X_1, \dots, X_n$ را نشان می‌دهد. پارامتر r برای تنظیم درجه هم‌بودی (هم‌زمانی) و جایگزینی^۱ تمام ورودی‌ها استفاده می‌شود. همه ورودی‌ها به همین طریقه در کل ساختار تجمعی، جمع می‌شوند تا جایی که یک مقدار خروجی کل به دست آید. در ترکیب ورودی‌های اجباری و اختیاری، از تابع CPA^۲ استفاده می‌شود (Dujmovic and Larsen, 2007). تناسب خروجی S با اجتماع ورودی اجباری X و ورودی اختیاری Y محاسبه می‌شود (Dragičević et al., 2018):

4- Desired Average Reward

1- Replaceability

2- Conjunctive Partial Absorption

3- Desired Average Penalty

تناسب کم، N برای اراضی نامناسب است. نتایج این روش برای سه محصول گندم، جو و ذرت در **جدول ۴** آمده است.

کاهش تناسب اراضی مورد مطالعه برای محصول گندم ناشی از شور و سدیمی بودن اراضی و وجود سنگریزه سطحی و عمق کم خاک است. این نتایج توسط موسوی و همکاران، سرمیدان و همکاران نیز تأیید شده است (Sarmadian et al., Mousavi et al., 2017). تعیین تناسب اراضی و پتانسیل تولید گندم در خاک‌های شور دشت سروستان نشان داد که استفاده از روش پارامتریک ریشه دوم مناسب‌تر از سایر روش‌ها بوده است و اختلاف مقدار عملکرد واقعی از مقدار تخمین زده شده حدود ۱۰ درصد است (Tashayo et al., 2020). نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق برای محصول جو آبی توسط محققان دیگر نیز این نتایج را تأیید شده است (Sarmadian, Hashem Vand Khiabani et al., 2015, and Keshavarzi, 2011).

باتوجه به معیارها یا امتیازها، نقشه‌های تناسب هر زیرگروه و سپس گروه مربوطه به روش امتیازدهی ترجیحی تهیه شده است. هم‌زمانی از سطح زیر گروه‌ها تا نقشه نهایی در حال افزایش است. برای تهیه نقشه‌های تناسب و قابلیت اراضی از توابع فازی مربوطه در محیط رستری GIS با استفاده از map algebra در ArcMap GIS استفاده شد. در نهایت نقشه به‌دست‌آمده به ترتیب **جدول ۶** به ۷ کلاس طبقه‌بندی این طبقه‌بندی توسط مونتگومری و همکاران برای اراضی مشابه در ایالت کلرادو آمریکا پیشنهاد شد:

نتایج حاصل از تناسب اراضی برای واحدهای جدا شده به روش امتیازدهی منطقی ترجیحی به این صورت است:

مطابق جداول و نقشه‌های ارائه شده، ۱۸ درصد از منطقه مورد مطالعه تناسب غیرقابل قبول یا Unacceptable، ۱۲/۵ درصد دارای تناسب متوسط یا Average، ۱۲/۵ درصد از منطقه دارای تناسب خوب یا Good، ۲۵ درصد از منطقه دارای تناسب خیلی خوب یا Very Good و ۳۱/۲۵ درصد از کل منطقه مطالعاتی در کلاس تناسب عالی یا Excellent قرار دارند. مقادیر فوق، با در نظر گرفتن بخش‌های مرتعی و شوره‌زار و همچنین نوع محصول در تهیه نقشه تناسب به‌دست‌آمده است. بخش‌هایی در شمال و جنوب منطقه دارای کلاس تناسب غیرقابل قبول شده‌اند که در مناطق شمالی دارای شیب بیشتر از ۲۰ درصد و مناطق جنوبی دارای شوری زیادی هستند. در قسمت جنوبی منطقه دسترسی به جاده‌ها مشکل بوده و فاصله زیادی از جاده دارند، از طرفی به علت سطح آب زیرزمینی بالا در فصل‌های

GCD و CPA است تا به طور ریاضی هم‌زمانی، جایگزینی و تجمع نامتقارن^۱ ورودی‌های اجباری و اختیاری نشان دهد. اهمیت معیار هر ورودی در ساختار LSP با وزن‌هایی که در طول عملیات تجمع^۲ استفاده می‌شوند مشخص می‌شود، تأثیر بیشتر پارامترها با مقادیر وزنی بالاتر نشان داده می‌شود.

در این تحقیق اهمیت تمام پارامترها زیاد در نظر گرفته شده؛ لذا فقط از پارامترها اجباری استفاده شده است. مقادیر وزن‌ها در این روش هم از طریق روش‌های سابق ارزیابی تناسب اراضی^۳ (AHP) به‌دست‌آمده است. ساده‌تر است وزن‌ها به صورت درصد بیان شود، در هر جمع‌کننده وزن‌ها نرمال شده و جمع آن‌ها برابر ۱۰۰٪ است. در پردازش داده‌های مکانی و اجرای روش LSP از نرم‌افزار GIS استفاده شده است. توابع فازی همراه با محیط رستری GIS^۴ با استفاده از ابزار map algebra در ArcMap GIS، برای تعمیم نقشه‌های تناسب و قابلیت اجرا شد.

نتایج و بحث

در این تحقیق، به دلیل تحت‌آبیاری در نظر گرفتن اراضی کشاورزی مورد نظر، بارندگی از محاسبات حذف گردید. همچنین دمای منطقه بر اساس میانگین سالانه داده‌های ایستگاه هواشناسی بوئین‌زهر (۱۶ سال) ۱۴/۸۵ درجه سانتی‌گراد است. جهت انجام مطالعات ارزیابی تناسب اراضی، ابتدا با استفاده از کارت تشریح خاک‌رخ‌ها^۵، منطقه مطالعاتی به ۲۹ واحد اراضی بر اساس فامیل^۶ جدا سازی شد. همان‌طور که در **جدول ۴** بیان شد، خاک‌های منطقه مورد مطالعه در سه رده اریدی سول^۷، اینسپتی سول^۸ و انتی سول^۹ قرار گرفتند که در **شکل ۲ا** نشان داده شده است. همچنین تصاویر متعلق به ماهواره Landsat 8 در اکتبر ۲۰۲۰ است.

به‌طور کلی ۳۶ درصد از کل اراضی به صورت شوره‌زار با سطح آب زیرزمینی بالا، مراتع و کاربری نظامی بوده و کاربری کشاورزی ندارند و در جداول تناسب برای آنها عملکردی لحاظ نشده است. اراضی بر اساس ارزیابی قابلیت اراضی به ۶ کلاس تقسیم شدند که ۲۲/۲ درصد در کلاس I، ۱۶/۷ درصد در کلاس II، ۱۱/۱ درصد در کلاس III، ۲۵ درصد در کلاس IV، ۸/۳ درصد در کلاس V، ۱۳/۸ درصد هم در کلاس VI قرار گرفتند.

در این مطالعه ۴ کلاس باتوجه به ساختار مدل فائو، برای تناسب اراضی محصولات در نظر گرفته است که شامل S1 برای اراضی با تناسب بالا، S2 برای اراضی با تناسب متوسط، S3 برای اراضی

6- Family
7- Aridisols
8- Inceptisols
9- Entisols

1- Asymmetric Aggregation
2- Aggregation
3- Analytical Hierarchy Process
4- Raster GIS environment
5- Profil

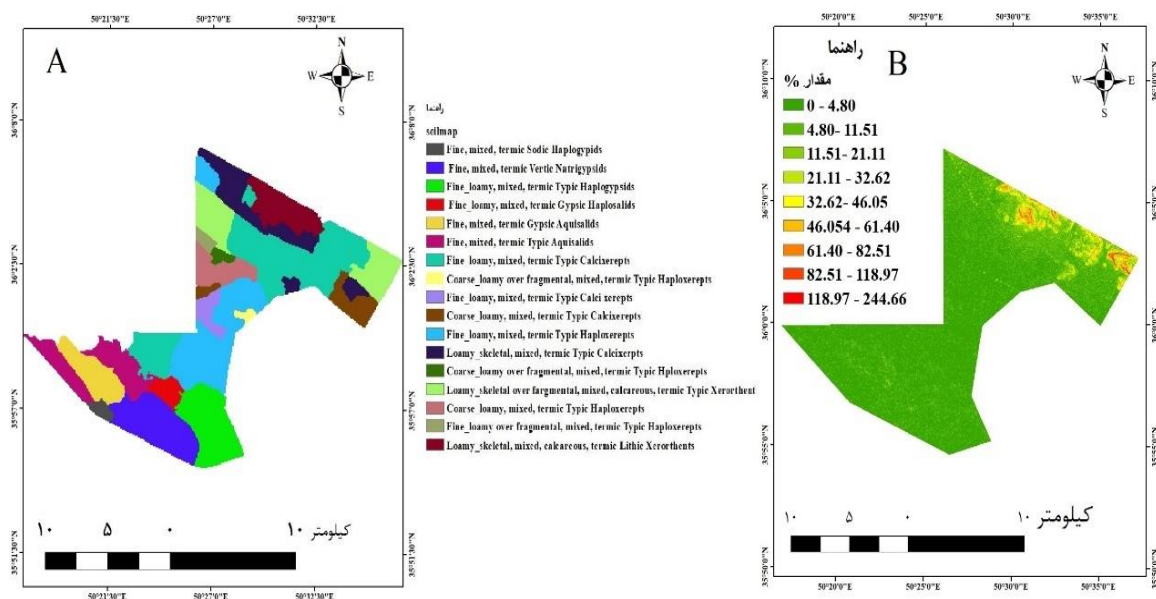
همکاران (Mousavi et al., 2017) تأیید شده است. به‌طور کلی به علت دخالت عوامل اقتصادی و اجتماعی ممکن است تناسب اراضی بعضاً در مواردی کمتر از روش‌های قبلی به دست آید؛ زیرا محدودیت‌های دیگری به جز خصوصیات خاک را نیز در به‌دست‌آوردن تناسب نهایی در نظر می‌گیرند که جدول ۷ نیز بیانگر این امر است.

پرباران عملاً تردد در این مناطق غیرممکن است؛ همچنین میزان گچ، EC و SAR در این منطقه از اراضی به‌شدت زیاد است. در بخش تپه‌ای و شیب‌دار، عمق خاک کم است، درصد سنگ‌ریزه بالایی دارند و در صد آهک بالایی در بخش‌هایی از این مناطق به‌دست‌آمده است، از طرفی تردد ماشین‌آلات و دسترسی به جاده هم کمی مشکل است؛ از این‌رو تناسب کشاورزی در این مناطق به‌شدت کاهش یافته و بیشتر کاربری مرتع برای آنها مشاهده شده است این نتایج توسط موسوی و

جدول ۴- طبقه‌بندی خاک و واحدهای اراضی

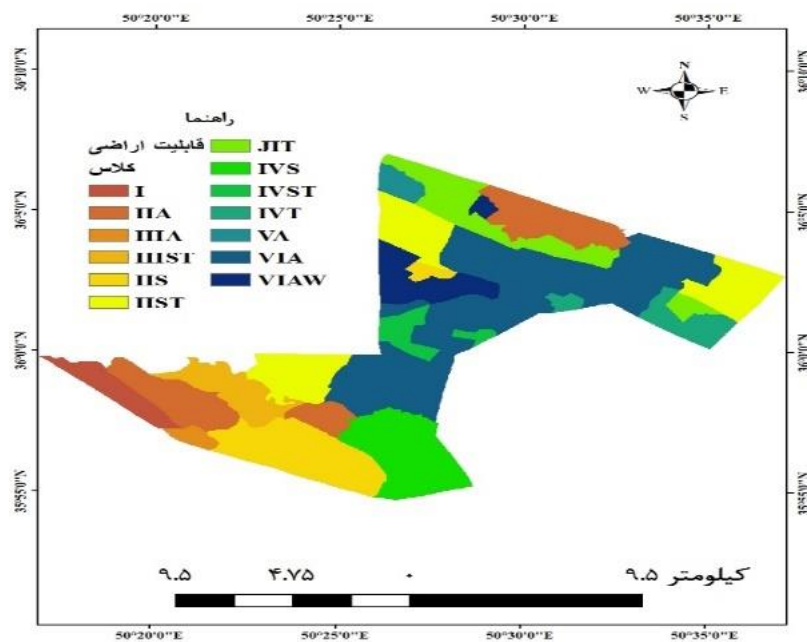
Table 4- Classification of soils and land units

شماره خاک رخ شاهد Witness profile number	رده‌بندی Classification	واحدهای اراضی Land units
6	Fine, mixed, termic Sodic Haplogypsid	1
4	Fine, mixed, termic Vertic Natrigypsid	2
1	Fine loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	3
23	Fine loamy, mixed, termic Gypsic Haplosalids	4
27	Fine, mixed, termic Gypsic Aquisalids	5
24	Fine, mixed, termic Typic Aquisalids	6
25	Fine, mixed, termic Typic Aquisalids	7
40	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	8
35	Coarse loamy over fragmental, mixed, termic Typic Haploxerepts	9
39	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	10
55	Coarse loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	11
36	Fine loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	12.1
41	Fine loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	12.2
54	Fine loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	12.3
7	Loamy skeletal, mixed, termic Typic Calcixerepts	13
9	Loamy skeletal, mixed, termic Typic Calcixerepts	14
8	Coarse loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	15.1
52	Coarse loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	15.2
30	Coarse loamy over fragmental, mixed, termic Typic Haploxerepts	16
11	Loamy skeletal over fragmental, mixed, calcareous, termic Typic Xerorthents	17.1
10	Loamy skeletal over fragmental, mixed, calcareous, termic Typic Xerorthents	17.2
31	Coarse loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	18.1
58	Coarse loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	18.2
33	Fine loamy over fragmental, mixed, termic Typic Haploxerepts	19
34	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.1
49	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.2
12	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.3
50	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.4
13	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.5
21	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	21
48	Loamy skeletal over fragmental, mixed, calcareous, termic Typic Xerorthents	22
16	Loamy skeletal, mixed, calcareous, termic Lithic Xerorthents	23.1
19	Loamy skeletal, mixed, calcareous, termic Lithic Xerorthents	23.2
46	Fine loamy, mixed, termic Typic Haploxerepts	24
45	Loamy skeletal, mixed termic, Typic Calcixerepts	25
60	Fine loamy, mixed, termic Typic Calcixerepts	20.6



شکل ۲- A- طبقه‌بندی شیب منطقه، B- نقشه واحدهای اراضی

Figure 2- A- Slope, B- Land units



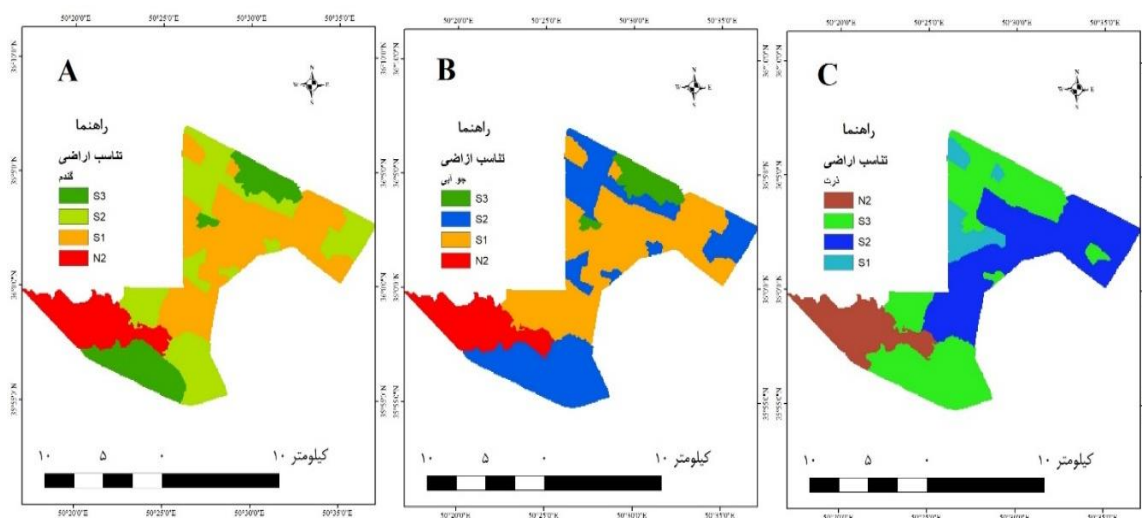
شکل ۴- نقشه ارزیابی قابلیت اراضی برای زراعت آبی

Figure 4- Land Capability Classification for Irrigation Agriculture

جدول ۵- نتایج تناسب ارزیابی اراضی به روش ریشه دوم برای سه محصول گندم، جو و ذرت

Table 5- Results of land suitability assessment by square root method for three crops of wheat, barley and corn

محصول (Product)	جو آبی	گندم آبی پاییزه	ذرت
تناسب اراضی (Land suitability)	Irrigated Barely	Irrigated wheat	Corn
□□ (تناسب بالا) High suitability	%36	%32	%20
□□ (تناسب متوسط) Medium suitability	%36	%36	%34
□□ (تناسب کم) Low suitability	%12	%16	%36
□ (نامناسب) Unsuitable	%16	%16	%20



A: گندم B: جو آبی C: ذرت

(A: Wheat, B: Barley, C: Corn)

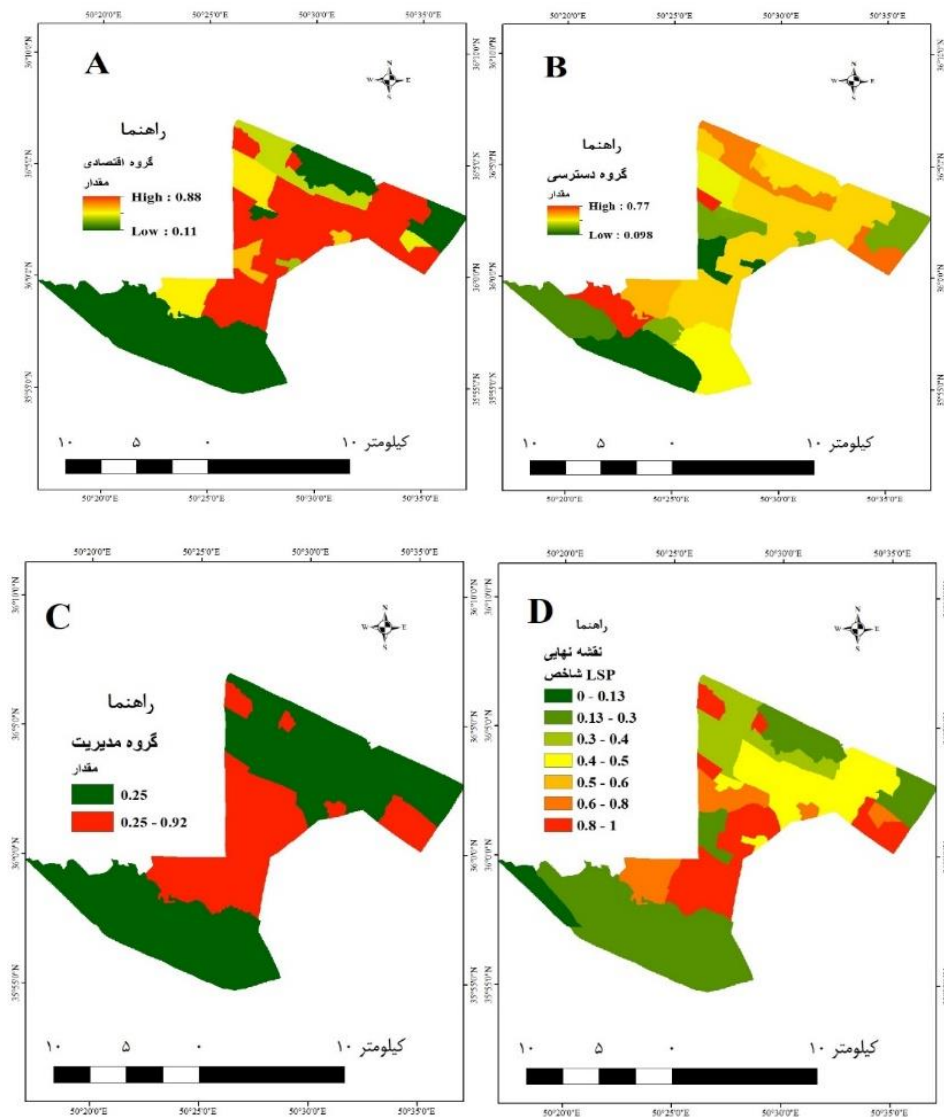
شکل ۳- نقشه نهایی تناسب اراضی به روش ریشه دوم

Figure 3- Final map of land suitability by square root method

جدول ۶- کلاس‌های تناسب اراضی به روش امتیازدهی ترجیحی (Montgomery et al., 2015)

Table 6- Land suitability classes LSP method (Montgomery et al., 2015)

کلاس تناسب اراضی	دامنه تناسب برای اراضی
Class of land suitability	Range of land suitability
تناسب غیرقابل قبول (Unacceptable Suitability)	0-0.13
تناسب خیلی ضعیف (Very Poor Suitability)	0.13-0.3
تناسب ضعیف (Poor Suitability)	0.3-0.4
تناسب متوسط (Average Suitability)	0.4-0.5
تناسب خوب (Good Suitability)	0.5-0.6
تناسب خیلی خوب (Very Good Suitability)	0.6-0.8
تناسب عالی (Excellent Suitability)	0.8-1



شکل ۵- A- نقشه تناسب گروه مسائل اقتصادی B- نقشه تناسب گروه دسترسی C- نقشه تناسب گروه مدیریت D- نقشه نهایی تناسب منطقه به روش LSP

Figure 5- A- Suitability of economic issues B- Suitability of access group C- Suitability of management group D- Final map of area suitability by LSP method

جدول ۷- مقایسه روش USDA و LSP

Table 7- Comparison of LSP and USDA methods

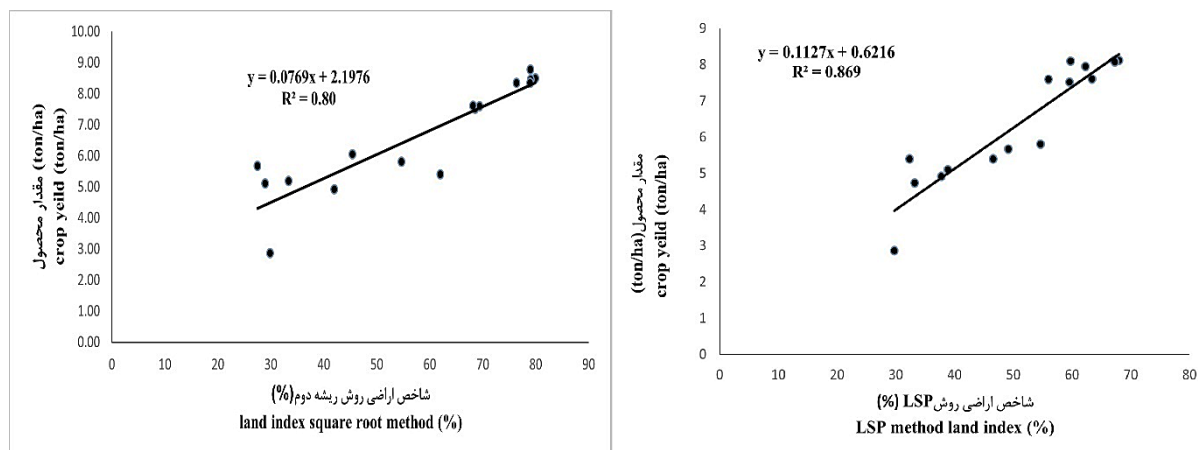
کلاس‌های قابلیت اراضی Land capability classes	ارزیابی قابلیت به روش LSP Capability assessment by LSP method	کلاس‌های قابلیت اراضی Land suitability classes for USDA	ارزیابی قابلیت به روش USDA Capability assessment by USDA method
Excellent	52.7	I	22.2
Very Good	11.8	II	16.7
Good	8.3	III	11.1
Average	-	-	-
Poor	8.3	IV	25
Very Poor	-	V	8.3
Unacceptable	19.4	VI	13.8

مقایسه مقادیر شاخص تنا سب اراضی روش ریشه دوم و ارزش ترجیحی روش LSP با مقادیر واقعی عملکرد محصول ذرت در منطقه مطالعاتی در **شکل ۶** نشان داده شده است که برای روش ریشه دوم مقدار R^2 برابر ۰/۸ و RMSE برابر ۰/۷۷ است، برای روش LSP مقدار R^2 برابر ۰/۸۷ و RMSE برابر ۰/۶۳ است.

فهم و درک روابط معیارها با یکدیگر و مقدار تأثیری که هر معیار بر روی قابلیت اراضی برای کاربری‌های مختلف دارد در روش LSP بهتر تبیین شده است. همچنین روش LSP مبتنی بر GIS ابزاری مناسب برای ایجاد معیارهای دقیق، منعطف و منطقی قابل توجیه در ارزیابی قابلیت و تنا سب اراضی نسبت به روش‌های قدیمی در حوزه کشاورزی است. روش LSP قادر است تعداد بسیار بیشتری از معیارهای ورودی را نسبت به روش‌های متداول دیگر مانند روش ریشه دوم در بر بگیرد. باید در نظر داشت که انتخاب وزن‌های مختلف می‌تواند تفاوت‌های قابل توجهی در نقشه‌های خروجی با روش LSP ایجاد کند. روش LSP حساس و درعین حال انعطاف‌پذیر است و در صورتی که دقت داده‌ها و تعداد پارامترها کم باشد ممکن است عملکرد خوبی نداشته باشد، این نتایج توسط مونتگومری و همکاران نیز تأیید شده است (Montgomery et al., 2015، Montgomery et al., 2017).

دقت روش امتیازدهی منطقی ترجیحی در تنا سب اراضی از روش پارامتریک بیشتر است؛ زیرا در روش این نقشه‌های تنا سب اراضی منطقه توسط جمع‌کننده‌های منطقی به دست می‌آیند و نقشه خروجی نتیجه تمام پارامترها و محدودیت‌هایی است که ممکن است منطقه مورد نظر داشته باشد. در روش پارامتریک این مسئله در خصوصیات خاک و شرایط آب‌وهوایی خلاصه می‌شود، این نتایج توسط لوان و همکاران (Luan et al., 2021) و مونتگومری و همکاران (Montgomery et al., 2015) نیز حاصل شد.

اگر بتوان تناسب S1 با تناسب عالی یا Excellent یکی فرض کرد؛ ۲۸ درصد منطقه مطالعاتی در روش پارامتریک برای محصول گندم، ۳۶ درصد آن برای محصول جو و ۲۰ درصد برای محصول ذرت، در حالت تحت آبیاری دارای تناسب بالا است. همه محصولات فوق در روش امتیازدهی منطقی ترجیحی در ۳۱/۲۵ درصد از کل منطقه مورد مطالعه دارای تناسب بالا یا عالی هستند. این مقدار برای ذرت و گندم افزایش داشته؛ ولی برای جو ۵ درصد از اراضی مناسب کاهش یافته است. نوع محصول در نقشه گروه مدیریت اعمال شده و نقشه تناسب هر محصول به طور جداگانه تهیه شد. نقشه گروه مدیریت با پهنه‌بندی کلی جمع شده و در تنا سب نهایی اثر گذاشت. اراضی با تناسب غیرقابل قبول یا N در روش پارامتریک برای گندم، جو، ذرت به ترتیب ۱۶-۲۰ درصد به دست آمد. همین تناسب در روش امتیازدهی منطقی ترجیحی برای محصولات مربوطه ۱۸ درصد به دست آمد.



شکل ۶- رابطه بین شاخص اراضی محاسبه شده و مقدار عملکرد واقعی

Figure 6- The relationship between the calculated land index and the actual yield value

نتیجه گیری

در این پژوهش بر اساس چهارچوب تناسب اراضی روش ریشه دوم و روش LSP تناسب اراضی محصولات آبی (ذرت، گندم، جو) تعیین شد. واحدهای فیزیوگرافی دشت دامنه‌ای و فلات با شیب و ارتفاع کم که عمدتاً دارای هدایت الکتریکی بالایی هستند در کلاس تناسب بحرانی و واحدهای فیزیوگرافی کوه و تپه با شیب زیاد و عمق

کم خاک در کلاس تناسب نامناسب قرار گرفتند. نتایج حاصل از مقایسه عملکرد و اعتبارسنجی با پارامترهای آماری (R^2 , RMSE) محاسبه شده، دو مدل ریشه دوم و LSP برای محصول ذرت در اراضی مورد مطالعه نشان داده که نتایج حاصل از روش LSP نسبت به روش ریشه دوم همبستگی بیشتری با مقدار محصول برداشت شده را نشان می‌دهد.

منابع

- Ahmadi, O., Alamdari, P., Servati, M., & Khoshzaman, T. (2021). Investigate the suitability and capability of lands using parametric methods to achieve sustainable development. *Geography and Development Iranian Journal* 18(61): 1-28.
- Cheshire, L., & Woods, M. (2013). Globally engaged farmers as transnational actors: Navigating the landscape of agri-food globalization. *Geoforum* 2013 44: 232-242.
- Dujmović, J.J. (1979). *Partial absorption function*. Publikacije Elektrotehničkog fakulteta. Serija Matematika i fizika, 156-163.
- Dujmović, J.J., & Larsen, H.L. (2007). Generalized conjunction/disjunction. *International Journal of Approximate Reasoning* 46: 423-446.
- Dujmović, J.J., De Tré, G., & Van de Weghe, N. (2010). LSP suitability maps. *Soft Computing* 14(5): 421-434.
- Dragičević, S., & Hatch, K. (2018). Urban geosimulations with the Logic Scoring of Preference method for agent-based decision-making. *Habitat International* 72: 3-17.
- Dragičević, S., Dujmović, J., & Minardi, R. (2018). Modeling urban land-use suitability with soft computing: the GIS-LSP method. In *GeoComputational analysis and modeling of regional systems* (pp. 257-275). Springer, Cham.
- El Baroudy, A.A. (2016). Mapping and evaluating land suitability using a GIS-based model. *Catena* 140: 96-104.
- Hashem Vand Khianani, P., Sarmadian, F., & Afraz, S. (2015). Investigating the suitability of blue corn products using GIS and AHP in Qazvin plain lands. *International conference on Modern Research in Agricultural Science and Environment*. Malaysia – Kuala Lumpur.
- Hatch, K., Dragičević, S., & Dujmović, J. (2014). Logic scoring of preference and spatial multicriteria evaluation for urban residential land use analysis. In *International Conference on Geographic Information Science* (pp. 64-80). Springer, Cham.
- Lennox, E. (2015) Double Exposure to Climate Change and Globalization in a Peruvian Highland Community. *Society & Natural Resources* 28: 781-796.
- Luan, C., Liu, R., & Peng, S. (2021). Land-use suitability assessment for urban development using a GIS-based soft computing approach: A case study of Ili Valley, China. *Ecological Indicators* 123: 107333. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107333>.
- Møller, A.B., Mulder, V.L., Heuvelink, G., Jacobsen, N.M., & Greve, M.H. (2021). Can we use machine learning for agricultural land suitability assessment?. *Agronomy* 11(4): 703.
- Montgomery, B., Dragičević, S., & Dujmović, J. (2015). A soft computing logic method for agricultural land suitability evaluation. In *Proceedings of GeoComputation 2015 Conference*. Dallas, USA (pp. 298-304).
- Montgomery, B., & Dragičević, S. (2016 a). Comparison of GIS - based Logic Scoring of preference and multicriteria evaluation methods: urban land use suitability. *Geographical Analysis* 48(4): 427-447.
- Montgomery, B., Dragičević, S., Dujmović, J., & Schmidt, M. (2016 b). A GIS-based Logic Scoring of Preference method for evaluation of land capability and suitability for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 124: 340-353.
- Montgomery, B., Dragičević, S., & Dujmović, J. (2017). Using soft computing logic and the logic scoring of preference method for agricultural land suitability evaluation. In *Advances in Geocomputation* (pp. 217-227). Springer, Cham.
- Mosleh, Z., Salehi, M.H., Jafari, A., Mehnatkesh, A., & Esfandiarpour Borujeni, I. (2017). Assessing the performance of digital mapping approaches for the qualitative land suitability evaluation (a case study: Shahrekord Plain, ChaharmahalVa-Bakhtiari Province). *Journal of Water and Soil* 32(1): 87-99. (In Persian with English abstract)
- Mousavi, S.R., Sarmadian, F., & Taati, A. (2017). Land suitability evaluation for irrigation alfalfa in some Qazvin plain with FAO method and Geographic Information System. 15th Iranian Soil Science Congress, Isfahan, <https://>

- civilica.com/doc/729488
20. Mulder, V.L., van Eck, C.M., Friedlingstein, P., Arrouays, D., & Regnier, P. (2019). Controlling factors for land productivity under extreme climatic events in continental Europe and the Mediterranean Basin. *Catena* 182: 104124. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104124>.
21. Sarmadian, F., Moravvej, K., Mahmoodi, SH., & Ebrahimi-khomami, S.M.R. 2003. An investigation of land suitability evaluation for irrigated crop, using remote sensing and geographical information system techniques in parts of Varamin Plain. *Iranian, Joalur Agriculture Science* 34(4). (In Persian with English abstract)
22. Sarmadian, F., Keshavarz A., & Asgari, M.S. (2009). *Land suitability assessment for irrigated wheat in Takestan region using fuzzy set theory*, 11th Iranian Soil Science Congress, Gorgan. (In Persian)
23. Sarmadian, F., & Keshavarzi, A. (2011). Investigating the efficiency of fuzzy set theory in assessing land Suitability for irrigated wheat in Qazvin Province using hierarchical analysis and multivariate regression Process Methods. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 42(2): 199-207. (In Persian)
24. Shen, S., Dragičević, S., & Dujmović, J. (2021). GIS. LSP: A soft computing logic method and tool for geospatial suitability analysis. *Transactions in GIS* 25(3): 1228-1248. <https://doi.org/10.1111/tgis.12768>.
25. Singha, C., & Swain, K.C. (2016). Land suitability evaluation criteria for agricultural crop selection: A review. *Agriculture Revolution* 37: 125–132.
26. Storie Earl, R. (1976). *Storie index rating*. Division of agriculture science university of Callifornia special pub. 3203.
27. Tashayo, B., Honarbakhsh, A., Azma, A., & Akbari, M. (2020). Combined fuzzy AHP–GIS for agricultural land suitability modeling for a watershed in southern Iran. *Environmental Management* 66(3): 364-376.



Effect of Soil Amendments on Physiological Responses of *Lycium depressum* Stocks to Drought Stress

S. Mohammadi¹, A. Sepehry², M. Farzam^{3*}, H. Barani⁴

Received: 16-05-2022

Revised: 14-06-2022

Accepted: 17-08-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Mohammadi, S., Sepehry, A., Farzam, M., & Barani, H. (2022). Effect of Soil Amendments on Physiological Responses of *Lycium depressum* Stocks to Drought Stress. *Journal of Water and Soil* 36(4): 477-491. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.76508.1163](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.76508.1163)

Introduction

The aim of the present study was to investigate the effect of soil conditioners on physiological responses (stomatal resistance, leaf temperature, chlorophyll, percentage of root colonization, carotenoids, proline) of *Lycium depressum* Stocks to drought stress. The experiments were performed in semi-controlled greenhouse conditions.

Materials and Methods

The experiment was conducted as a factorial experiment based on a completely randomized design including the main factor, irrigation at 4 levels (100, 75, 50 and 25% of field capacity) and the sub-factor of soil conditioners. In each combined treatment, 5 repetitions of irrigation and soil remediation and a total of 160 pots were used. Subsoil treatments including hydrogel and nitrobacter, mycorrhiza and zeolite were added to each pot. Five hundred cuttings of the target plant were planted in the greenhouse. The grown cuttings were transferred to the pots where the experiments were carried out. At each irrigation level, 40 pots containing 4 kg of vegetation soil of the target species were considered and the field capacity (FC) of the target soil was determined in the soil laboratory. A total of 160 pots were placed in the greenhouse for testing. The main treatment of the experiment included irrigation levels (100, 75, 50 and 25% of the FC) and sub-treatments of soil conditioners including Stacosorb hydrogel in the amount of 3 grams per kilogram of soil in each pot in the lower part of the plant roots. Zeolite with the industrial name of mineral zeolite (Mineral Zeolite) was added in the amount of 8 grams in each pot in the lower part of the root of the plant. Nitrobacter (a collection of strains of *Azotobacter* sp, *Azospirillum* sp and *Bacillus* sp with the brand name Nitrobacter Diane) was added to the amount of 3 mL in each pot in the upper region of the plant roots. Addition of mycorrhiza (the mycorrhiza used in this experiment was *Glomus mosseae* and was prepared as soil containing *mosseae* fungi) in the amount of 10 grams per pot in the lower part of the plant roots. After adding soil conditioners, irrigation was done according to the FC in 4 irrigation levels, in the determined treatments.

Results and Discussion

Measurement of physiological characteristics showed different responses in each of the variables. Carotenoid changes in 50% irrigation showed the lowest value ($p < 0.05$) and the control treatment without mycorrhiza showed the highest value in the measurement of chlorophyll and carotenoid at 100 and 75% irrigation levels. The results of measuring colonization percentage, stomatal resistance and leaf temperature showed the lowest value in 25% irrigation. In the control treatment, proline parameters and root colonization percentage increased

1, 2 and 4- Ph.D. Student, Professor and Associated Professor at Department of Rangeland Science, Gorgan University of Agricultural and Natural Resources, respectively.

3- Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad

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

under the influence of drought stress, and stomatal resistance parameters, leaf temperature and chlorophyll decreased under the influence of drought stress. With intensification of drought stress, chlorophyll and carotenoid contents of the plant increased and the amount of proline decreased in Nitrobacter treatment with mycorrhiza, which was significantly different from the control treatment. In the control treatment with mycorrhiza, with increasing drought stress, the leaf temperature increased and the amount of proline decreased, which was different from the control treatment. Aperture resistance decreased from 48 m²/mol.s at 100% irrigation level to 44 m²/mol.s at 25% irrigation. The leaf temperature in the hydrogel modifier without mycorrhiza decreased from 26°C at 100% irrigation to 21.57°C at 25% irrigation level. In the treatment of zeolite without mycorrhiza, the amount of chlorophyll b+a increased from 0.6 mg/g at 100% irrigation to 1.20 mg/g at 25% irrigation. The amount of carotenoid in zeolite modifier with mycorrhiza at 100% irrigation level increased from 0.1 mg/g to 0.2 mg/g at 25% irrigation. In the control treatment with mycorrhiza at 100% irrigation level compared to 50% irrigation level, 1.5% increase in root colonization was observed. The amount of proline in mycorrhiza-free hydrogel treatment were 2.77 µmol/g and 2.66 µmol/g at 100% and 50% irrigation levels, respectively. Reduction of proline at 50% irrigation level indicates that the hydrogel modifier has increased the resistance of *Lycium depressum* Stocks to drought stress.

Conclusion

The results of this study showed that the increase in drought causes changes in the physiological function of the plant and the use of soil conditioners under drought stress due to the improvement of the physiological parameters, will increase the resistance of the plant by 50%. Nitrobacter treatments without mycorrhiza, hydrogel and zeolite with mycorrhiza and without mycorrhiza, due to further improvement of physiological parameters, are recommended for plants in nature.

Keywords: Chlorophyll, Colonization, Irrigation, Proline, Stomatal resistance

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۹۱-۴۷۷

اثر اصلاح کننده‌های خاک بر پاسخ‌های فیزیولوژیک درختچه مرتعی کام تیغ (*Lycium depressum* Stocks) به تنش خشکی

سمانه محمدی^۱ - عادل سپهری^۲ - محمد فرزاد^{۳*} - حسین بارانی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

چکیده

پژوهش حاضر با هدف اثر اصلاح کننده‌های خاک، بر پاسخ‌های فیزیولوژیک (مقاومت روزنه‌ای، دمای برگ، کلروفیل، درصد کلونیازسیون ریشه، کاروتنوئید، پرولین) درختچه مرتعی کام تیغ (*Lycium depressum* Stocks) به تنش خشکی بود. آزمایش‌ها در شرایط نیمه کنترل شده گلخانه‌ای انجام شد. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی شامل تیمار اصلی آبیاری در ۴ سطح (۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد ظرفیت زراعی) و تیمار فرعی اصلاح کننده‌های خاک بررسی شد. تیمارهای فرعی اصلاح کننده‌های خاک شامل هیدروژل و نیتروباکتر، میکوریزا و ژئولیت در هر گلدان اضافه شد. در هر تیمار ترکیبی آبیاری و اصلاح کننده خاک ۵ تکرار و در مجموع ۱۶۰ گلدان برای انجام آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. مقدار مقاومت روزنه‌ای از ۴۸ متر مربع در ثانیه بر مول در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد به ۴۴ متر مربع در ثانیه بر مول در آبیاری ۲۵ درصد کاهش پیدا کرد. دمای برگ در اصلاح کننده هیدروژل بدون میکوریزا از ۲۶ درجه سانتی‌گراد در آبیاری ۱۰۰ درصد به ۲۱/۵۷ درجه سانتی‌گراد در سطح آبیاری ۲۵ درصد کاهش یافت. در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح کننده ژئولیت بدون میکوریزا مقدار کلروفیل $b+a$ از ۰/۶ میلی‌گرم بر گرم به ۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم در آبیاری ۲۵ درصد افزایش پیدا کرد. مقدار کاروتنوئید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح کننده ژئولیت با میکوریزا از ۰/۱ میلی‌گرم بر گرم به ۰/۲ میلی‌گرم بر گرم در آبیاری ۲۵ درصد افزایش یافت. در تیمار شاهد با میکوریزا در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در مقایسه با سطح آبیاری ۵۰ درصد، درصد کلونیازسیون ریشه ۱/۵ درصد افزایش داشت. مقدار پرولین در تیمار هیدروژل بدون میکوریزا در آبیاری ۱۰۰ درصد ۲/۷۷ میکرومول بر گرم و در سطح آبیاری ۵۰ درصد ۲/۶۶ میکرومول بر گرم اندازه‌گیری شد. کاهش پرولین در سطح آبیاری ۵۰ درصد نشان می‌دهد اصلاح کننده هیدروژل باعث افزایش مقاومت گونه *L. depressum* به تنش خشکی شده است. نتایج تحقیق نشان داد افزایش خشکی باعث تغییرات در عملکرد فیزیولوژیک گیاه می‌شود و کاربرد مواد اصلاح کننده خاک در شرایط تنش خشکی به دلیل بهبود پارامترهای فیزیولوژیک، باعث افزایش ۵۰ درصدی مقاومت گیاه خواهد شد. تیمارهای نیتروباکتر بدون میکوریزا، هیدروژل و ژئولیت با میکوریزا و بدون میکوریزا به دلیل بهبود بیشتر پارامترهای فیزیولوژیک، برای کاشت گیاه در در طبیعت توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، پرولین، کلروفیل، کلونیازسیون، مقاومت روزنه‌ای

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب دانشجوی دکتری، استاد و دانشیار گروه مرتع‌داری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۳ - استاد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد
* - نویسنده مسئول: (Email: mjankju@um.ac.ir)

مقدمه

در سال‌های اخیر، گونه کام تیغ *Lycium depressum* به عنوان یکی از گونه‌های هدف در برنامه‌های اصلاح و احیاء مراتع شور و قلیایی مورد استفاده قرار گرفته است و ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه کام تیغ *L. depressum* مانند تحمل به خشکی و شوری آن را به گیاهی ایده آل برای بیابان‌زدایی و کاهش درجه ی شوری خاک تبدیل کرده است. پوشش گیاهی و تولید زیتوده این اکوسیستم‌ها در حال کاهش است. این موضوع منجر به فرسایش خاک و تغییر در کیفیت خاک شده است (Fedai and Parvizi, 2017). کشت گونه‌های بوته‌ای و درختچه‌ای به عنوان راهکاری مدیریتی برای بهبود عملکرد اکوسیستم‌های مرتعی توسط کشورهای جهان مورد استفاده قرار گرفته است و تنش خشکی یکی از مهمترین عوامل محدودکننده رشد و استقرار گیاهان در عرصه‌های طبیعی است (Jalali and Khademian, 2021). تنش خشکی با تاثیر روی میزان فتوسنتز گیاه و کاهش رنگریزه‌های فتوسنتزی باعث کاهش عملکرد گیاه می‌شود (Ehsanzadeh and Gholami, 2018). تنش خشکی باعث تولید اکسیژن فعال همراه با کاهش و تجزیه کلروفیل می‌شود. (Sheeran and Hertmani, 2021). به منظور بررسی اثر سطوح آبیاری و باکتری‌های محرک رشد بر عملکرد و برخی شاخص‌های فیزیولوژی (Watan Dost et al., 2018) نشان دادند که محدودیت آبی عملکرد هدایت روزنه‌ای، محتوای کلروفیل را کاهش و محتوای پرولین را افزایش می‌دهد و کاربرد ژئولیت در تمامی سطوح کم آبیاری سبب افزایش طول بوته، طول میوه، عملکرد میوه، کلروفیل و کاروتنوئید شد (Broushki et al., 2021). نتایج تحقیق (Agushi and Qajar, 2014) نشان داد کاربرد ژئولیت در سطوح مختلف رطوبتی سبب افزایش معنی‌داری بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه سویا می‌شود. مصرف ۸ گرم ژئولیت در یک کیلوگرم خاک علاوه بر تولید عملکرد بالاتر می‌تواند در خاک‌هایی با بافت سبک سبب حفظ و نگهداری رطوبت خاک شود و از کاهش عملکرد جلوگیری نماید. پرولین آزاد بسیاری از گیاهان در پاسخ به پتانسیل پایین آب مثل خشکی و شوری به مقدار زیاد تجمع می‌یابد (Sheeran and Hertmani, 2021) در شرایط کمبود آب تولید پرولین آزاد افزایش می‌یابد که سبب کاهش پتانسیل آبی محلول خاک و افزایش فشار اسمزی شیره سلول می‌شود (Fateh and Surkhi, 2018). ابوالحسنی و همکاران (Abolhasani et al., 2018) در نتایج تحقیق خود نشان دادند تثبیت نیتروژن، باعث افزایش جذب عناصر مغذی و همچنین تولید هورمون‌های گیاهی و رشد اندام‌های هوایی گیاهان شده که با حفاظت ریشه گیاهان از عوامل بیماری‌زا، سبب افزایش کمیت و کیفیت محصولات می‌شود. بروشکی و فاخری (Broushki

and Fakheri, 2021) نشان دادند که کاربرد زیولیت سبب افزایش وزن تر و خشک میوه، قطر میوه و تعداد میوه در بوته شد و کم آبیاری اثر کاهشی بر صفات ذکر شده شد. کوهستانی و عسکری (Kohistani and Askari, 2016) به این نتیجه رسیدند کاربرد هیدروژل‌های سوپر جاذب در کاهش اثرات سوء ناشی از تنش خشکی موثر است. نتایج خلیلی و توسلی (Khalili and Tavasli, 2021) نشان داد که در شرایط آبیاری نرمال و کاربرد توام قارچ و هیدروژل بیش‌ترین مقادیر صفات ارتفاع بوته، تعداد میوه در بوته، عملکرد نهایی میوه، وزن خشک اندام هوایی و ریشه، محتوی نسبی آب برگ و کارایی مصرف آب حاصل شد. مطالعات شریفیان و همکاران (Sharifian et al., 2021) نشان داد، برگ گونه کام تیغ خصوصیات کیفیت علوفه نسبتاً مناسبی بویژه در بخش فیبر و پروتئین را از خود نشان می‌دهد. شریفیان و همکاران (Sharbati et al., 2016) به این نتیجه رسیدند که بذر گونه کام تیغ جزء بذور مقاوم در برابر تنش شوری و خشکی است و از این گونه می‌توان در مناطق شور و خشک جهت اصلاح و احیای مراتع استفاده کرد. در مطالعه شریفیان و همکاران (Sharifian et al., 2021). گونه کام تیغ را به عنوان یکی از گونه‌های مرتعی مقاوم به خشکی و شوری و ارزشمند در مراتع معرفی کردند و این گونه را به عنوان تغذیه‌ای مناسب در رژیم غذایی حیات وحش معرفی کردند.

اثر اصلاح کننده‌های خاک بر پاسخ‌های فیزیولوژیک درختچه مرتعی *L. depressum* برای افزایش آگاهی و دانش در مورد خصوصیات گونه و برنامه‌ریزی جهت عملیات اصلاحی و احیایی ضروری است. یکی از برنامه‌های اصلی اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان پیشروی در طرح‌ها و پروژه‌های کشت گونه های مرتعی با حمایت صندوق توسعه ملی برای مقابله با بیابان‌زایی و جلوگیری از گسترش کانون ریزگردها در استان با بکارگیری دامنه متنوعی از گونه‌های مرتعی و غیرمرتعی است. پژوهش حاضر بر روی گونه *L. depressum* با هدف مطالعه تغییرات فیزیولوژیک در مقابل تنش خشکی و بررسی اثر اصلاح کننده‌های خاک بر پاسخ‌های فیزیولوژیکی گونه *L. depressum* در شرایط گلخانه‌ای بود.

مواد و روش‌ها

معرفی گونه هدف

گونه کام تیغ (*L. depressum*) را با نام فارسی دیوخار ترکمنی، گیاهی پایا، چندساله، درختچه‌ای خاردار به ارتفاع ۱/۵ تا ۲/۵ متر، صاف و بدون کرک معرفی کردند. کام تیغ درختچه‌ای است خزان پذیر که تا ۴ متر نیز رشد می‌کند. این گونه‌ها از ویژگی‌های رویشی سریع، سیستم ریشه‌ای خوب توسعه یافته و سازگاری گسترده به خشکی و

اندازه‌گیری تغییرات فیزیولوژی گونه *Lycium depressum* Stocks

مقاومت روزنه‌ای و دمای برگ با استفاده از دستگاه Leaf Porometer اندازه‌گیری مقاومت روزنه‌ای و دمای برگ قرائت شد. اندازه‌گیری کلروفیل و کاروتنوئید به روش آرنون (۱۹۶۷) انجام گرفت. کلونیزاسیون ریشه قبل و بعد از اعمال تیمارها با روش مالیباری و همکاران (۱۹۸۸) و تعیین درصد کلونیزاسیون ریشه توسط پردازش تصویر با نرم‌افزار JMV^۱ انجام شد. اندازه‌گیری پرولین به روش Bathes (۱۹۷۳) انجام شد. این اندازه‌گیری‌ها بعد از اتمام اعمال سطوح آبیاری به مدت ۶۰ روز انجام گرفت. بدین منظور گونه *L. depressum* از کل ۱۶۰ گلدان آزمایشی به آزمایشگاه انتقال یافت.

نتایج و بحث

پاسخ‌های فیزیولوژیک درختچه مرتعی کام تیغ (*Lycium depressum*) به تنش خشکی

یافته‌های جدول ۱ نشان می‌دهد که بین هر یک از پارامترهای فیزیولوژیک اندازه‌گیری شده در هر یک از مواد اصلاح‌کننده خاک اختلاف معنی‌داری ($p < 0.05$) وجود دارد. مقدار مقاومت روزنه‌ای از ۴۸ متر مربع در ثانیه بر مول در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد به ۴۴ متر مربع در ثانیه بر مول در آبیاری ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است، این کاهش نشان می‌دهد که اصلاح‌کننده نیتروباکتر با میکوریزا در افزایش مقاومت این گونه گیاهی موفق عمل کرده است (شکل ۱). دمای برگ در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح‌کننده هیدروژل بدون میکوریزا از ۲۶ درجه سانتی‌گراد به ۲۱/۵۷ درجه سانتی‌گراد در آبیاری ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. این کاهش دما مربوط به اثر مثبت هیدروژل در پایین نگه داشتن دمای برگ در تنش خشکی است. در تیمار نیتروباکتر بدون میکوریزا نیز کاهش دمای برگ از ۲۷ درجه سانتی‌گراد در آبیاری ۱۰۰ درصد به ۲۲ درجه سانتی‌گراد در آبیاری ۲۵ درصد است که نشان می‌دهد نیتروباکتر در افزایش مقاومت گیاه به خشکی نقش موثری داشته است (شکل ۲).

تغییرات کلروفیل $b+a$ برگ گیاه کام تیغ *L. depressum* تحت تاثیر سطوح مختلف آبیاری و مواد اصلاح‌کننده نشان داد در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح‌کننده زئولیت بدون میکوریزا مقدار کلروفیل $b+a$ از ۰/۶ میلی‌گرم بر گرم به ۱/۲۰ میلی‌گرم بر گرم در آبیاری ۲۵ درصد افزایش پیدا کرده است. این افزایش نشان می‌دهد زئولیت باعث افزایش مقدار کلروفیل و افزایش مقاومت به تنش

برداشت و کاشت قلمه‌ها در گلخانه

این تحقیق در گلخانه دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست دانشگاه فردوسی مشهد انجام گرفت. برداشت ۵۰۰ عدد قلمه از ۱۰ پایه مادری گیاه هدف از محل رشد طبیعی آن در اسفند ماه ۹۸ واقع در دانشگاه فردوسی مشهد، در مختصات جغرافیایی $36^{\circ} 18' 27.3''$ و $59^{\circ} 32' 9.8''$ شمالی و $36^{\circ} 18' 27.3''$ شرقی انجام شد. قلمه‌ها در گلخانه در داخل گلدان‌های نایلونی حاوی خاک رس قرار گرفت.

طرح آزمایش و سطوح آبیاری

تیمار اصلی آزمایش، سطوح آبیاری شامل: ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی در نظر گرفته شد (Haq Nazari et al., 2019). سطوح آبیاری با اندازه‌گیری ظرفیت زراعی خاک رویشگاهی گیاه مورد مطالعه در آزمایشگاه با محاسبه میانگین ظرفیت زراعی تیمار شاهد و تبدیل آن به ظرفیت زراعی تنش اعمال شد. به این روش که با استفاده از دستگاه رطوبت‌سنج، رطوبت ۱۶۰ گلدان در ۴ سطح آبیاری به طور متوالی اندازه‌گیری شدند، با نزدیک بودن میانگین ظرفیت زراعی تیمار شاهد با ظرفیت زراعی تنش، آبیاری انجام گرفت. تجزیه و تحلیل آماری این پژوهش با روش طرح آزمایشی پلات‌های خرد شده در مکان، با یک تیمار اصلی (سطوح آبیاری) و یک تیمار فرعی (اصلاح‌کننده‌های خاک) انجام شد. در هر واحد آزمایش (سطوح آبیاری) تیمار اصلی آزمایش و تیمارهای فرعی، اصلاح‌کننده‌های خاک شامل: میکوریزا، هیدروژل، نیتروباکتر و زئولیت بود. تیمارها شامل: شاهد بدون میکوریزا، شاهد با میکوریزا، هیدروژل بدون میکوریزا، هیدروژل با میکوریزا، زئولیت بدون میکوریزا، زئولیت با میکوریزا، نیتروباکتر بدون میکوریزا، نیتروباکتر با میکوریزا و هر کدام از تیمارها ۵ تکرار و در مجموع ۱۶۰ تکرار بود.

افزودن مواد اصلاح‌کننده خاک در گلدان‌ها

نیتروباکتر (Kafi et al., 2018) مقدار ۳cc در هر گلدان در ناحیه فوقانی ریشه گیاه کام تیغ اضافه گردید. افزودن هیدروژل (هیدروژل استاکوزورب و به مقدار ۳ گرم در هر کیلوگرم خاک) (Azimi et al., 2017)، زئولیت (با نام صنعتی زئولیت معدنی (Mineral Zeolite) و به مقدار ۸ گرم (Agushi and Qajar, 2014) و افزودن مایکوریزا و به مقدار ۱۰ گرم در هر گلدان (Amirian and Kochaki, 2013) در قسمت تحتانی ریشه درختچه مرتعی کام تیغ اضافه گردید. استفاده از اصلاح‌کننده‌ها به صورت ترکیبی بود.

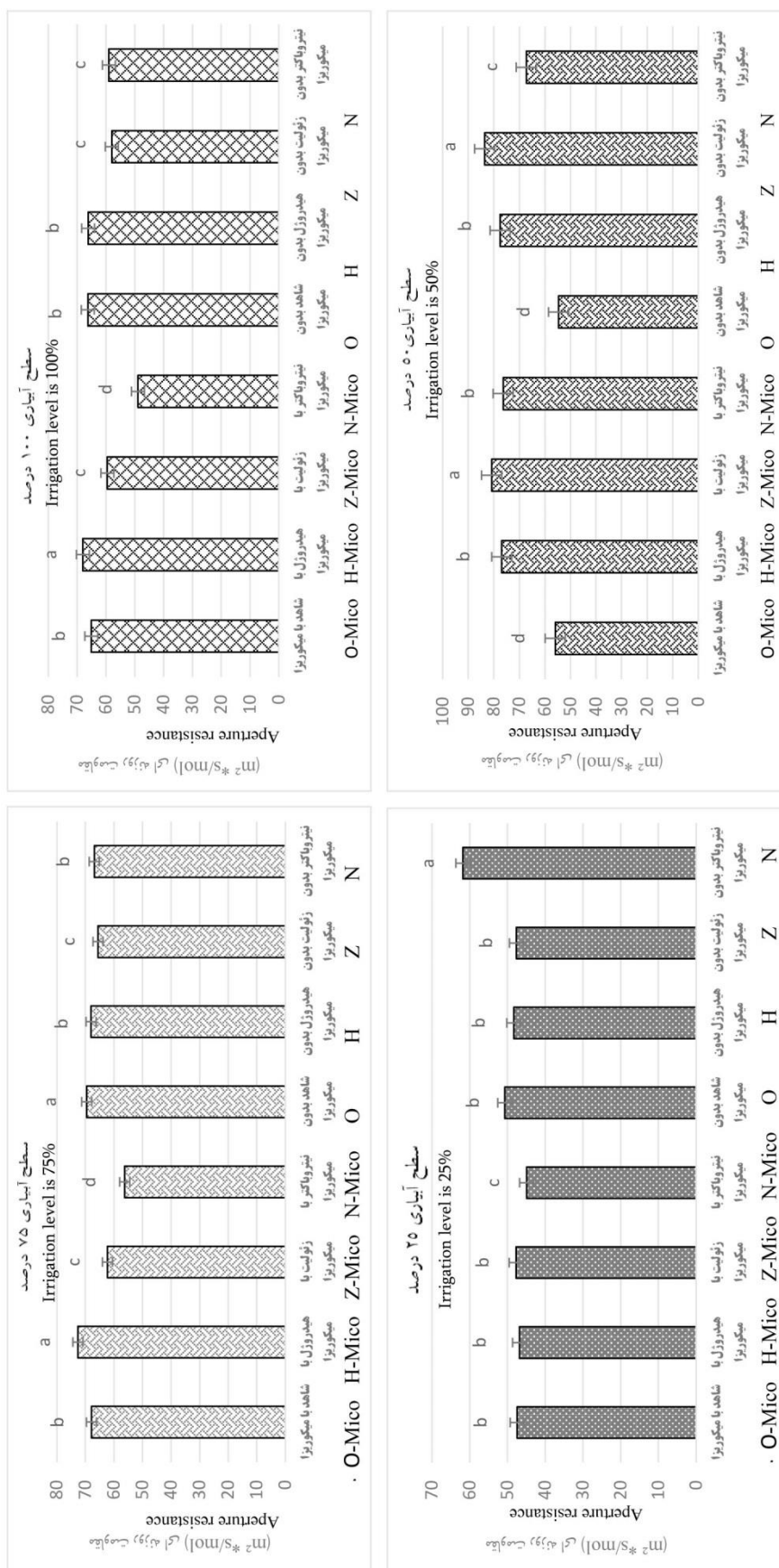
یافته است که نشان دهنده اثر مثبت این اصلاح کننده ترکیبی در گیاه و مقاومت در برابر تنش خشکی شده است (شکل ۴).

خشکی در گونه مورد مطالعه شده است (شکل ۳). اندازه گیری کاروتنوئید برگ گیاه نشان داد مقدار کاروتنوئید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح کننده ژئولیت با میکوریزا از ۰/۱ میلی گرم بر گرم به ۰/۲ میلی گرم بر گرم در آبیاری ۲۵ درصد افزایش

جدول ۱- تجزیه واریانس پاسخ های رویشی درختچه کام تیغ در ۴ سطح آبیاری

Table 1- ANOVA (mean squares) of the physiological responses of the razor blade shrub in 4 levels of irrigation

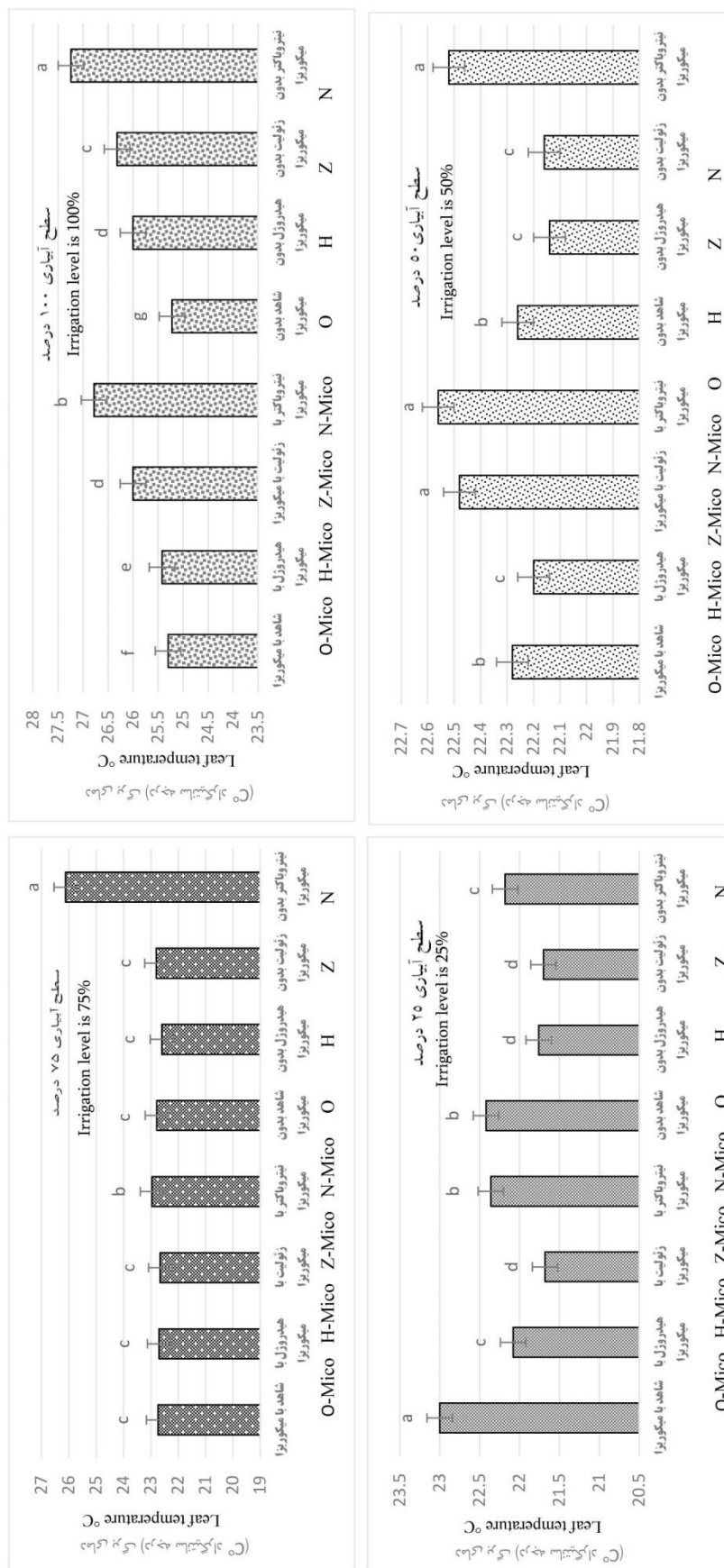
مقاومت روزنه ای Aperture resistance	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	3	201.355	124.350	618.473	138.552	47.325**	17.191**	67.252**	21.247**
خطا Error	32	4.255	7.233	9.196	6.521				
کل Total	39								
دمای برگ leaf temperature	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	7	2.624	7.162	.143	1.015	1.312**	153.602**	19.764**	102.767**
خطا Error	32	.002	.047	.007	.010				
کل Total	39								
کلروفیل b+a Chlorophyll b+a	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	7	.246	.246	.498	.183	5.882**	5.882**	23.716**	4.389**
خطا Error	32	.042	.042	.021	.042				
کل Total	39								
کاروتنوئید Carotenoid	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	7	.007	.007	.012	.008	4.878**	4.878**	11.964**	19.262**
خطا Error	32	.001	.001	.001	.000				
کل Total	39								
درصد کلونیزاسیون ریشه Root colonization percentage	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	3	1.354	1.354	3.946	1.354	130.068**	130.068**	857.861**	86.653**
خطا Error	16	.010	.010	.010	.002				
کل Total	19								
پرولین Proline	df	MS				F			
		100%	75%	50%	25%	100%	75%	50%	25%
تیمار Treatment	7	.025	.025	.019	.023	13.222**	13.936**	3.447**	2.138 ^{ns}
خطا Error	32	.002	.002	.006	.011				
کل Total	39								

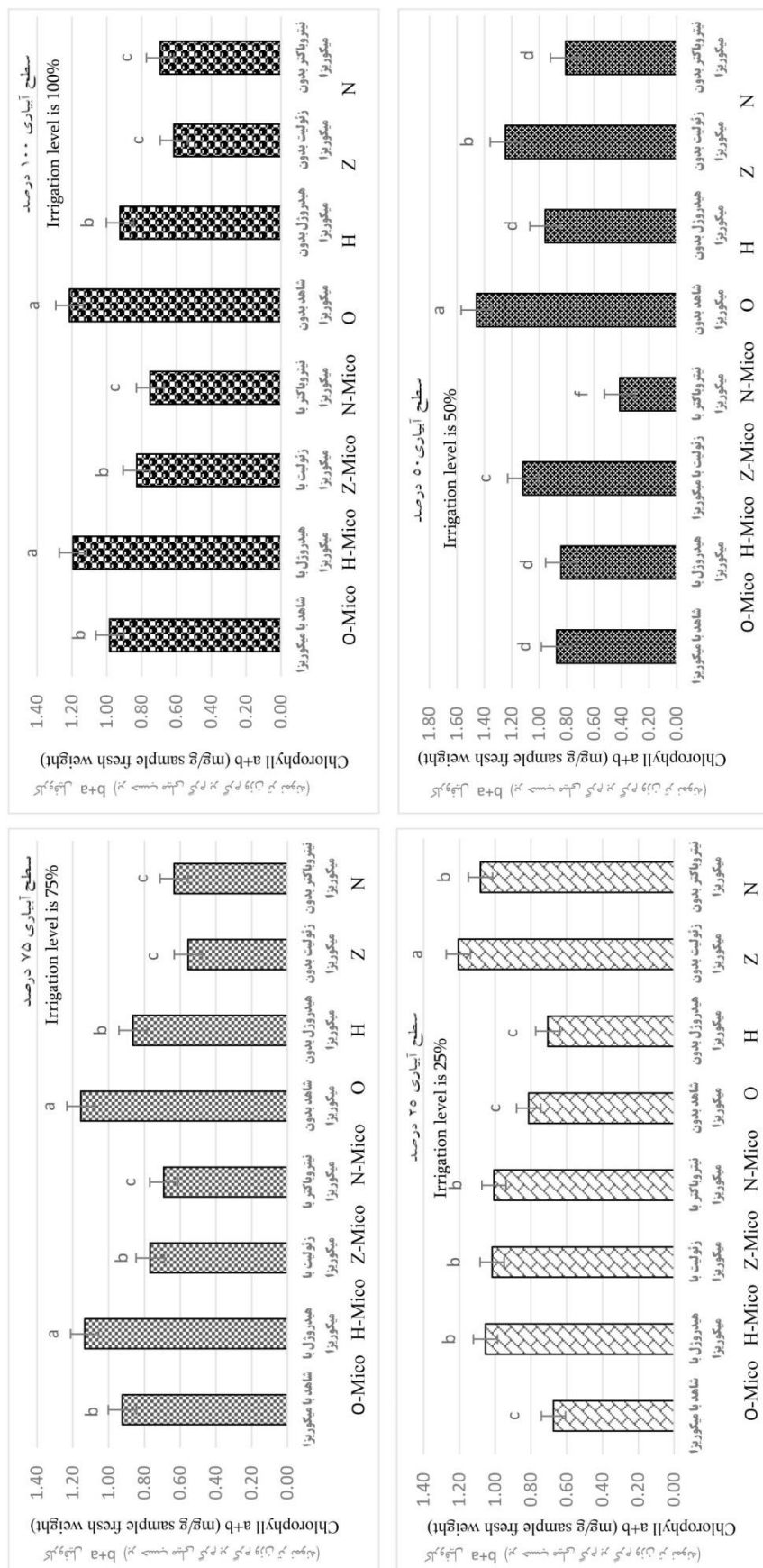


شکل ۱- مقایسه مقاومت روزنه‌ای در اصلاح کننده‌های خاک در ۴ سطح آبیاری

حروف کوچک انگلیسی مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) مابین تیمارها است.

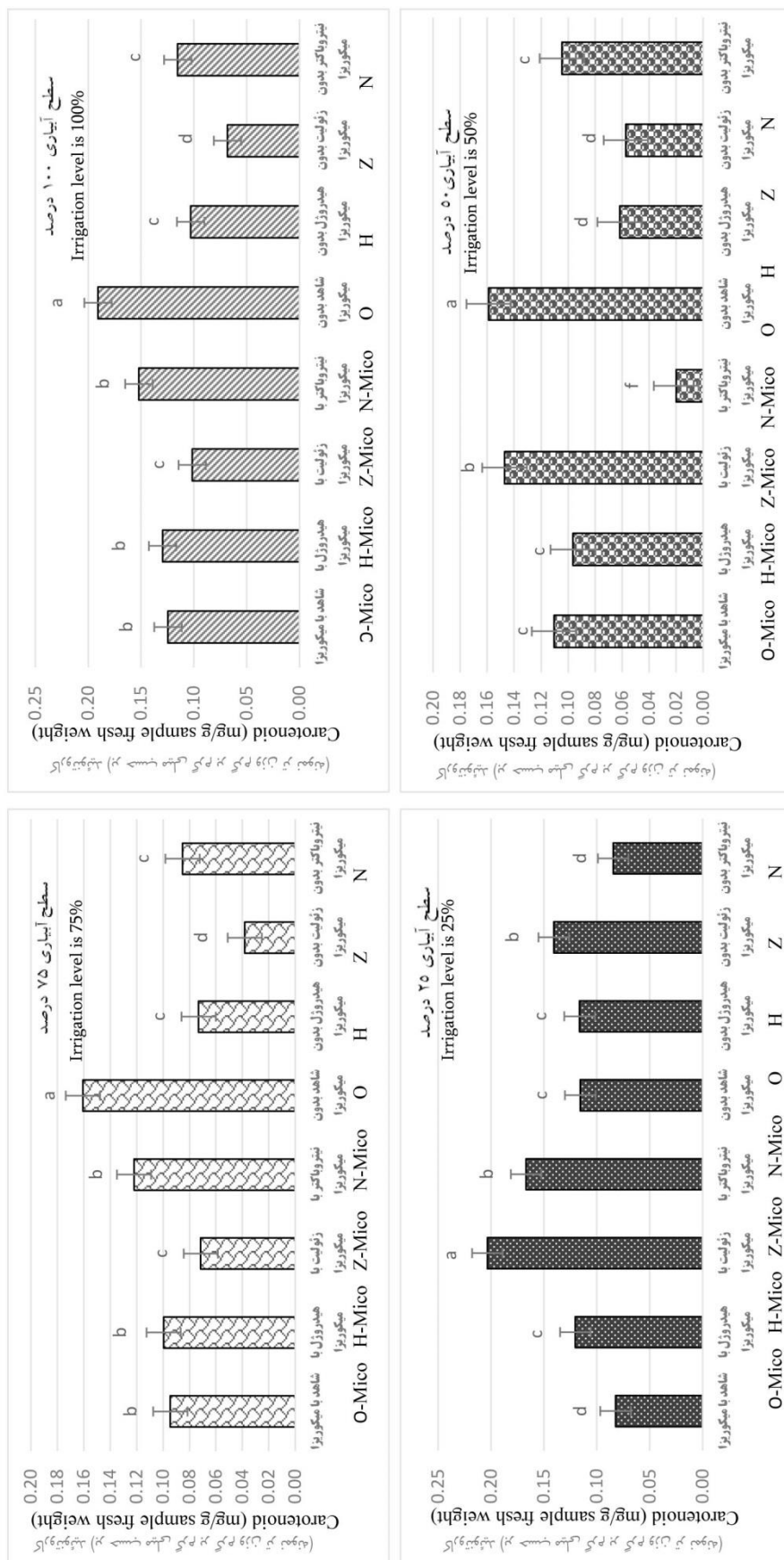
Figure 1- Comparison of stomatal resistance in soil conditioners at 4 irrigation levels
Similar English lowercase letters indicate no significant difference ($p < 0.05$) between treatments



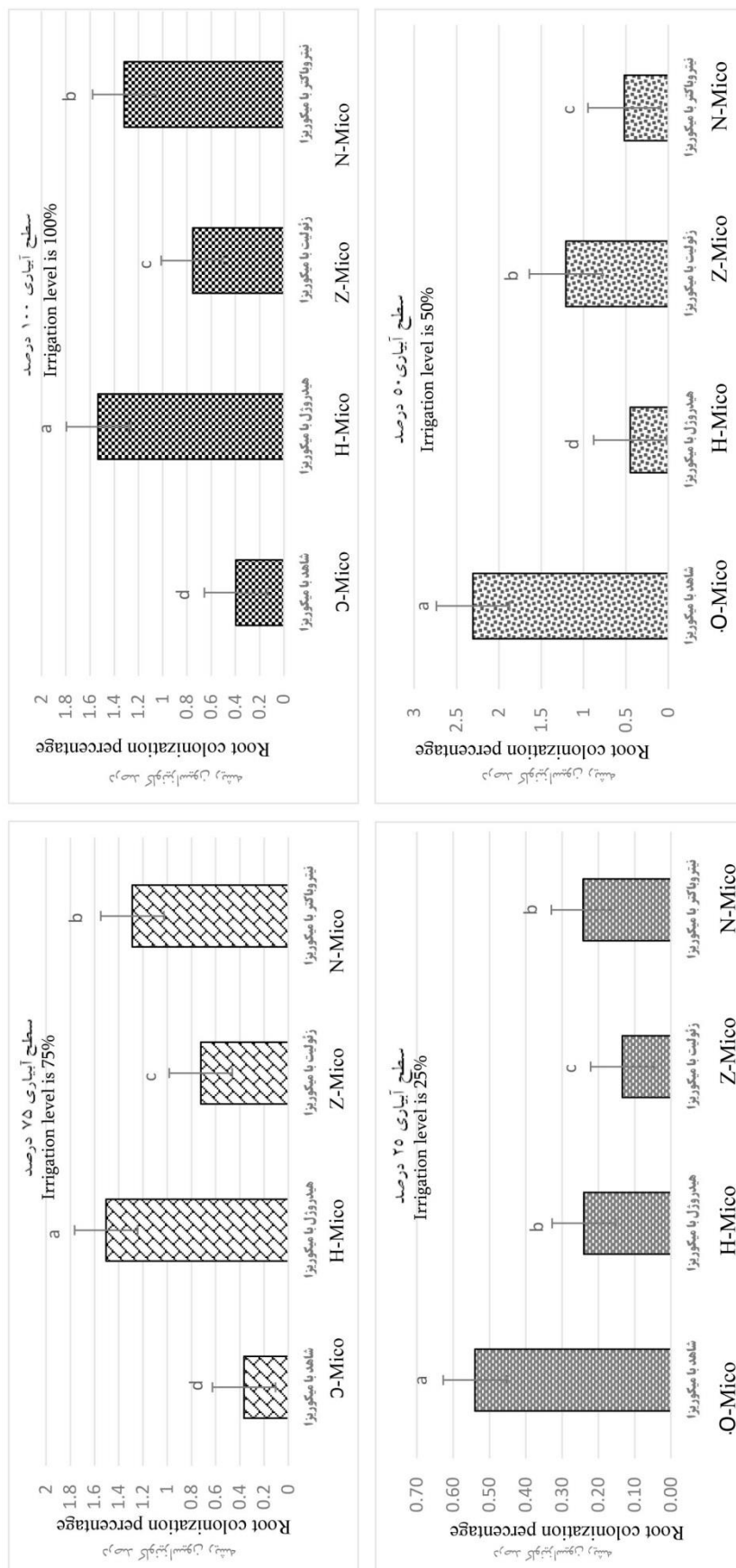


شکل ۳- مقایسه کلروفیل b+a در اصلاح کننده های خاک در ۴ سطح آبیاری
حروف کوچک انگلیسی مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی دار ($p < 0.05$) مابین تیمارها است.

Figure 3- Comparison of chlorophyll b+a in soil conditioners at 4 irrigation levels
Similar English lowercase letters indicate no significant difference ($p < 0.05$) between treatments

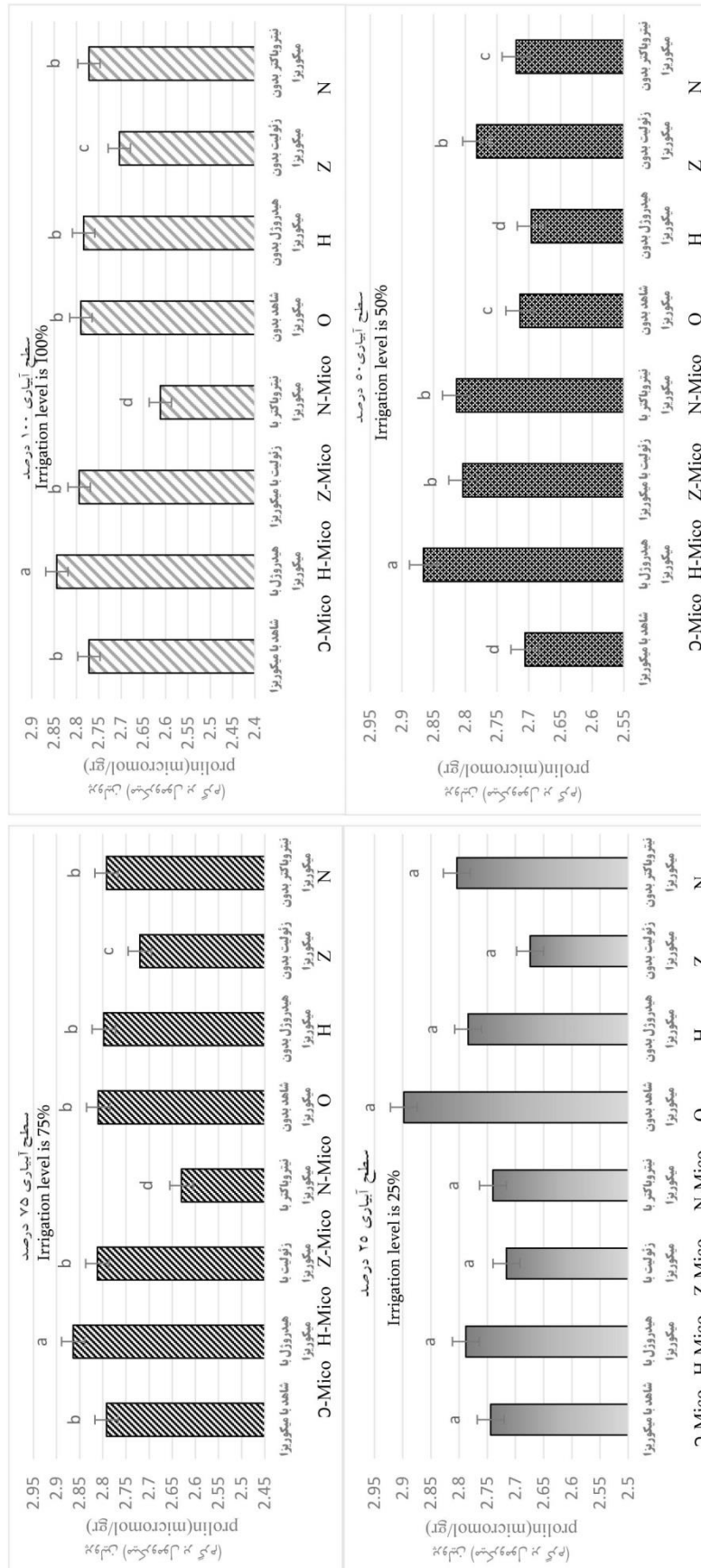


شکل ۴- مقایسه کاروتنوئید در اصلاح کننده‌های خاک در ۴ سطح آبیاری
 حروف کوچک انگلیسی مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) مابین تیمارها است.
Figure 4- Comparison of carotenoids in soil conditioners at 4 irrigation levels
 Similar English lowercase letters indicate no significant difference ($p < 0.05$) between treatments



شکل ۵- مقایسه درصد کلونیزاسیون ریشه در اصلاح کننده‌های خاک در ۴ سطح آبیاری
حروف کوچک انگلیسی مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) مابین تیمارها است.

Figure 5- Comparison of root colonization percentage in soil conditioners at 4 irrigation levels
Similar English lowercase letters indicate no significant difference ($p < 0.05$) between treatments



شکل ۶- مقایسه پرولین در اصلاح کننده‌های خاک در ۴ سطح آبیاری

حروف کوچک انگلیسی مشابه نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار ($p < 0.05$) مابین تیمارها است.

Figure 6- Comparison of proline in soil conditioners at 4 irrigation levels

Similar English lowercase letters indicate no significant difference ($p < 0.05$) between treatments

بحث و نتیجه‌گیری

به طور کلی اندازه‌گیری خصوصیات فیزیولوژی پاسخ‌های متفاوتی در هر یک از متغیرها نشان داد. نتایج تحقیق نشان داد افزایش خشکی باعث تغییرات در عملکرد فیزیولوژیک گیاه می‌شود و کاربرد مواد اصلاح کننده خاک در شرایط تنش خشکی به دلیل بهبود پارامترهای فیزیولوژیک، باعث افزایش ۵۰ درصدی مقاومت گیاه به خشکی خواهد شد. در اصلاح کننده ژئولیت بدون میکوریزا مقدار کلروفیل $b+a$ از $0/6$ میلی گرم بر گرم به $1/20$ میلی گرم بر گرم در آبیاری ۲۵ درصد افزایش پیدا کرده است که با نتایج موسوی فر، خزائی و کافی، (Mousavi Far et al., 2017) و زهنگ و همکاران (Zhang et al., 2018) همخوانی دارد.

در تیمار شاهد با میکوریزا در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در مقایسه با سطح آبیاری ۵۰ درصد، درصد کلونیزاسیون ریشه ۱/۵ درصد افزایش داشته است (Kafi et al., 2016) (Jalali et al., 2012; Broshki et al., 2021). دمای برگ در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح کننده هیدروژل بدون میکوریزا از ۲۶ درجه سانتی گراد به ۲۱/۵۷ درجه سانتی گراد در آبیاری ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است. این کاهش دما مربوط به اثر مثبت هیدروژل در پایین نگه داشتن دمای برگ در تنش خشکی است که با نتایج کوهستانی و عسکری (Kohestani and Askari, 2018) همخوانی دارد. در تیمار نیتروباکتر بدون میکوریزا نیز کاهش دمای برگ از ۲۷ درجه سانتی گراد در آبیاری ۱۰۰ درصد به ۲۲ درجه سانتی گراد در آبیاری ۲۵ درصد است که نشان می‌دهد نیتروباکتر در افزایش مقاومت گیاه به خشکی نقش موثری داشته است که با نتایج آجوشی و قاجار (Agushi and Qajar, 2014) و زهنگ (Zhang et al., 2013) همخوانی دارد.

مقدار کاروتنوئید در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد در اصلاح کننده ژئولیت با میکوریزا از $0/1$ میلی گرم بر گرم به $0/2$ میلی گرم بر گرم در

منابع

1. Akhiani, H., & Ghorbanli, M. (1993). A contribution to the halophytic vegetation and flora of Iran. *Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plants* 1: 35-44. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1858-3>.
2. Abolhasani, M., Lakzian, A., Joharchi, M. and Jafari, H., Akhgari, A., 1389. The effect of drought stress on the nitrogen fixation system of Sinorhizobium bacteria and the accumulation of compatible metabolites in Alfalfa (*Medicago sativa* sp.) plant, Bami. *Journal of Water and Soil* 24(3): 416-407. (In Persian with English abstract)
3. Agushi, M., Qajar, M., & Bahmanyar, M. (2014). The effect of zeolite application on the quantitative and qualitative performance of soybeans under moisture stress and non-moisture stress conditions. *Journal of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources* 22(2): 173-187.
4. Amrian, M., Yusuf Thani, M., & Kochaki, A. (2014). The effect of inoculation with mycorrhizal species and irrigation levels on growth characteristics, yield, water use efficiency and some traits of corn plants. *Journal of Agricultural Ecology* 6(1): 152-133. (In Persian with English abstract)
5. Arabic, Z., & Kaboosi, K. (2014). The effect of different levels of irrigation and superabsorbent hydrogel on the morphological characteristics, yield and essential oil of anise plant. *Crop Production Journal* 8(4): 59-78. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60847-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60847-9).

آبیاری ۲۵ درصد افزایش یافته است (Sheeran and Hertmani, 2021; Naji et al., 2017). مقدار مقاومت روزنه‌ای از ۴۸ متر مربع در ثانیه بر مول در سطح آبیاری ۱۰۰ درصد به ۴۴ متر مربع در ثانیه بر مول در آبیاری ۲۵ درصد کاهش پیدا کرده است، این کاهش نشان می‌دهد که اصلاح کننده نیتروباکتر با میکوریزا در افزایش مقاومت این گونه گیاهی موفق عمل کرده است که با نتایج سجادی و توسلی (Sajadi and Tosali, 2021) همسو است.

مقدار پرولین در تیمار هیدروژل بدون میکوریزا در آبیاری ۱۰۰ درصد ۲/۷۷ میکرومول بر گرم و در سطح آبیاری ۵۰ درصد ۲/۶۶ میکرومول بر گرم است. کاهش پرولین در سطح آبیاری ۵۰ درصد نشان می‌دهد اصلاح کننده هیدروژل باعث افزایش مقاومت گونه *L. depressum* به تنش خشکی شده است که با نتایج عربی و کابوسی (Arabi and Kaboosi, 2014) و فخریمی و معتمدی (Pollini et al., 2019; Fakhimi and Motamedi, 2020) همخوانی دارد.

نتایج تحقیق نشان داد که کاربرد کودهای زیستی هیدروژل، ژئولیت، میکوریزا و نیتروباکتر در شرایط تنش خشکی به دلیل بهبود پارامترهای فیزیولوژیک، باعث افزایش ۵۰ درصدی مقاومت گیاه در شرایط کم آبی خواهد شد و تیمارهای نیتروباکتر بدون میکوریزا، هیدروژل و ژئولیت با میکوریزا و بدون میکوریزا به دلیل بهبود بیشتر پارامترهای فیزیولوژیک، برای کاشت گیاه در در طبیعت توصیه می‌شود و استفاده از اصلاح کننده‌های خاک و تأثیر آن بر روی تغییرات پاسخ‌های فیزیولوژی گونه نسبت به تنش خشکی موجب تسریع در کشت گونه کام تیغ *L. depressum* و پیش‌بینی رفتارهای فیزیولوژی این گیاه جهت تکثیر در اقلیم استان خراسان رضوی خواهد شد و اداره‌های منابع طبیعی و آبخیزداری و تمامی ارگان‌های مرتبط با کشت گونه کام تیغ *L. depressum* می‌توانند از نتایج این تحقیق به منظور بهبود پروژه‌های کشت استفاده کنند.

6. Azimi, S., Khoshrosh, M., Darzi, A., & Abedinpour, M. (2017). Evaluation of the effect of different amounts of natural and artificial soil conditioners on biological performance and grain yield of wheat. *Iran Water and Soil Research* 49(3): 682-673. (In Persian with English abstract)
7. Behrman Sharifian, A., Sepehri, A., & Barani, H. (2021). Investigating the physical and chemical properties of the soil of the habitat of the species of *Lycium depressum* Stocks. in saline and alkaline pastures in the north of Golestan province, Iran, *Journal of Biological Protection Plant Biome* 9(2): 62-47.
8. Binkley, D.A.N., & Giardina, C. (1998). Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree-soil interactions. In Plant-induced soil changes. *Processes and feedbacks* 8(3): 89-106.
9. Broushki, M., & Fakheri, B. (2021). Evaluation of the application of zeolite on the quantitative and qualitative characteristics of the medicinal plant Karla in low irrigation conditions. *Iranian Journal of Horticultural Sciences* 52(1): 35-46. (In Persian with English abstract). <http://dx.doi.org/10.22059/ijhs.2021.282202.1649>.
10. Chamanara, S., & Kazemeini, A. (2016). Efficient multiscale approach for the integration of continuous multi-functional green infrastructure in Tehran city, Iran. *International Journal of Urban Sustainable Development* 8(2): 174-190. <https://doi.org/10.1080/19463138.2016.1171773>.
11. Ehsanzadeh, P., & Gholami, A. (2018). Physiological, antioxidant and performance response of three fennel genotypes to external application of proline under moisture stress conditions. *Quarterly Journal of Plant Process and Function* 8(4): 1-18. <https://doi.org/20.1001.1.23222727.1398.8.32.17.5>.
12. Fakhimi, E., & Motamedi, J. (2020). Effect of mining activities on structure and function of rangeland ecosystem using the landscape function analysis. *Journal of Rangeland Science* 10(3): 291-301.
13. Fateh, M., & Surkhi, F. (2018). The effect of drought stress on leaf area index, photosynthesis, stomatal conductance and proline content in two varieties of bean. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences* 12(2): 389-399.
14. Fedai, A., & Parvizi, Y. (2017). The effect of induction of mycorrhizal fungus strains and phosphorus on the growth and phytochemical compounds of cucumber under drought stress conditions. *Quarterly Journal of Medicinal Plants* 17(2): 1-4.
15. Ghanbarian, G., & Yazdanpanah, Z. (2017). Effect of phenological stages on chemical composition of *Platychaete aucheri* Boiss. as an important endemic shrub in Iran. *Iranian Journal of Science and Technology* 41(2): 301-305. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/S40995-016-0032-9>.
16. Haq Nazari, F., Ghanbarian, M., Dashtgol, A., & Naseri, V. (2019). Evaluation of sugarcane yield under the influence of irrigation and fertilizer levels. *Agricultural Science Research in Dry Areas* 13(2): 88-95.
17. Jahan, M., & Amiri, M. (2021). The effect of moisture super absorbent hydrogel on yield and some physiological traits of beans, sesame and corn in drought conditions. *Journal of Plant Research* 34(2): 496-510. <https://doi.org/20.1001.1.23832592.1400.34.2.16.5>.
18. Jalali, G.A., Akbarian, H., Rhoades, C., & Yousefzadeh, H. (2012). The effect of the halophytic shrub *Lycium ruthenium* (Mutt) on selected soil properties of a desert ecosystem in central Iran. *Polish Journal of Ecology* 60(4): 845-850.
19. Jalali, S., & Khademian, R. (2021). Morphological and phytochemical action of dill plant on natural zeolite under drought stress. *Journal of Horticultural Plant Nutrition* 4(1): 31-46.
20. Kafi, M., Ganjali, A., & Abbasi, F. (2016). Review of changes in abscisic acid (ABA) leaf tissue and stomatal resistance in drought-resistant and sensitive genotypes of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Science, University of Tehran* 33(4): 18-19. (In Persian with English abstract)
21. Kafi, M., Nabati, J., Eskoyan, A., & Eskoyan, A. (2018). Investigating the effect of biological fertilizers on the quality, yield and yield components of two potato varieties. *Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources* 9(2): 84-65. (In Persian with English abstract)
22. Khalili, M., & Tausli, A. (2021). The role of mycorrhizal fungi and hydrogel on water use efficiency and cucumber yield under soilless cultivation conditions. *Journal of Soil-Plant Relations* 6(4): 93-109.
23. Kohestani, Sh., & Askari, N. (2018). Investigating the effect of superabsorbent hydrogels on grain corn yield under drought stress conditions, *Journal of Plant Production* 5(3): 71-78.
24. Mousavifar, A., Khazaei, R., & Kafi, M. (2017). The effect of drought stress on some photosynthetic characteristics of *Kochia* (*Kochia scoparia* L.) in a greenhouse experiment. *Journal of Environmental Stresses in Agricultural Sciences* 11(3): 603-614. (In Persian with English abstract)
25. Naji, S., Zarei, L., Pourjabali, M., & Mohammadi, R. (2017). The extract of *Lycium depressum* stocks enhances wound healing in streptozotocin-induced diabetic rats. *The International Journal of Lower Extremity Wounds* 16(2): 85-93. <https://doi.org/10.1177/1534734617700538>.
26. Pollini, L., Rocchi, R., Cossignani, L., Mañes, J., Compagnone, D., & Blasi, F. (2019). Phenol profiling and nutraceutical potential of *Lycium* spp. *Journal of Leaf Extracts Obtained with Ultrasound and Microwave Assisted Techniques* 8(8): 260. <https://doi.org/10.3390/antiox8080260>.
27. Sajjadi, G., & Tosali, A. (2021). Investigating the effect of hydrogel on increasing drought resistance of the medicinal plant *Hibiscus sabdariffa* L. *Journal of Iranian Medicinal and Aromatic Plants Research* 37(4): 584-

595. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22092/IJMAPR.2021.353010.2924>.
28. Sarcheshmepour, M., Friver, M., & Sarmast, M. (2018). The effect of polymers on soil moisture and some growth indicators of corn plants under drought stress conditions. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 49(3): 152-133. (In Persian with English abstract)
29. Sharbati, F., Mohammad Asmeili, M., Bahmanesh, B., & Hosseini, S.A. (2016). Investigating the effect of salinity and drought stress on seed germination of *Lycium depressum* Stock. *Journal of Faculty of Agriculture and Natural Resources* 4(3): 65-72. (In Persian with English abstract)
30. Sharifian Behrman, A., Sepehri, A., & Barani, H. (2021). Investigating the physical and chemical characteristics of the soil of the habitat of the species Kam Tigh in the saline and alkaline pastures of the north of Golestan province. *Journal of Plant Ecosystem Protection* 9(2): 62-47.
31. Shiran, B., & Hertmani, A. (2021). The effect of mycorrhizal fungus symbiosis on morphological traits, proline and gene expression under drought stress. *Modern Genetics Quarterly* 16(4): 373-385.
32. Watan Dost, H., Sharifi, R., & Farzaneh, S. (2016). Seed filling and the composition of some fatty acids of rapeseed oil (*Brassica napus* L.) with the use of biofertilizers and interruption of irrigation. *Journal of Agricultural Knowledge and Sustainable Production Quarterly* 27(4): 15-22.
33. Zhang, G., Chen, S., Zhou, W., Meng, J., Deng, K., Zhou, H., Hu, N., & Suo, Y. (2018). Rapid qualitative and quantitative analyses of eighteen phenolic compounds from *Lycium ruthenicum* Murray by UPLC-Q-Orbitrap MS and their antioxidant activity. *Journal of Food Chemistry* 269: 150-156.
34. Zhang, T., Kang, Y., & Wan, S. (2013). Shallow sand-filled niches beneath drip emitters made reclamation of an impermeable saline-sodic soil possible while cropping with *Lycium barbarum* L. *Journal of Agricultural Water Management* 119: 54-64. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.016>.
35. Zhao, J.H., Li, H.X., Zhang, C.Z., Wei, A.N., Yue, Y.I.N., Wang, Y.J., & Cao, Y.L. (2018). Physiological response of four wolfberry (*Lycium* Linn.) species under drought stress. *Journal of Integrative Agriculture* 17(3): 603-612. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62038-6](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62038-6).



Evaluation of Efficiency of Classification Methods and Spectral Indices in Cropped Area Estimation of Shush County

M. Abiyat¹, M. Abiyat^{2*}, M. Abiyat³

Received: 08-06-2022

Revised: 03-09-2022

Accepted: 17-09-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Abiyat, M., Abiyat, M., & Abiyat, M. (2022). Evaluation of Efficiency between Classification Methods and Spectral Indices in Cropped Area Estimation of Shush County. *Journal of Water and Soil* 36(4): 493-509. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.76746.1167](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.76746.1167)

Introduction

Agriculture is the essential sector for promoting food security. Crop area estimation (CAE) can meet the requirements of the crop monitoring plan. The organizing basis of the cultivation pattern is recognizing the types of crops and examining the condition of their crop area. Shush county in Khuzestan province has 300,000 hectares of the crop area. It is one of the agricultural hubs of Iran because it has a record annual production of more than two million tons of strategic crops such as wheat, sugar beet, and corn. CAE affects the amount of net production and shortage or surplus of produce for market steadiness. Traditional approaches for CAE are time-consuming and costly and are not widely enforceable. Remote sensing (RS) data provide good information for decision-makers by determining the crop type and the crop area. RS data has made it possible to avoid continuous reference to agricultural lands with less time and cost than another usual method and accurate CAE. Also, the use of multi-time images during the growing season of agricultural products allows the use of spectral curves when related to the crop calendar of each crop. This spectral curve is almost separate for each product and increases the ability to distinguish between products. Therefore, multi-temporal images support segregation based on multispectral images of products. The current study follows a speedy method with appropriate accuracy established on satellite image classification algorithms and spectral indices to identify and separate crops with RS data in Shush County.

Materials and Methods

Landsat-8 data with path/row coordinates 166/38 extracted from the USGS website were used to identify and separate the cultivated lands of the region. The reason for choosing Landsat images is the relatively suitable temporal and spatial resolution, availability, and the appropriate time distribution with the product growth period. The Landsat 8 carries 2-sensors, OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor). The OLI sensor with a spatial resolution of 30 meters has 8-bands in the visible spectrum, near-infrared (NIR), short-wavelength infrared (SWIR), and a panchromatic band with a spatial resolution of 15 meters. The TIRS sensor can record thermal infrared radiation with a spatial resolution of 100 meters with the help of 2-bands in atmospheric windows of 10.6 to 11.2 micrometers for band 10 and 11.5 to 12.5 micrometers for band 11. This research used bands 1-7 of the Landsat-8 OLI sensor with a spatial resolution of 30 meters after the initial corrections of satellite images. The spectral similarity between the region's dominant crops has made it impossible to select a single image to differentiate and extract the cultivation pattern. Wheat and barley have a high spectral similarity. The peak of the greenness of these products is in the first four months of the year, which has high NDVI values at this time. Therefore, choosing a good time to separate the crops was feasible by referring to the Khuzestan Organization Agriculture-Jihad (KOAJ) and receiving the regional crops calendar in

1- Ph.D. Student in Soil Resource Management, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran
2 and 3- Ph.D. Students in Geography and Rural Planning, Faculty of Geographical Sciences and Planning, Isfahan University, Isfahan, Iran

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

2018-19. Then, the low-level cloud cover images on April 24, June 27, and August 30, 2019, were selected for classification based on the crop calendar. Planting, harvesting, maximum greenness, and ripening information of the dominant crops in the area were pivotal in obtaining image dates. In dates selected related to the images were considered planting, harvesting, maximum greenery, and ripening information of the region's dominant crops.

Results and Discussion

According to the results, from total crop area in Shush county (163313.7 hectares) is allocated about 103513.2 hectares (63.4% of the county's crop area) to the ANN, about 102875.1 hectares (63.0% of the county's crop area) to the SVM, and about 102,277.3 hectares (62.6% of the county's crop area) to the NDVI, which in comparison with the KOAJ statistics, has an error of 0.11, 6.2 and 1.8%, respectively.

This difference is the similarity of the reflective spectrum in some places, which affects the separability and recognition of phenomena and increases the error in estimating the area under cultivation of different crops. The highest and lowest errors in estimating the area under cultivation in the artificial neural network method were in barley and rice crops, respectively, in the support vector machine method were in wheat and rice crops, respectively, and in NDVI index were in wheat and barley crops, respectively. The difference between the cropped area obtained from classification methods and NDVI index with cropped area statistics of Agricultural-Jihad Organization may be due to the following: First, the cultivation history of different has caused problems such as reflections of diverse agricultural lands in one image. Second, the agricultural lands in this area are small. Most of them are under one hectare. Also, the crops in this area are diverse. Third, the smallest region that the image used in the present study can distinguish is about 900 square meters, which is a large number for the agricultural lands of the study area and causes errors.

Conclusion

The study results showed that the support vector machine method had the lowest error in CAE than the artificial neural network method, which indicates the higher accuracy of the support vector method in identifying and separating crops in the region. Comparing the area obtained from the NDVI index with the statistics of the Agricultural-Jihad Organization of Khuzestan province and evaluating the accuracy of this method indicated the higher efficiency of spectral indices in CAE for the region compared to classification methods. The NDVI index minimizes the error values of the results due to having a threshold and better identification of vegetation density. Therefore, based on the accuracy assessment results and comparing the cropped area with the KOAJ statistics, the utilization of the NDVI index provides the best CAE in the region.

Keywords: Agriculture, Artificial neural network, NDVI, Shush, Support vector machine

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۴۹۳-۵۰۹

بررسی کارایی روش‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی شهرستان شوش

محمد عیبات^۱ - مرتضی عیبات^{۲*} - مصطفی عیبات^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۶

چکیده

برآورد سطح زیرکشت محصول، گامی اساسی در تعیین میزان تولیدات زراعی و لازمه تصمیم‌گیری در انجام مبادلات اقتصادی است. هدف این پژوهش، ارزیابی کارایی روش‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی شهرستان شوش در طول دوره رشد است. ابتدا تصاویر OLI ماهواره لندست ۸ با توجه به تقویم زراعی سال ۹۸-۱۳۹۷ و دوره رویشی محصولات غالب منطقه، انتخاب شدند. برای شناسایی و تفکیک محصولات زراعی در رویکرد اول، از روش‌های طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان و در رویکرد دوم، از شاخص NDVI استفاده شد. برای مقایسه نتایج، از آمار سطح زیرکشت سازمان جهاد کشاورزی در سال ۱۳۹۸ استفاده شد. براساس نتایج بدست آمده، سطح زیرکشت گندم، جو، برنج و ذرت در روش شبکه عصبی مصنوعی، در مقایسه با آمار سازمان جهاد کشاورزی به ترتیب خطای ۱/۷، ۱۲/۱، ۶/۱ و ۶/۷ درصد و در روش ماشین بردار پشتیبان به ترتیب خطای ۸/۹، ۶/۶، ۴/۲ و ۵/۱ درصد داشته است. اما شاخص NDVI بهترین روش برآورد سطح زیرکشت منطقه در مقایسه با آمار سازمان جهاد کشاورزی به ترتیب دارای خطای ۴/۲، ۱/۲، ۲/۷ و ۱/۵ درصد بوده که نشان‌دهنده قابلیت بالا و دقت شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی منطقه با توجه به دوره رشد آن‌ها است. لذا پیشنهاد شد تا برای تعیین سطح زیرکشت محصولات شهرستان شوش از پیاده‌سازی شاخص‌های طیفی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: کشاورزی، شبکه عصبی مصنوعی، شوش، ماشین بردار پشتیبان، NDVI

مقدمه

مشکلی مهم، اما پیچیده بوده که برای افزایش سطح پایداری و استفاده کارآمد از منابع طبیعی الزامی است (Paudel et al., 2021). شالوده اصلی تنظیم الگوی کشت، شناخت انواع محصولات و بررسی وضعیت سطح زیرکشت آن‌ها می‌باشد (Chen et al., 2018). برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی بر میزان تولید خالص و کمبود یا مازاد تولیدات جهت ثبات بازار اثرگذار می‌باشد (Deng and Gibson, 2019). برآوردهای سنتی سطح زیر کشت محصولات بسیار زمان‌بر و پرهزینه بوده و در مقیاس وسیع قابل اجرا نیست؛ اما داده‌های سنجنش از دور با تعیین نوع و سطح زیرکشت محصولات، اطلاعات مناسبی را نزد تصمیم‌گیران بخش‌های مرتبط قرار خواهد داد (Liaquat et al., 2017). در روش برآورد از طریق فهرست‌برداری، هر چند سطح زیرکشت محصولات

کشاورزی، منبع اساسی امنیت غذایی در یک جامعه به حساب می‌آید (Viana et al., 2022; Martínez, et al., 2021). از طریق برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی می‌توان به نیاز برنامه پایش محصول پاسخ داد (Wang et al., 2022). تخمین عملکرد محصول

۱- دانشجوی دکتری مدیریت منابع خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

۲ و ۳- دانشجویان دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی روستایی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

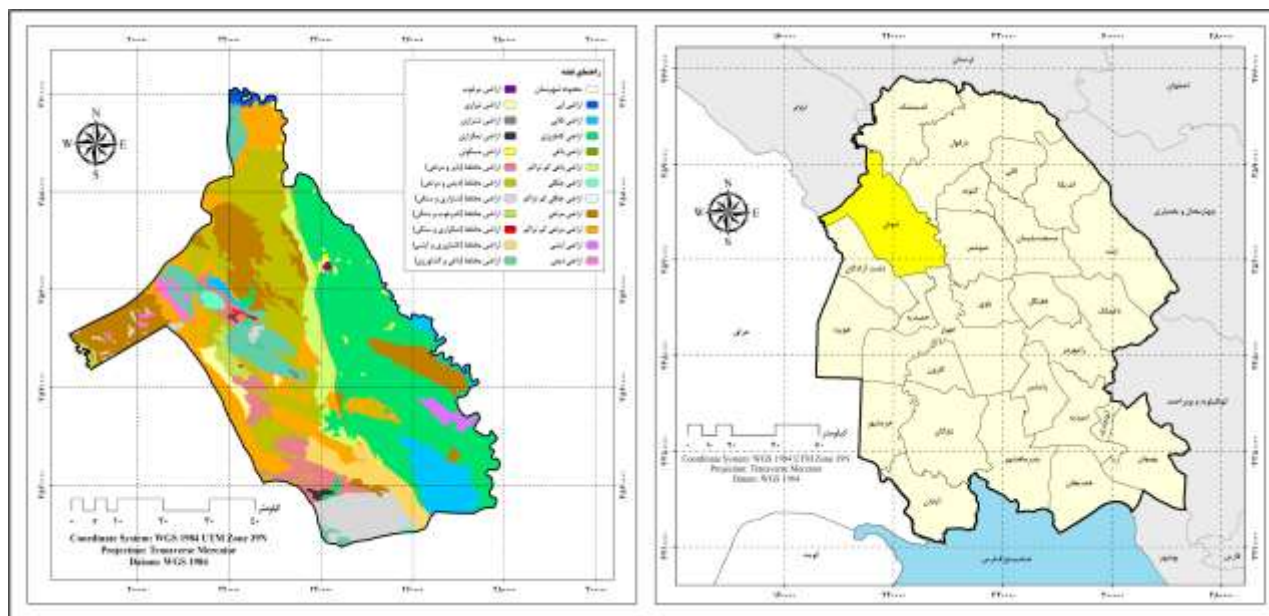
(*- نویسنده مسئول: Email: morteza.abiyat@yahoo.com

DOI: 10.22067/JSW.2022.76746.1167

به نقشه‌برداری نوع محصولات و برآورد سطح زیرکشت در قطعه‌های کوچک برای منطقه بنگال غربی با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین پرداختند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از تصاویر چندطیفی Sentinel-2 و الگوریتم‌های K نزدیکترین همسایه (KNN) و جنگل تصادفی (RF)، سطح زیرکشت محصولات زراعی تابستانی را نیز می‌توان به طور دقیق برآورد نمود. گونزالس و همکاران (Gonzalez et al., 2022)، در پژوهشی با عنوان تکنیک‌های یادگیری ماشین و سنجش از دور برای تخمین شاخص‌های خاک از طریق مرور مطالعات اخیر در این زمینه به این نتیجه دست یافتند که این ابزار در تخمین کیفیت خاک، تنظیم شیوه‌های مدیریت کشاورزی و بهبود عملکرد محصول اثرگذار هستند. وانکلومپنبرگ و همکاران (Van-Klompenburg et al., 2020)، در یک مطالعه به بررسی سیستماتیک ادبیات موضوع پیش‌بینی عملکرد محصول با استفاده از یادگیری ماشین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، پرکاربردترین الگوریتم استفاده شده در مطالعات مربوط به تخمین عملکرد محصولات زراعی است. موسوی و همکاران (Moussavi et al., 2020)، به منظور برآورد سطح زیرکشت گندم دیم در منطقه خدابنده استان زنجان از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 و دو روش ماشین بردار پشتیبان و حداکثر احتمال استفاده کردند. نتایج نشان داد، روش ماشین بردار پشتیبان با دقت کلی و ضریب کاپای مناسب، نسبت به روش حداکثر احتمال از دقت بالاتری برخوردار است و جهت تعیین سطح زیرکشت محصول، روش ماشین بردار پشتیبان مناسب است. مقایسه نتایج سطح زیرکشت با آمار جهاد کشاورزی انحراف ۱۸ درصد را نشان داد. میزان محصول گندم نیز با استفاده از سطح زیرکشت بدست آمده از روش طبقه‌بندی، با آمار سازمان تعاونی روستایی مقایسه گردید که میزان انحراف ۱۷ درصدی را نمایان کرد.

پژوهش حاضر با انگیزه یافتن روشی سریع همراه با دقتی مناسب برای تعیین و تفکیک اراضی زیرکشت با استفاده از داده‌های سنجش از دور به انجام رسیده و در نظر دارد با تمرکز بر مناطق جنوب غربی ایران، بهترین روش را جهت تهیه نقشه اراضی زیرکشت محصولات معرفی کند. این مطالعه، برآورد اراضی زیرکشت محصولات زراعی بر پایه الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی در شهرستان شوش با توجه به دوره رویشی آن‌ها پیگیری می‌نماید.

تخمین زده می‌شود، اما پراکندگی آن را نشان نمی‌دهد، ضمن اینکه هزینه بالای نیروی انسانی عامل مهم محدودکننده این روش است (Ziaiean et al., 2010). داده‌های سنجش از دور، امکان عدم مراجعه مستمر به اراضی کشاورزی با صرف زمان و هزینه کمتر نسبت به سایر روش‌های معمول و برآورد دقیق سطح زیرکشت محصولات را میسر می‌سازد (Dong et al., 2017). علاوه بر آن، استفاده از تصاویر چندزمانه در دوره رشد محصولات، امکان استفاده از منحنی طیفی زمانی، که با تقویم زراعی هر محصول ارتباط دارد، را می‌دهد (Yi et al., 2020). این منحنی طیفی برای محصولات تقریباً مجزا بوده و قابلیت تمایزبخشی میان انواع آن‌ها را بالا می‌برد (Zhang et al., 2019). بنابراین، تصاویر چندزمانه امکان تشخیص و تفکیک محصولات زراعی بر پایه تصاویر چندطیفی را فراهم خواهد آورد (Hedayati et al., 2022; Solano-Correa et al., 2018). در میان شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج یافته از داده‌های ماهواره‌ای، شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) یکی از پرکاربردترین آن‌ها در مطالعات مربوط به بخش کشاورزی و پایش محصول است (Phan et al., 2020; Ouzemou et al., 2018). روزنیک و همکاران (Roznik et al., 2022)، در یک پژوهش با عنوان بهبود تخمین عملکرد محصول برای ۴۸ ایالت آمریکا بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای NDVI و ماسک‌های زمین زراعی با وضوح بالا به این نتیجه رسیدند که تصاویر ماهواره‌ای، منبع بزرگ داده و کاربردی در کشاورزی بوده و شاخص NDVI در برآورد دقیق عملکرد و تمایز محصولات اثرگذار است. ریاحی و همکاران (Riahi et al., 2019)، نقشه الگوی کشت محصولات زراعی را برای ناحیه لنجانان اصفهان با استفاده از تصاویر Landsat-8 و شاخص NDVI با توجه به تقویم زراعی آن‌ها تهیه کردند. نتایج نشان داد که سطح زیرکشت محصولات در شاخص NDVI نسبت به آمار جهاد کشاورزی خطایی بین ۳ تا ۶ درصد بوده که بیان‌کننده کارایی مناسب شاخص گیاهی در برآورد سطح زیرکشت محصولات با توجه به فنولوژی آن‌ها است. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017)، در پژوهشی به طبقه‌بندی محصولات و برآورد سطح زیرکشت برای کره شمالی با استفاده از ویژگی‌های فنولوژی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که دقت طبقه‌بندی تصاویر لندست در سال‌های نمونه انتخاب شده، درصد بالایی از مناطق مورد بررسی را تحت پوشش قرار داده است. این امر نشان می‌دهد که ویژگی‌های مشتق شده از پروفایل‌های NDVI قادر به توصیف محصولات اصلی بودند و رویکردهای توسعه یافته در این زمینه برای نقشه‌برداری محصولات زراعی و برآورد سطح زیرکشت در مناطق با داده‌های واقعیت زمینی محدود ممکن است. علاوه بر شاخص NDVI، برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی با انواع روش‌ها و داده‌های سنجش از دور در تحقیقات مختلفی انجام شده است. حدیت و همکاران (Hudait and Patel, 2022)، در پژوهشی



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه
Figure 1- Location of the study area

داده‌های مورد استفاده

برای شناسایی و تفکیک اراضی زیرکشت شهرستان شوش، از داده‌های Landsat-8 با شماره ردیف و گذر ۳۸ و ۱۶۶ مستخرج از وبسایت USGS استفاده شد. علت انتخاب تصاویر لندست، قدرت تفکیک زمانی و مکانی نسبتاً مناسب، در دسترس و رایگان بودن آن‌ها و پراکنش زمانی مناسب با دوره رشد محصولات کشاورزی است. لندست ۸ دو سنجنده (Operational Land Imager) OLI و نیز (Thermal Infrared Sensor) TIRS را حمل می‌نماید. سنجنده OLI با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر دارای ۸ باند در محدوده‌های طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز طول موج کوتاه و یک باند پانکروماتیک با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر است. سنجنده TIRS به کمک دو باند در پنجره‌های جوی ۱۰/۶ تا ۱۱/۲ میکرومتر برای باند ۱۰ و ۱۱/۵ تا ۱۲/۵ میکرومتر برای باند ۱۱ قادر به ثبت تابش‌های مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰ متر است (Li et al., 2013). در این مطالعه، از باندهای ۱ تا ۷ سنجنده OLI لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر، پس از اعمال تصحیحات اولیه تصاویر استفاده شد. بدلیل تشابه طیفی محصولات عمده منطقه، نمی‌توان از یک تصویر برای تفکیک و استخراج الگوی کشت غالب استفاده نمود (Khodakarami and Soffianian, 2012). لذا برای تعیین بهترین زمان در تفکیک محصولات، ابتدا تقویم زراعی منطقه مربوط به سال ۹۸-۱۳۹۷ از سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان^۱

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

شهرستان شوش با وسعتی معادل ۳۵۷۷ کیلومترمربع، بین مدار $32^{\circ} 12' 12''$ طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و $48^{\circ} 15' 12''$ عرض شمالی از خط استوا و نیز در ۱۱۵ کیلومتری شمال غربی اهواز قرار داشته است (شکل ۱)، و نیز جمعیتی بالغ بر ۱۳۶۳۸۹ نفر براساس سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵ را پوشش می‌دهد. این شهرستان از اقلیم گرم و خشک برخوردار بوده که دامنه دما در سال بین ۱۲ تا ۴۸ درجه سانتیگراد، متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر و رطوبت نسبی در فصول بارانی و گرم به ترتیب بین ۴۵-۵۲ درصد و ۱۹-۳۴ درصد را تجربه می‌نماید. زمین‌های مستعد کشاورزی، رودخانه‌های پرآب دائمی، سفره‌های آب زیرزمینی، سطح نسبتاً گسترده جنگلی در حواشی رودخانه، سواحل و آب‌بندهای متعدد، مراکز و مراکز کشت و صنعت در شوش موجب شده است تا فعالیت کشاورزی، به مهم‌ترین فعالیت‌های اقتصادی منطقه تبدیل گردد. بر مبنای اطلاعات آمارنامه محصولات زراعی استان خوزستان در سال ۱۳۹۸ نیز از مجموع ۱۶۳۳۱۳/۷ هکتار اراضی زیرکشت در شهرستان شوش، سه محصول گندم با مساحت ۵۸۷۴۱/۷۵ هکتار، شلتوک با مساحت ۲۶۵۰۰ هکتار و ذرت دانه‌ای با مساحت ۱۵۹۳۲ هکتار، بیشترین سطح زیرکشت را به خود اختصاص داده‌اند.

RGB معروف است. بر این اساس، با ترکیب داده‌های ۷ باند لندست ۸ سنجنده OLI می‌توان تعداد ۳۵ ترکیب رنگی طبق اصل فاکتوریل در علم ریاضی در رابطه ۱، که ۳ باند کنار هم در هر ترکیب، بدون تکرار باندها در یک ترکیب و اهمیت نداشتن ترتیب انتخاب‌ها، یعنی ترکیب تکراری حتی در حالت چیدمان متفاوت وجود نداشته باشد، ساخت (Asming et al., 2022; Teffera et al., 2018).

جهت انتخاب یک ترکیب باندی با بیشترین اطلاعات در هر یک از تصاویر، شاخص OIF در محیط نرم‌افزار ENVI براساس رابطه ۲ محاسبه شد (Chanu et al., 2021).

$$N_{RGB/LC8_OLI} = \left(\frac{7!}{(7-3)! \times 3!} \right) \quad (1)$$

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 SD}{\sum_{i=1}^3 CC} \quad (2)$$

در رابطه ۲، OIF ضریب شاخص بهینه است، SD انحراف باند k استاندارد و CC مقدار ماتریس همبستگی می‌باشد. پس از انتخاب تصاویر و انجام تصحیحات اولیه، برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی با دو رویکرد صورت گرفت؛ طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از شاخص‌های طیفی. برای ارزیابی نتایج دو رویکرد، از آمار سطح زیرکشت جهاد کشاورزی خوزستان در سال ۱۳۹۸ استفاده شد.

طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، نیاز به نمونه‌های تعلیمی است. لذا، نخست اقدام به برداشت نمونه‌های تعلیمی به عنوان الگوی مشخصات طیفی طبقات از منطقه شد. نمونه‌های تعلیمی از منطقه با استفاده از بازدید میدانی و GPS برداشت شده و برای تعلیم روش‌های طبقه‌بندی استفاده شد.

دریافت شد و طبق اطلاعات این تقویم (جدول ۱) تصاویر سه تاریخ ۴ اردیبهشت (۲۴ آوریل)، ۶ تیر (۲۷ ژوئن) و ۸ شهریور (۳۰ اوت) سال ۱۳۹۸ (۲۰۱۹ میلادی) با پوشش کم ابری برای طبقه‌بندی انتخاب شد. تاریخ‌های آخذ تصاویر طبق اطلاعات کاشت، برداشت، حداکثر سبزیگی و رسیدگی کامل محصولات غالب منطقه انتخاب شده‌اند.

دقت هندسی تصاویر ماهواره‌ای آخذ شده با استفاده از بردارهای جاده و رودخانه کنترل شد و با توجه به دقت بالای تصاویر لندست ۸، تصحیح هندسی انجام نشد. به منظور تصحیح اتمسفری تصاویر از الگوریتم FLAASH در نرم‌افزار ENVI 5.2 استفاده شد. الگوریتم تصحیح اتمسفری FLAASH با فرض حضور پیکسل‌های تیره است که می‌تواند به عنوان پیکسل مرجع با بازتاب سطحی مشخص لحاظ شود، انجام می‌شود (Garain et al., 2021; Yopez et al., 2018). پارامترهای موجود در مدل تصحیح اتمسفری FLAASH با توجه به شرایط منطقه و ماه‌های آخذ تصاویر انتخاب شد. پارامتر قابلیت دید در تمام تصاویر ۴۰ کیلومتر در نظر گرفته شد. جهت دستیابی به بهترین ترکیب باندی برای طبقه‌بندی نیز از ضریب شاخص مطلوبیت (OIF) استفاده شد. انتخاب ترکیب باندی مناسب به روش‌های مختلفی انجام می‌پذیرد. یک روش، با استفاده از مقایسه چشمی تصاویر بدست آمده از ترکیب رنگی مختلف بوده که بسیار مشکل و وقت‌گیر است. روش دیگر، استفاده از کمیت‌های آماری فاکتور شاخص بهینه (OIF) است که به منظور تعیین بهترین ترکیب رنگی کاذب سه باندی از داده‌های ماهواره‌ای بکار می‌آید. این شاخص بر پایه کمیت‌های آماری، انحراف معیار (SD) و ضریب همبستگی (CC) بین باندهای مختلف برای به حداقل رساندن داده‌های کم ارزش و حداکثر استفاده از اطلاعات مفید در انتخاب باندهای مناسب برای ساخت تصاویر رنگی کاذب (FCC) می‌باشد (Alavipanah, 2015). در این روش، با ترکیب داده‌های ۳ باند از ۷ باند انعکاسی و چندمنظوره سنجنده OLI لندست ۸ یک تصویر رنگی کاذب در اختیار کاربر قرار می‌گیرد که به تصویر رنگی

جدول ۱- اطلاعات دوره رشد (تقویم زراعی) محصولات عمده منطقه در سال زراعی ۱۳۹۷-۹۸

Table 1- Growth period data (Crop calendar) of the region's principal crops in the crop year 2019-2020

محصول Crop	وضعیت رویشی در تصاویر ماهواره‌ای منتخب Growth status in selected satellite imagery		
	۴ اردیبهشت (April 24)	۶ تیر (June 27)	۸ شهریور (August 30)
گندم Wheat	اوج سبزیگی Peak greenness	زرد شده یا برداشت شده Yellowed or harvested	هنوز کشت نشده Not yet cultivated
جو Barley	کمی قبل از اوج سبزیگی Before the peak of greenness	برداشت شده Harvested	هنوز کشت نشده Not yet cultivated
برنج Rice	هنوز کشت نشده Not yet cultivated	مراحل اولیه خوشه‌دهی Early stages of product clustering	رسیدگی کامل Full ripening
ذرت Corn	هنوز کشت نشده Not yet cultivated	اوایل دوره رویشی و بازتاب خاک غالب است Early stages of growth and soil reflection	اوج سبزیگی Peak greenness

جدول ۲- نمونه‌های تعلیمی و ارزیابی مورد استفاده در طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

Table 2- Training examples and evaluation used in the classification of satellite images

نمونه‌های برداشت‌شده	نمونه‌های ارزیابی	کل نمونه‌های تعلیمی	۵۰٪ نمونه‌های تعلیمی	کلاس
Samples taken	Samples evaluation	Total training samples (II)	50% Training samples (I)	Class
192	48	144	72	گندم Wheat
48	12	36	18	جو Barley
104	26	78	39	برنج Rice
96	24	72	36	ذرت Corn
120	30	90	45	سایر اراضی Other lands

است. زیرا محاسبات پیکسل‌مبنا می‌باشند (Derksen et al., 2020). شبکه‌های عصبی مصنوعی با ساختار نقشه‌سازی غیرخطی و برای مدل‌سازی سیستم‌های متصل به یکدیگر مانند مغز متشکل از نرون‌ها توسعه داده شده‌اند. شبکه‌های عصبی پرسپترون چندلایه (MLP)، از پرکاربردترین شبکه‌های عصبی هستند (Martínez et al., 2021). در این پژوهش، برای طبقه‌بندی شبکه عصبی مصنوعی، از پرسپترون چندلایه استفاده شد. برای اجرای شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، از نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید. اجرای شبکه نیازمند ورودی (Input)، خروجی (Output) و انتخاب تعداد لایه‌های میانی یا پنهان خواهد بود (شکل ۲).

ورودی شبکه، باندهای تصاویر مورد استفاده در طبقه است. تعداد هفت نرون ورودی شامل ۷ باند طیفی (باندهای ۱ تا ۷ ماهواره لندست ۸) مدنظر می‌باشد. به منظور تسهیل در همگرایی شبکه عصبی مصنوعی، باید مقادیر نرون‌های ورودی نرمال گردد. زیرا، وارد کردن داده‌ها به طور خام موجب کاهش سرعت و دقت شبکه می‌شود. جهت نرمال‌سازی داده‌ها در این پژوهش از رابطه ۳ استفاده شد.

$$X_y = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (3)$$

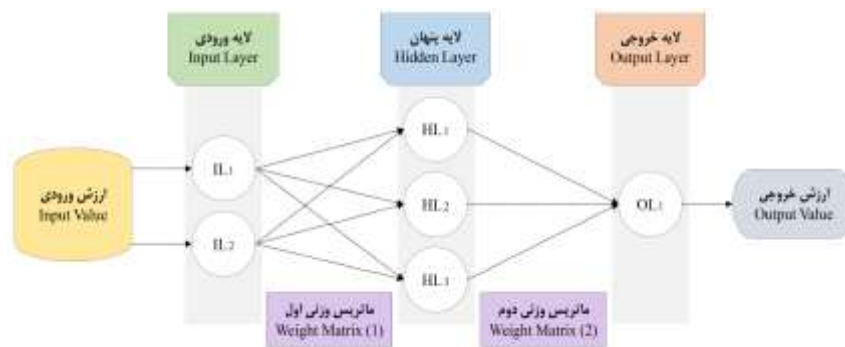
X_y ارزش (مقدار) استاندارد شده لایه مورد نظر، X_i ارزش لایه ورودی، $X_{\min}$ کمترین ارزش لایه و $X_{\max}$ بیشترین ارزش لایه مورد نظر است. خروجی شبکه شامل دو پارامتر کدگذاری و استخراج کلاس می‌باشد. به منظور کدگذاری کلاس‌های خروجی از یک گره خروجی برای هر کلاس استفاده شد. نرون‌های خروجی با تعداد پنج عدد به منزله تعداد کلاس‌های طبقه‌بندی در نظر گرفته می‌شوند. بر مبنای یافته‌های قبلی، شبکه‌های دارای یک لایه پنهان جهت انجام عمل طبقه‌بندی مناسب‌تر خواهند بود و تعداد نرون‌های پنهان با آزمون و خطا تعیین و غالباً سه برابر تعداد نرون‌های ورودی انتخاب می‌شوند (Parmar et al., 2021; Mirzaei et al., 2020).

با توجه به وسعت (مساحت) هر یک از طبقات محصولات زراعی، نمونه‌های تعلیمی به گونه‌ای انتخاب شدند که از تعداد و پراکنش مناسب در هر طبقه برخوردار باشند. در این پژوهش، ابتدا جهت ارزیابی اثر تعداد نمونه‌های تعلیمی بر نتایج طبقه‌بندی، از ۵۰ درصد نمونه‌های تعلیمی در هر یک از کلاس‌ها (I) استفاده شد. سپس، نتایج طبقه‌بندی با هر سری از داده‌های تعلیمی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در مرحله بعد، با استفاده از یک سوم داده‌های باقیمانده از برداشت زمینی (نمونه‌های ارزیابی) و ماتریس خطا، اعتبار سنجی طبقه‌بندی انجام گردید. تعداد نمونه‌های تعلیمی و ارزیابی در جدول ۲ آورده شده است.

برای ارزیابی کمی تفکیک‌پذیری طبقات در نمونه‌های تعلیمی، از شاخص واگرایی (Divergence index) استفاده شده است. نسبت تفکیک‌پذیری در این شاخص از ۰ الی ۲ بیان شده که صفر معادل عدم تفکیک‌پذیری کلاس‌ها و ۲ مبین تفکیک کامل کلاس‌ها است. برای اجرای طبقه‌بندی دقیق، باید میزان تفکیک‌پذیری از ۱/۸ بالاتر باشد (Ebodé et al., 2022; Poursanidis et al., 2018). در پایان به ارزیابی صحت نقشه‌های طبقه‌بندی تهیه شده با مکان‌های تعلیمی پرداخته شد. در پژوهش حاضر، طبقه‌بندی تصاویر با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان انجام شد.

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی، ابزار محاسباتی توانمند و کارآمدی است که در ساماندهی و ایجاد رابطه بین اطلاعات گوناگون نیز قابلیت مناسبی دارند (Cabaneros et al., 2019). شبکه عصبی مصنوعی، مستقل از توزیع آماری داده‌ها است و به متغیرهای آماری ویژه‌ای نیاز ندارد. بنابراین، این ویژگی امکان ترکیب داده‌های سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل دقت، حتی با گروه داده آموزشی اندک از منطقه امکان‌پذیر



شکل ۲- ساختار شبکه عصبی پرسپترون چندلایه

Figure 2- MLP neural network Structure

برای محاسبه مرز تصمیم‌گیری دو کلاس کاملاً جدا از هم از روش حاشیه بهینه استفاده می‌شود. این حاشیه به گونه‌ای محاسبه شده که نمونه‌های کلاس ۱+ در یک طرف مرز و تمام نمونه‌های کلاس ۱- در طرف دیگر مرز واقع می‌شوند و مرز تصمیم‌گیری به گونه‌ای بوده که فاصله نزدیک‌ترین نمونه‌های آموزشی دو کلاس از یکدیگر نیز در راستای عمود بر مرز تصمیم‌گیری تا جایی که ممکن است، حداکثر گردد (Kim et al., 2020). اگر مرز تصمیم‌گیری به طور موازی به وسیله دو خط از دو طرف گسترش یابد و از نزدیک‌ترین نمونه‌های دو کلاس عبور کند، مرز تصمیم‌گیری بهینه ایجاد می‌شود که حداکثر فاصله میان نمونه‌های دو کلاس را نشان می‌دهد. آن دو خط موازی نیز مرز حاشیه‌ای نامیده می‌شوند. برای آن دسته از پیکسل‌هایی که در بیرون مرزهای حاشیه‌ای قرار گرفته‌اند، رابطه ۵ برقرار می‌گردد (Ramírez et al., 2019).

$$\text{forclass1pixels } w^T x + w_{N+1} = -1 \quad (5)$$

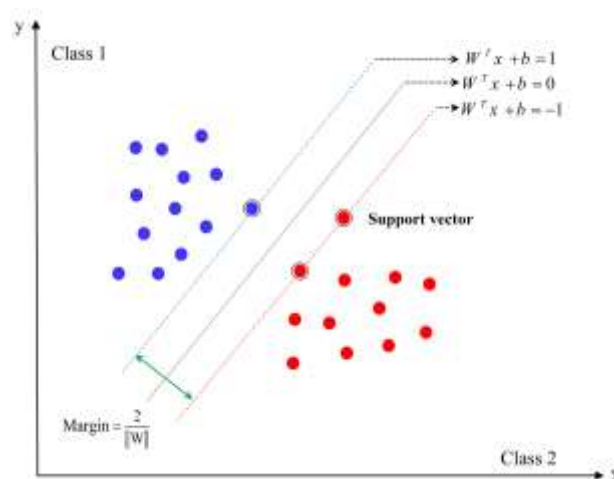
در این تحقیق برای استفاده از شبکه عصبی مصنوعی از یک لایه پنهان استفاده شد. کارکرد این روش براساس رابطه ۴ است:

$$g = f(w_x^T + \theta) \quad (4)$$

در این رابطه θ حد آستانه، w^T بردار وزنی ضرایب و x بردار ورودی هستند. جهت ایجاد شبکه بهینه در طبقه‌بندی تصاویر مطالعه حاضر، سرعت یادگیری ۰/۲ و گشتاور ۰/۵ برای شبکه لحاظ شد.

ماشین بردار پشتیبان (SVM)

ماشین بردار پشتیبان یک روش طبقه‌بندی باینری می‌باشد که با تعیین یک ابر صفحه تفکیک‌کننده بهینه در فضای ویژگی داده‌های آموزشی، کلاس‌های مختلف را با حداکثر جدایی بین آن‌ها، تفکیک می‌کند. ابر صفحه‌ای که حداکثر حاشیه را بین دو کلاس فراهم کرده، ابر صفحه بهینه و داده‌های نزدیک‌تر به ابر صفحه، بردارهای پشتیبان نیز نامیده می‌شوند (Rienow et al., 2021; Jain et al., 2018). با توجه به شکل ۳ به نمونه‌های مرزی بردارهای پشتیبان گفته شده و



شکل ۳- بردارهای پشتیبان به همراه حاشیه بهینه (Ramírez et al., 2019)

Figure 3- Support vectors with optimal margin

اعتبارسنجی روش‌ها از دو پارامتر صحت کلی (Overall accuracy) و ضریب کاپا (Kappa coefficient) استفاده شد. صحت کلی، از ساده‌ترین پارامترهای دقت است که نیاز به عملیات پیچیده برای محاسبه نداشته و برآوردی کلی از دقت طبقه‌بندی یا به تعبیر دقیق‌تر، میانگینی از دقت طبقه‌بندی است. صحت کلی از جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا تقسیم بر تعداد کل پیکسل‌ها طبق رابطه ۷ محاسبه شد.

$$\sum P_{ij} OA = \frac{1}{N} \quad (7)$$

در این رابطه، OA دقت کلی؛ N تعداد پیکسل‌های آزمایشی و $\sum P_{ij}$ جمع عناصر قطر اصلی ماتریس خطا است. چنانچه صحت کلی در نقشه‌های تولید شده بیش از ۷۰ درصد باشد، صحت نقشه‌های تولیدی قابل اعتماد است. از پارامترهای دقت دیگر که از ماتریس خطا استخراج می‌شود، ضریب کاپا است که دقت طبقه‌بندی را نسبت به یک طبقه‌بندی کاملاً تصادفی محاسبه می‌کند. دامنه ضریب کاپا بین ۰ و ۱ است که عدد ۱ بیانگر توافق قطعی طبقه‌بندی با واقعیت زمینی است. برای محاسبه شاخص کاپا از رابطه ۸ استفاده شد.

$$Kappa = \frac{[(P_0 - P_c)]}{[(1 - P_c)]} \times 100 \quad (8)$$

در این رابطه، P_0 درستی مشاهده شده و P_c توافق مورد انتظار را نشان می‌دهند (Pageot et al., 2020).

نتایج و بحث

ایجاد تصاویر رنگی

انتخاب ترکیب باندی مناسب برای تفسیر و طبقه‌بندی تصاویر منتخب در جدول ۳ آورده شد. طبق OIF ترکیبات سه‌تایی که دارای انحراف معیار بالا، همبستگی کم و در نتیجه OIF بالا بودند، برای ایجاد تصاویر رنگی انتخاب شدند. اعمال این ترکیبات باندی موجب شد تا طبقات اراضی زراعی با حداکثر تفکیک‌پذیری دیده شوند.

نتایج طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای

در طبقه‌بندی تصاویر، پس از معرفی نمونه‌های تعلیمی، نقشه پوشش اراضی منطقه تهیه شد و اراضی زیرکشت محصولات غالب شامل گندم، جو، برنج و ذرت با توجه به تغییرات بازتاب محصولات در چرخه رشد گیاهان زراعی، تفکیک شد (اشکال ۴ و ۵). مقادیر نسبت تفکیک‌پذیری این شاخص در جدول ۴ آورده شده است.

انتخاب کرنل، از مهم‌ترین مسائل در اجرا و عملکرد طبقه‌بندی کننده ماشین بردار پشتیبان است. در پژوهش، کرنل شعاعی (RBF) با توجه به استفاده وسیع در طبقه‌بندی اراضی با داده‌های ماهواره‌ای مختلف و نیز عملکرد بهتر نسبت به دیگر کرنل‌های مورد استفاده قرار گرفت (Razaque et al., 2021; Zafari et al., 2019). علاوه براین، کرنل پارامتر شعاعی فقط به یک از پیش تعریف شده نیاز دارد، که در پیاده‌سازی، آن را در مقایسه با کرنل‌های دیگر کارتر می‌سازد (Wang et al., 2020). به منظور پیاده‌سازی ماشین بردار پشتیبان، از برنامه MATLAB استفاده شد.

شاخص‌های طیفی

شاخص‌های طیفی (گیاهی) محاسباتی ریاضی، حاصل ترکیب باندهای مختلف هستند (Manickam et al., 2021). در بکارگیری شاخص‌های طیفی به منظور برآورد زیرکشت محصولات زراعی، از شاخص NDVI استفاده گردید. شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)، یک شاخص گیاهی کلیدی و کاربردی معروف است (Huang et al., 2020). این شاخص از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (6)$$

این شاخص، دارای مقادیر نرمال در دامنه بین -۱ و +۱ است که بررسی و نمایش مقادیر را به راحتی امکان‌پذیر می‌سازد. مقادیر منفی در آن حکایت از عدم حضور پوشش گیاهی و مقادیر مثبت مناطقی با پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (Zare et al., 2020). برای تعیین و تفکیک اراضی زیرکشت محصولات زراعی در این رویکرد، به دلیل تمایز محصولات غالب از نظر دوران رشد و اوج سبزیگی از یکدیگر و سایر گیاهان منطقه در تصاویر منتخب، شاخص NDVI در نرم‌افزار TerrSet بر روی این تصاویر محاسبه شده و از طریق بومی‌سازی حد آستانه‌های شاخص مذکور متناسب با انواع محصولات زراعی غالب و نیز تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، اراضی زیرکشت شناسایی و تفکیک شد.

اعتبارسنجی روش‌ها

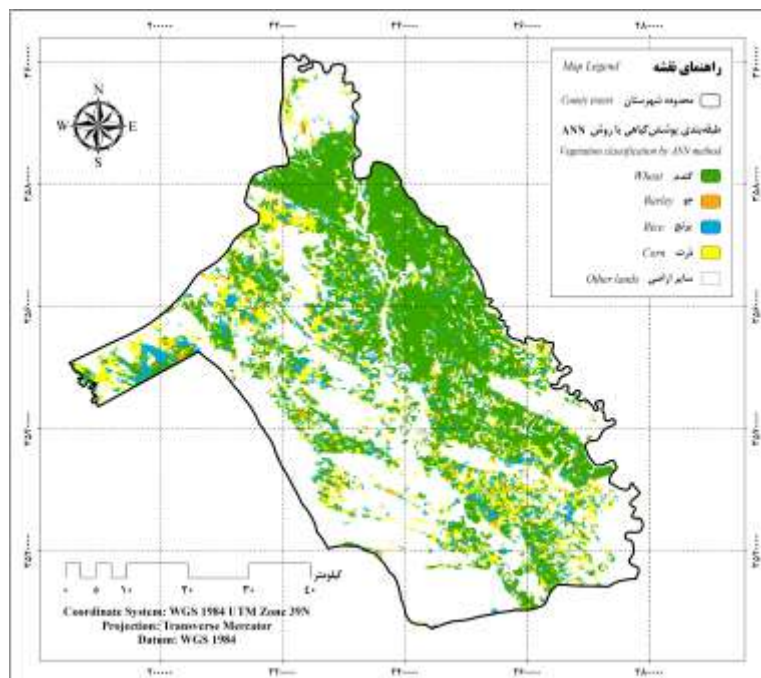
به منظور ارزیابی دقیق طبقه‌بندی‌های انجام شده با روش‌های مختلف، ماتریس خطا محاسبه می‌شود تا دقت کلی طبقه‌بندی‌ها با واقعیت زمینی مشخص شود (Tomala et al., 2020). از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی صحت در بررسی صحت الگوریتم‌ها می‌توان به دقت کلی، ضریب کاپا، صحت کاربر، صحت تولیدشده اشاره کرد (Verma et al., 2020; Lyons et al., 2018). در این راستا، برای

جدول ۳- مقادیر OIF برای ترکیبات رنگی قابل استفاده در تصاویر منتخب
Table 3- OIF values for color combinations usable in selected images

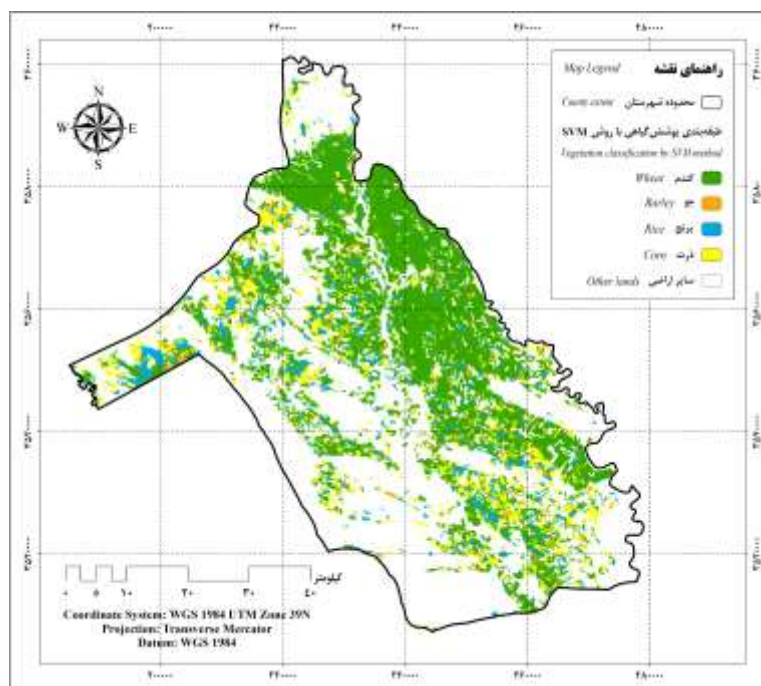
تصاویر ماهواره‌ای منتخب Selected satellite images	RGB	OIF
۴ اردیبهشت April 24	2-5-6	77.18
۶ تیر June 27	2-4-7	75.79
۸ شهریور August 30	1-5-6	78.10

جدول ۴- نتایج محاسبه شاخص واگرایی برای نمونه‌های تعلیمی
Table 4- Results of divergence index calculation for the training samples

کلاس Class	گندم Wheat	جو Barley	برنج Rice	ذرت Corn	سایر اراضی Other lands
گندم Wheat	0	1.93	1.97	1.99	2
جو Barley	1.93	0	1.98	1.96	1.99
برنج Rice	1.97	1.98	0	1.99	2
ذرت Corn	1.99	1.96	1.99	0	2
سایر اراضی Other lands	2	1.99	2	2	0



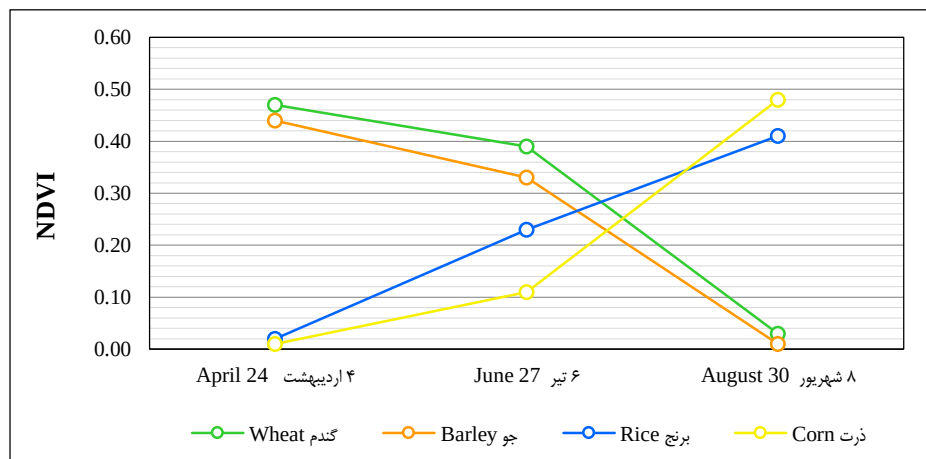
شکل ۴- اراضی زیرکشت در روش شبکه عصبی مصنوعی
Figure 4- Cultivated lands in ANN method



شکل ۵- اراضی زیرکشت در روش ماشین بردار پشتیبان
Figure 5- Cultivated lands in SVM method

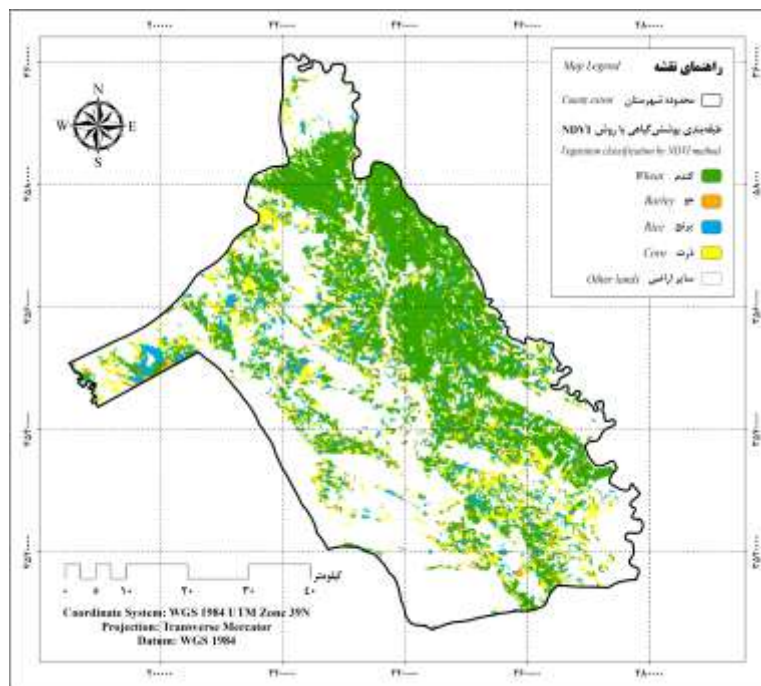
براساس شکل ۶، گندم و جو دارای شباهت طیفی بالایی بوده و اوج سبزیگی این محصولات در چهار ماه اول سال است که از مقادیر NDVI بالایی در این زمان برخوردار است. پس از برداشت این دو محصول، مقادیر NDVI آن‌ها در چهار ماه دوم سال کاهش می‌یابد. در چهار ماه اول سال، دو محصول برنج و ذرت هنوز کشت نشده‌اند، بنابراین مقادیر NDVI آن‌ها پایین است. پس از آغاز دوره رویشی این محصولات در چهار ماه دوم سال، نمودار NDVI آن‌ها صعودی شده و به حداکثر رشد خود می‌رسند. همان‌گونه که مشاهده شد رفتار طیفی هر یک از محصولات زراعی در طول دوره رشد متفاوت است و در زمانی خاص نمی‌توان تمامی محصولات را در وضعیت یکسان از دوره رشد، در تصویر مشاهده کرد و زمان اوج سبزیگی هر محصول زراعی با سایر محصولات منطقه متفاوت است. همچنین نتایج تحلیل طیفی نمودار NDVI نشان داد که زمان اوج سبزیگی تشخیص داده شده از روش حد آستانه‌های شاخص NDVI با تقویم زراعی آن‌ها نیز تأیید می‌شود. از نتایج می‌توان دریافت که با نزدیک شدن به پایان فصل رشد میزان ارتباط شاخص استخراج شده از تصاویر با متغیرهای گیاهی کم می‌شود. با توجه به تقویم زراعی منطقه، محصولات گندم و جو دوره شخم و کاشت یکسان، اما دوره اوج سبزیگی متفاوتی دارند و همین امر باعث عدم به وجود آمدن مشکلاتی نظیر بازتاب متفاوت مزارع محصولات مختلف در یک تصویر شده است.

مطابق با نتایج جدول ۴، شاخص واگرایی به منظور ارزیابی تفکیک‌پذیری طبقات محصولات زراعی در نمونه‌های تعلیمی بالاتر از ۱/۸ بوده که نشانگر انتخاب مناسب طبقات پوششی بوده است. بیشترین مقدار این شاخص (مقدار ۲) مربوط به تفکیک‌پذیری کامل سه کلاس گندم، برنج و ذرت از سایر اراضی و کمترین مقدار آن (مقدار ۱/۹۳) برای تفکیک‌پذیری کلاس گندم از جو بوده است. در مرحله بعد، پس از محاسبه شاخص NDVI، پوشش گیاهی منطقه از طریق حد آستانه حداقل و حداکثر طبقه‌بندی گردید. با توجه به آن که طبقه اراضی زراعی از سایر طبقات در شاخص مورد بررسی به راحتی قابل جداسازی نبود، بنابراین از تکنیک متراکم‌سازی داده‌ها که در تفسیر اطلاعات کمک‌کننده است، مانند آنالیز مؤلفه‌های اصلی (PCA) استفاده شد. در این مطالعه مؤلفه اصلی دوم، حداکثر اطلاعات را جهت جداسازی اراضی زراعی دارا بوده است، لذا به منظور جداسازی اطلاعات پوشش اراضی زراعی از آن استفاده شد. سپس طبقه اراضی زراعی با سایر طبقات حاصل از شاخص گیاهی ترکیب و نقشه نهایی تهیه شد. در مرحله بعدی، با کمک اطلاعات تقویم زراعی منطقه، هر یک از محصولات به وسیله تفسیر بصری تصویر و نیز تحلیل طیفی شاخص NDVI، در نمودار تغییرات رشد محصولات شناسایی شدند (شکل ۶). با توجه به این که محصولات زراعی در طول سال دارای مراحل رشد و مقادیر شاخص گیاهی می‌باشند، حد آستانه‌های شاخص NDVI متناسب با نوع هر یک از محصولات زراعی نظیر گندم، جو، برنج و ذرت، تنظیم شدند (شکل ۷).



شکل ۶- تغییرات مقادیر NDVI محصولات غالب در مراحل رشد

Figure 6- NDVI changes for major crops in growth stages



شکل ۷- نقشه اراضی زیرکشت در شاخص NDVI

Figure 7- Cultivated lands map in NDVI index

دقت سه روش طبقه‌بندی محصولات زراعی با توجه به طیف انعکاسی هر محصول بوده است. بر این اساس، میزان صحت تعلق هر یک از پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای به طبقات مختلف گروه‌های گیاهی موجود در منطقه، مقادیر صحت کلی و ضریب کاپا برای الگوریتم‌های طبقه‌بندی و شاخص‌های طیفی را مشخص می‌کند.

طبق نقشه‌های حاصل آمده، اراضی زراعی منطقه بیشتر در امتداد رودخانه بوده و آب رودخانه نیز اولین منبع تأمین آب برای زراعت این زمین‌ها است. با فاصله‌گیری از رودخانه، کشت گندم و جو بیشتر شده و این اراضی در نواحی شمالی و شرقی منطقه بیشتر دیده می‌شوند. نتایج اعتبارسنجی روش‌ها، طبق شاخص‌های صحت کلی، ضریب کاپا و پارامترهای دقت کاربر و تولیدکننده در جدول ۵ آمده است که تفاوت مقادیر صحت کلی و ضریب کاپای بدست آمده، ناشی از تفاوت

جدول ۵- اعتبارسنجی روش‌های طبقه‌بندی مورد استفاده

Table 5- The accuracy evaluation of classification methods

کلاس Class	ANN accuracy		SVM accuracy		NDVI accuracy	
	Producer	User	Producer	User	Producer	User
گندم Wheat	0.78	0.80	0.77	0.82	0.89	0.91
جو Barley	0.83	0.76	0.84	0.76	0.88	0.90
برنج Rice	0.90	0.94	0.92	0.93	0.99	0.98
ذرت Corn	0.88	0.91	0.89	0.95	0.98	0.97
سایر اراضی Other lands	0.96	0.98	0.97	0.94	0.95	0.93
صحت کلی Overall accuracy	0.89		0.92		0.97	
ضریب کاپا Kappa coefficient	0.82		0.90		0.93	

داشته است. بنابراین، نتایج صحت شاخص NDVI، قابلیت و توانایی بالاتر شاخص‌های طیفی را نسبت به روش‌های طبقه‌بندی نشان داد. در نهایت، مساحت اراضی زیرکشت محصولات زراعی بدست آمده از تصاویر ماهواره‌ای (نتایج دو رویکرد)، با آمار سطح زیرکشت سازمان جهاد کشاورزی خوزستان در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷ مقایسه شده و درصد خطای آن‌ها برآورد گردید (جدول ۶). بر پایه نتایج بدست آمده، از کل اراضی زیرکشت محصولات زراعی شهرستان شوش به مقدار ۱۶۳۳۱۳/۷ هکتار حدود ۱۰۳۵۱۳/۲ هکتار یا ۶۳/۴ درصد از مجموع اراضی زیرکشت منطقه به نسبت روش شبکه عصبی مصنوعی، حدود ۱۰۲۸۷۵/۱ هکتار یا ۶۳/۰ درصد از کل اراضی زیرکشت منطقه برای روش ماشین بردار پشتیبان و حدود ۱۰۲۲۷۷/۳ هکتار یا ۶۲/۶ درصد از مجموع اراضی زیرکشت منطقه به شاخص NDVI اختصاص یافت که مقادیر در مقایسه با آمار سطح زیرکشت سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان به ترتیب خطاهای ۱۱/۰، ۶/۲ و ۱/۸ درصد را نشان دادند. علت این اختلاف، شباهت طیف انعکاسی در برخی از نقاط بوده که بر توان تفکیک و تشخیص پدیده‌ها اثر گذاشته و موجب افزایش خطا در برآورد سطح زیرکشت محصولات مختلف می‌شود. بیشترین کمترین خطا در برآورد سطح زیرکشت برای روش شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب در اراضی محصولات جو و برنج و در روش ماشین بردار پشتیبان به ترتیب در اراضی محصولات گندم و برنج بوده است. در مجموع، روش ماشین بردار پشتیبان، خطای برآورد سطح زیرکشت کمتری نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی داشته که این تداعی کننده قابلیت و توانایی بالای روش ماشین بردار پشتیبان در شناسایی و تفکیک محصولات زراعی منطقه بوده است.

مطابق با نتایج جدول ۵، در رویکرد طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای، روش ماشین بردار پشتیبان با صحت کلی و ضریب کاپای ۰/۹۲ و ۰/۹۰، دقت بیشتری را نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی داشته است. لذا در این رویکرد، روش ماشین بردار پشتیبان در تفکیک پدیده‌هایی که رفتار طیفی نزدیک به هم دارند، موفق‌تر عمل کرده و تفکیک مناسب‌تری روی محصولات زراعی مورد مطالعه نشان داده است. در نقشه حاصل از روش شبکه عصبی مصنوعی، به دلیل تشابه طیفی محصولات در برخی نقاط گیاهان به خوبی از هم تفکیک نشده بودند و در این مکان‌ها پیکسل‌هایی دیده می‌شد که مربوط به یک گیاه بودند، اما در طبقه سایر گیاهان که با این گیاه همزمانی دوره رشد داشتند، در نظر گرفته شده بود. در پژوهش حاضر، ابتدا روش‌های طبقه‌بندی با ۵۰ درصد نمونه‌های تعلیمی برای هر کلاس اجرا شدند. مقادیر صحت کلی و ضریب کاپای نقشه‌های بدست آمده در این مرحله برای روش شبکه عصبی مصنوعی به ترتیب ۰/۸۰ و ۰/۷۲ و برای روش ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۸۹ بدست آمد. لذا، با کاهش تعداد نمونه‌های تعلیمی، صحت نقشه‌های حاصل روش شبکه عصبی مصنوعی کاهش یافته و در نتیجه تا حد امکان باید از نمونه‌های بیشتری استفاده شود تا تغییرات بسیاری از ویژگی‌های طیفی در این گستره پیوسته نیز قرار گیرد. اما در روش ماشین بردار پشتیبان، با استفاده از نیمی از داده‌های تعلیمی نیز می‌توان به دقتی معادل استفاده از کل نمونه‌های تعلیمی رسید و دقت بیشتری نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی ارائه نمود. در رویکرد دوم، شاخص NDVI با صحت کلی و ضریب کاپای ۰/۹۷ و ۰/۹۳، دقت بالاتری نسبت به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان

جدول ۶- مقایسه نتایج برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی روش‌های طبقه‌بندی با آمار سازمان جهاد کشاورزی در سال زراعی ۹۸-۱۳۹۷

Table 6- Comparison of crop area estimation of classification methods with OAJ Statistics in the crop year 2019-2020

محصول Crop	KOAJ	ANN		SVM		NDVI	
	Crop area (Ha)	Crop area (Ha)	(%) Error	Crop area (Ha)	(%) Error	Crop area (Ha)	(%) Error
گندم Wheat	49982	55829.8	+11.7	54430.4	+8.9	52081.2	+4.2
جو Barley	1533	1718.4	+12.1	1634.1	+6.6	1514.6	-1.2
برنج Rice	26820	25183.9	-6.1	25693.5	-4.2	26095.8	-2.7
ذرت Corn	22252	2076.1	-6.7	21117.1	-5.1	22585.7	+1.5
مجموع Total	100587	103512.2	11.0	102875.1	6.2	102277.3	1.8

بحث

طبقه‌بندی، بهترین دقت مربوط به روش ماشین بردار پشتیبان است. خطای نسبی این روش در قیاس با آمار سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان، نسبت به روش شبکه عصبی مصنوعی پایین‌ترین مقادیر را نشان داد. این مورد با یافته‌های مطالعات گونزالس و همکاران (Gonzalez et al., 2022) و نیز موسوی و همکاران (Moussavi et al., 2020) همخوانی دارد. در رویکرد دوم، مقایسه مساحت بدست آمده با استفاده از شاخص‌های گیاهی، با آمار سطح زیرکشت سازمان جهاد کشاورزی استان خوزستان و نیز ارزیابی دقت این روش، نشانگر کارایی مناسب شاخص NDVI در برآورد سطح زیرکشت محصولات منطقه نسبت به روش‌های طبقه‌بندی است. این مطلب با نتایج مطالعات روزنیک و همکاران (Roznik et al., 2022)، ریاحی و همکاران (Riahi et al., 2019) و نیز ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2017) که توان بالاتر شاخص طیفی مورد بررسی را در برآورد سطح زیرکشت نشان دادند، مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی، از مهم‌ترین موضوعات در مدیریت کشاورزی می‌باشد که در برنامه‌ریزی‌های دولت‌ها از جمله تدوین سیاست‌های غذایی، تنظیم قیمت بازار، مدیریت واردات، توسعه صادرات و انبارداری مناسب محصولات مفید است. داده‌های سنجش از دور به منظور تعیین سطح زیرکشت محصول، بهبود اداره اراضی و تسهیل در اجرای تکنیک‌های کشاورزی دقیق اثرگذار هستند. هدف اصلی برآورد دقیق سطح زیرکشت محصولات، دسترسی به حداکثر عملکرد محصول و حداقل هزینه در یک اکوسیستم سالم با استفاده ترکیبی از فناوری‌ها است. با توجه به نتایج پژوهش در صورت انتخاب

بیشتر مطالعاتی که در زمینه مقایسه روش‌های طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای انجام شده‌اند، ماشین بردار پشتیبان به عنوان روشی موفق در زمینه استخراج اراضی زراعی معرفی شده است. بیشترین و کمترین خطای برآورد سطح زیرکشت در شاخص NDVI به ترتیب در اراضی محصولات گندم و جو بوده است. بنابراین، در مقایسه نتایج دو رویکرد با آمار سطح زیرکشت جهاد کشاورزی، شاخص NDVI کمترین خطا را داشته که نشان‌دهنده قابلیت بالای شاخص‌های طیفی در برآورد سطح زیرکشت محصولات زراعی منطقه با توجه به چرخه رشد آن‌ها بوده است. شاخص NDVI بواسطه داشتن حد آستانه و شناسایی بهتر تراکم پوشش گیاهی، مقادیر خطای نتایج را به حداقل رسانیده است. لذا، بر پایه نتایج ارزیابی صحت و مقایسه سطح زیرکشت محصولات زراعی با آمار سازمان جهاد کشاورزی، استفاده از شاخص NDVI، بهترین تخمین از سطح زیرکشت محصولات زراعی غالب منطقه را ارائه می‌دهد. به طور کلی، تفاوت مساحت‌های بدست آمده از روش‌های مورد استفاده با آمار و اطلاعات سطح زیرکشت سازمان جهاد کشاورزی، ممکن است از مواردی نشأت گرفته باشد؛ مورد اول، تفاوت تاریخ کشت و عوامل بعدی برگرفته از آن، که خود باعث ایجاد مشکلاتی نظیر بازتاب متفاوت مزارع محصولات مختلف در یک تصویر شده است. مورد دوم، اراضی زراعی این منطقه کوچک بوده و مساحت اغلب آن‌ها زیر یک هکتار است. همچنین، محصولات زراعی منطقه بسیار متنوع هستند. مورد سوم، کوچک‌ترین گستره‌ای که تصویر استفاده شده در این مطالعه قادر است تفکیک کند، حدود ۹۰۰ مترمربع است که برای اراضی زراعی محدوده مورد مطالعه، عدد بزرگی است و باعث خطا می‌شود. نتایج نشان داد، از میان روش‌های

نزدیکی آمار سازمان جهاد کشاورزی خوزستان به نتایج بدست آمده از طبقه‌بندی این شاخص کارایی و عملکرد مناسب‌تری داشته است. لذا برای تحقیقات آتی در این زمینه پیشنهاد می‌گردد که در تعیین سطح زیرکشت محصولات زراعی برای سایر مناطق کشور با حداکثر تشابه اقلیمی و تجانس جغرافیایی با شهرستان شوش، از پیاده‌سازی شاخص‌های طیفی استفاده شود.

تصاویر ماهواره‌ای مناسب نظیر تصاویر لندست هشت بر پایه مراحل رویشی گیاهان زراعی می‌توان عمل شناسایی، تفکیک محصولات زراعی و برآورد سطح زیرکشت را با دقت بالایی انجام داد. با توجه به نتایج سه روش طبقه‌بندی مورد استفاده در پژوهش، جهت استخراج سطح زیرکشت محصولات زراعی شهرستان شوش، شاخص NDVI با مقادیر صحت کلی و ضریب کاپای بالاتر نسبت به دو روش دیگر و

منابع

1. Alavipanah, K. (2015). *Application of remote sensing in earth sciences (Soil sciences)*. University of Tehran Press: Tehran. (In Persian). https://press.ut.ac.ir/book_765_2640.html.
2. Asming, M.A., Ibrahim, A.M., & Abir, I.M. (2022). Processing and classification of landsat and sentinel images for oil palm plantation detection. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 26: 100747. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100747>.
3. Cabaneros, S.M., Calautit, J.K., & Hughes, B.R. (2019). A review of artificial neural network models for ambient air pollution prediction. *Environmental Modelling and Software* 119: 285-304. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.06.014>.
4. Chanu, C.S., Elango, L., & Shankar, G.R. (2021). A geospatial approach for assessing the relation between changing land use/land cover and environmental parameters including land surface temperature of Chennai metropolitan city, India. *Arabian Journal of Geosciences* 14(2): 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06409-0>.
5. Chen, Y., Lu, D., Moran, E., Batistella, M., Dutra, L.V., Sanches, I., Da Silva, R., Huang, J., Luiz, A.J., & De Oliveira, M. (2018). Mapping croplands, cropping patterns, and crop types using MODIS time series data, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 69: 133-147. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.03.005>.
6. Deng, X., & Gibson, J. (2019). Improving eco-efficiency for the sustainable agricultural production: A case study in Shandong, China, *Technological Forecasting and Social Change* 144: 394-400. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.027>.
7. Derksen, D., Inglada, J., & Michel, J. (2020). Geometry aware evaluation of handcrafted superpixel-based features and convolutional neural networks for land cover mapping using satellite imagery. *Remote Sensing* 12(3): 513. <https://doi.org/10.3390/rs12030513>.
8. Dong, Q., Liu, J., Wang, L., Chen, Z., & Gallego, J. (2017). Estimating crop area at county level on the North China Plain with an indirect sampling of segments and an adapted regression estimator. *Sensors* 17(11): 2638. <https://doi.org/10.3390/s17112638>.
9. Ebodé, V., Braun, J.J., Nnomo, B.N., Mahé, G., Nkiaka, E., & Riotte, J. (2022). Impact of rainfall variability and land use change on river discharge in South Cameroon. *Water* 14(6): 941. <https://doi.org/10.3390/w14060941>.
10. Garain, S., Mitra, D., & Das, P. (2021). Mapping hydrocarbon microseepage prospect areas by integrated studies of Aster processing, geochemistry and geophysical surveys in Assam-Arakan Fold Belt, NE India. *Applied Earth Observation and Geoinformation* 102: 102432. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102432>.
11. García, J.A., Ouhbi, S., Benmouna, B., Garcia-Mateos, G., Fernández-Alemán, J.L., & Molina-Martínez, J.M. (2020). Systematic mapping study on remote sensing in agriculture, *Applied Sciences* 10(10): 1-29. <https://doi.org/10.3390/app10103456>.
12. Gonzalez, F.A., Vuelvas, J., Correa, C.A., Vallejo, V.E., & Patino, D. (2022). Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators, Review. *Ecological Indicators* 135: 108517. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108517>.
13. Hedayati, A., Vahidnia, M.H., & Behzadi, S. (2022). Paddy lands detection using Landsat-8 satellite images and object-based classification in Rasht City, Iran. *Remote Sensing & Space Science* 25(1): 73-84. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.12.008>.
14. Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., & Shao, G. (2021). A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Forestry Research* 32(1): 1-6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>.
15. Hudait, M., & Patel, P.P. (2022). Crop-type mapping and acreage estimation in smallholding plots using Sentinel-2 images and machine learning algorithms: Some comparisons. *Remote Sensing and Space Science* 25(1): 147-156. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2022.01.004>.
16. Jain, D.K., Dubey, S.B., Choubey, R.K., Sinhal, A., Arjaria, S.K., Jain, A., & Wang, H. (2018). An approach for hyperspectral image classification by optimizing SVM using self organizing map. *Computational Science* 25: 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2017.07.016>.

17. Khodakarami, L., & Soffianian, A. (2012). Application of multi temporal remote sensing for precision farming. *Water and Soil Science* 16(59): 215-231. (In Persian with English abstract) [20.1001.1.24763594.1391.16.59.16.9](https://doi.org/10.1001.1.24763594.1391.16.59.16.9).
18. Khuzestan Organization Agricultural-Jihad. (2019). Crop statistics of Khuzestan Province in 2019-2020.
19. Kim, D., Kang, S., and Cho, S. 2020. Expected margin-based pattern selection for support vector machines. *Expert Systems with Applications* 139: 112865. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.112865>.
20. Kundu, A., Denis, D.M., Patel, N.R., & Dutta, D. (2018). A Geo - spatial study for analysing temporal responses of NDVI to rainfall. *Tropical Geography* 39(1): 107-116. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12217>.
21. Li, P., Jiang, L., & Feng, Z. (2013). Cross-comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors. *Remote Sensing* 6(1): 310-329. <https://doi.org/10.3390/rs6010310>.
22. Liaqat, M.U., Cheema, M.J.M., Huang, W., Mahmood, T., Zaman, M., & Khan, M. (2017). Evaluation of MODIS and Landsat multiband vegetation indices used for wheat yield estimation in irrigated Indus Basin. *Computers and Electronics in Agriculture* 138: 39-47. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.04.006>.
23. Lyons, M.B., Keith, D.A., Phinn, S.R., Mason, T.J., & Elith, J. (2018). A comparison of resampling methods for remote sensing classification and accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 208: 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.026>.
24. Manickam, L., Subramanian, D., Khandal, S., & Hegde, R. (2021). Modeling and mapping of salt-affected soils through spectral indices in land plains of semi-arid agro-sociological region. *Indian Society of Remote Sensing* 49(6): 1475-1481. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01321-w>.
25. Martínez, J.B.G., Brown, M.M., Christodoulou, X., Alvarado, K.A., & Denkenberger, D.C. (2021). Potential of microbial electrosynthesis for contributing to food production using CO₂ during global agriculture inhibiting disasters. *Cleaner Engineering and Technology* 4: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100139>.
26. Martínez2021, M., Ogando-Martínez, A., Troncoso-Pastoriza, F., López-Gómez, J., Febrero-Garrido, L., & Granada-Álvarez, E. (2021). Use of optimised MLP neural networks for spatiotemporal estimation of indoor environmental conditions of existing buildings. *Building and Environment* 205: 108243. <https://doi.org/10.1016/j.builenv.2021.108243>.
27. Mirzaei, M., Jafari, A., Gholamalifard, M., Azadi, H., Shoostari, S.J., Moghaddam, S.M., Gebrehiwot, K., & Witlox, F. (2020). Mitigating environmental risks: Modeling the interaction of water quality parameters and land use cover. *Land Use Policy* 95: 103766. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.12.014>.
28. Moussavi, S.A., Abbaszadeh Tehrani, N., & Janalipour, M. (2020). Estimation of wheat area cultivation using Sentinel 2 satellite images, Case study: Sojasroud Region, Khodabandeh City, Zanjan Province. *Environmental Research and Technology* 7(7): 77-90. <https://doi.org/10.29252/5.7.77>.
29. Ouzemou, J.E., El Harti, A., Lhissou, R., El Moujahid, A., Bouch, N., El Ouazzani, R., El Mostafa, B., & El Ghmari, A. (2018). Crop type mapping from pansharpened Landsat 8 NDVI data: A case of a highly fragmented and intensive agricultural system. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 11: 94-103. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.05.002>.
30. Pageot, Y., Baup, F., Inglada, J., Baghdadi, N., & Demarez, V. (2020). Detection of irrigated and rainfed crops in temperate areas using Sentinel-1 and Sentinel-2 time series. *Remote Sensing* 12(18): 3044. <https://doi.org/10.3390/rs12183044>.
31. Parmar, J., Das, P., & Dave, S.M. (2021). A machine learning approach for modelling parking duration in urban land-use. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 572: 125873. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2021.125873>.
32. Paudel, D., Boogaard, H., de Wit, A., Janssen, S., Osinga, S., Pylaniadis, C., & Athanasiadis, I.N. (2021). Machine learning for large-scale crop yield forecasting. *Agricultural Systems* 187: 103016. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103016>.
33. Phan, P., Chen, N., Xu, L., & Chen, Z. (2020). Using multi-temporal MODIS NDVI data to monitor tea status and forecast yield: A case study at Tanuyen, Laichau, Vietnam. *Remote Sensing* 12(11): 1814. <https://doi.org/10.3390/rs12111814>.
34. Poursanidis, D., Topouzelis, K., & Chrysoulakis, N. (2018). Mapping coastal marine habitats and delineating the deep limits of the Neptune's seagrass meadows using very high resolution Earth observation data. *Remote Sensing* 39(23): 8670-8687. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1490974>.
35. Ramírez, J.C., Restrepo-Girón, A.D., & Nope-Rodríguez, S.E. (2019). Detection of internal defects in carbon fiber reinforced plastic slabs using background thermal compensation by filtering and support vector machines. *Nondestructive Evaluation* 38(1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/s10921-019-0569-6>.
36. Razaque, A., Benhajfrej, M., Almiani, M., Alotaibi, M., & Alotaibi, B. (2021). Improved support vector machine enabled radial basis function and linear variants for remote sensing image classification. *Sensors* 21(13): 4431. <https://doi.org/10.3390/s21134431>.
37. Riahi, V., Zeaiean, P., Azizpour, F., & Darouei, P. (2019). Identification and investigation of the area under cultivation in Lenjanat using Landsat 8 satellite images. *Applied Researches in Geographical Sciences* 19(52):

- 147-169. (In Persian with English abstract) <https://doi.org/10.29252/jgs.19.52.147>.
38. Rienow, A., Mustafa, A., Krelaus, L., & Lindner, C. (2021). Modeling urban regions: Comparing random forest and support vector machines for cellular automata. *Transactions in GIS* 25(3): 1625-1645. <https://doi.org/10.1111/tgis.12756>.
39. Roznik, M., Boyd, M., & Porth, L. (2022). Improving crop yield estimation by applying higher resolution satellite NDVI imagery and high-resolution cropland masks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 25: 100693. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100693>.
40. Solano-Correa, Y.T., Bovolo, F., & Bruzzone, L. (2018). An approach for unsupervised change detection in multitemporal VHR images acquired by different multispectral sensors. *Remote Sensing* 10(4): 533. <https://doi.org/10.3390/rs10040533>.
41. Teffera, Z.L., Li, J., Debsu, T.M., & Menegesh, B.Y. (2018). Assessing land use and land cover dynamics using composites of spectral indices and principal component analysis: A case study in middle Awash subbasin, Ethiopia. *Applied Geography* 96:109-129. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.05.015>.
42. Tomala, A.S., Raczko, E., & Zagajewski, B. (2020). Comparison of support vector machine and random forest algorithms for invasive and expansive species classification using airborne hyperspectral data. *Remote Sensing* 12(3): 516. <https://doi.org/10.3390/rs12030516>.
43. Van-Klompburg, T., Kassahun, A., & Catal, C. (2020). Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture* 177: 105709. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105709>.
44. Verma, P., Raghubanshi, A., Srivastava, P.K., & Raghubanshi, A.S. (2020). Appraisal of kappa-based metrics and disagreement indices of accuracy assessment for parametric and nonparametric techniques used in LULC classification and change detection. *Modeling Earth Systems and Environment* 6(2): 1045-1059. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00740-x>.
45. Viana, C.M., Freire, D., Abrantes, P., Rocha, J., & Pereira, P. (2022). Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. *Science of The Total Environment* 806: 150718. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150718>.
46. Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A., & Zhao, S. (2015). An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote Sensing* 7(4): 4268-4289. <https://doi.org/10.3390/rs70404268>.
47. Wang, K., Cheng, L., & Yong, B. (2020). Spectral similarity based kernel of SVM for hyperspectral image classification. *Remote Sensing* 12(13): 2154. <https://doi.org/10.3390/rs12132154>.
48. Wang, M., Wander, M., Mueller, S., Martin, N., & Dunn, J.B. (2022). Evaluation of survey and remote sensing data products used to estimate land use change in the United States: Evolving issues and emerging opportunities. *Environmental Science and Policy* 129: 68-78. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.021>.
49. Yopez, S., Laraque, A., Martinez, J.M., De Sa, J., Carrera, J.M., Castellanos, B., Gallay, M., & Lopez, J.L. (2018). Retrieval of suspended sediment concentrations using Landsat-8 OLI satellite images in the Orinoco River, Venezuela. *Comptes Rendus Geoscience* 350(1-2): 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.08.004>.
50. Yi, Z., Jia, L., & Chen, Q. (2020). Crop classification using multi-temporal Sentinel-2 data in the Shiyang River Basin of China. *Remote Sensing* 12(24): 4052. <https://doi.org/10.3390/rs12244052>.
51. Zafari, A., Zurita-Milla, R., & Izquierdo-Verdiguier, E. (2019). Evaluating the performance of a random forest kernel for land cover classification. *Remote Sensing* 11(5): 575. <https://doi.org/10.3390/rs11050575>.
52. Zare, M., Drastig, K., & Zude-Sasse, M. (2020). Tree water status in apple orchards measured by means of land surface temperature and vegetation index (LST-NDVI) trapezoidal space derived from Landsat 8 satellite images. *Sustainability* 12(1): 70. <https://doi.org/10.3390/su12010070>.
53. Zhang, H., Li, Q., Liu, J., Shang, J., Du, X., Zhao, L., Wang, N., & Dong, T. (2017). Crop classification and acreage estimation in North Korea using phenology features. *GIScience & Remote Sensing* 54(3): 381-406. <https://doi.org/10.1080/15481603.2016.1276255>.
54. Zhang2019, L., Liu, Z., Liu, D., Xiong, Q., Yang, N., Ren, T., Zhang, C., Zhang, X., & Li, S. (2019). Crop mapping based on historical samples and new training samples generation in Heilongjiang Province, China. *Sustainability* 11(18): 5052. <https://doi.org/10.3390/su11185052>.
55. Ziaiean, P., Bidhendi, S.L., & Eskandari Nodeh, M. (2010). Mapping and acreage estimating of rice agricultural land using radarsat a satellite images. *Physical Geography Research Quarterly* 41(68): 45-58. (In Persian with English abstract) https://jphgr.ut.ac.ir/article_21495.html?lang=fa.



Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Maize Yield (Single Cross 704)

F. Alizadegan¹, M.A. Gholami Sefidkouhi^{2*}, S. Shiukhy³

Received: 11-07-2022

Revised: 30-07-2022

Accepted: 26-08-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Alizadegan, F., Gholami Sefidkouhi, M.A., & Shiukhy, S. (2022). Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Mize Yield (*Single Cross 704*). *Journal of Water and Soil* 36(4): 511-524. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.77424.1178](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.77424.1178)

Introduction

Increased agricultural activities, the occurrence of successive droughts, and limited freshwater resources, along with increasing population, have made a priority for the importance of protecting water resources in programs of developed and developing countries. Due to the climatic conditions in Iran, which has a wide range of arid and semi-arid characteristics, facing the challenge of water resources crisis, is inevitable. Therefore, the use of wastewater is very important.

Materials and Methods

This research was conducted in the research farm of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources (SANRU), which has a silty clay soil texture. The latitude and longitude of the region are 36° 40' N and 53° 04' E, respectively. Its height above sea level is 21 meters. According to Demarten classification, Sari city has a temperate humid climate. The long-term average temperature of Sari is 11.18 °C and the total long-term rainfall is 780 mm. In order to evaluate the wastewater effects on soil chemical characteristics, microelements concentrations, heavy metals accumulation and Maize yield (Single Cross 704), an experiment was carried out as factorial based on a completely randomized design with treatments included; Water source factor (wastewater (A1), well water (A2)), Irrigation (subsurface method (I1) and (drip method (I2)) with three replication in 2018-2019 under lycimetric conditions, at the Sari Agriculture and Natural Resources University (SANRU), Iran.

Results and Discussion

According to this study results, the effect of type of irrigation source on soil electrical conductivity, soil microelements and heavy metals accumulation of the soil was significantly different ($P \leq 0.01$). The highest soil electrical conductivity with a value of 1.8 dS.m^{-1} was observed in the conditions of using treated wastewater. The highest amount of total nitrogen, phosphorus and potassium were related to the source of treated wastewater with values of 0.086, 24.2 and 222.2 mg.kg^{-1} , respectively. The results showed that the accumulation of soil Pb (0.07) and Cd (0.014 mg.kg^{-1}) in irrigation with treated wastewater increased compare to the well water source by 0.05 and 0.010 mg.kg^{-1} , respectively. Also, the effect of irrigation method and the interaction effect of source and method irrigation on soil chemical characteristics, microelements concentration and heavy metals accumulation were not significant. The use of wastewater by increasing soil stability improves soil physical condition, increases soil fertility, increases photosynthetic products, increases the efficiency of plant photosynthetic system and ultimately improves plant growth. The use of subsurface irrigation resulted in a 67% increase in grain yield and 28% increase in biomass productivity compared to the drip method. Adequate nutrients during the reproductive growth stage of the plant play an important role in grain growth. Therefore, it can be said that the nutrients in the wastewater have increased the grain yield compared to using the well water source. Because the wastewater

1, 2 and 3- Master Graduate of Water Engineering, Associate Professor and Assistant Professor of Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Iran, respectively.

(*- Corresponding Author Email: magholami@sanru.ac.ir)

contains nutrients and micronutrients such as: nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, zinc and iron were relative to the well water source and increased maize grain yield. The results showed that the use of effluent compared to well water, caused the absorption of more Pb and Cd in the grain, leaf and stem of maize. Due to the use of wastewater as water source, the amount of Pb uptake among different parts of the maize, with values of 27.2, 22.5 and 20.5 mg.g⁻¹, respectively, related to the grain, leaf and stem. However, the uptake of Cd in the grains, leaves and stems was 2.32, 1.35 and 2.01 mg.g⁻¹, respectively. According to the results, the high concentration of heavy metals Pb and Cd due to the use of wastewater in the grain sector directly threatens human health. Also, the concentration of heavy metals Pb and Cd in the leaf and stem parts of corn, by endangering the health of livestock and poultry, indirectly affects human health.

Conclusion

The results showed that irrigation with treated wastewater due to its richness in nutrients and microelements, improves soil fertility and creates favorable conditions by increasing soil organic matter and minerals for plant growth. Also, according to the permissible threshold values of the concentration of heavy metals Pb and Cd in plants, the accumulation of heavy metals Pb and Cd in the grain, stem and leaf of single cross 704 corn, will not be a problem for consumers. Optimal use of wastewater can increase soil fertility and the ability of plants to absorb nutrients from the soil and ultimately increase plant yield.

Keywords: Electrical conductivity, Grain yield, Heavy metal, Subsurface irrigation, Wastewater

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۵۱۱-۵۲۴

تأثیر پساب شهری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک و عملکرد ذرت سینگل کراس ۷۰۴

فاطمه عزیزادگان^۱ - محمدعلی غلامی سفیدکوهی^{۲*} - سعید شیوخی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۴

چکیده

به منظور بررسی اثرگذاری پساب شهری بر غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک و برخی ویژگی‌های ذرت، آزمایشی در قالب طرح کاملاً تصادفی با آرایش فاکتوریل با تیمارهای آزمایشی شامل؛ عامل منبع آب آبیاری (پساب (W1) و آب چاه (W2))، و عامل روش آبیاری (زیرسطحی (S1) و قطره‌ای نوار تیپ (S2))، در طول فصل رشد ۹۹-۱۳۹۸، در لایسمتر مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. بر پایه یافته‌ها، تأثیر نوع منبع آبیاری بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک، غلظت عناصر پرمصرف خاک و انباشت فلزات سنگین در خاک تفاوت معنی‌دار داشت ($P \leq 0.01$). به طوری که بیشترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک با مقدار ۱/۸ دسی‌زیمنس بر متر، در شرایط استفاده از پساب مشاهده شد. بالاترین میزان نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم به ترتیب با مقادیر ۰/۰۸۶، ۲۴/۲ و ۲۲۶/۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم مربوط به منبع آب پساب بود. نتایج نشان داد که میزان انباشت فلزات سرب (۰/۰۷) و کادمیوم (۰/۰۱۴) خاک، در آبیاری با پساب نسبت به منبع آب چاه به ترتیب با ۰/۰۵ و ۰/۰۱ میلی‌گرم بر کیلوگرم، افزایش یافت. همچنین تأثیر روش آبیاری و اثر متقابل منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف خاک و انباشت فلزات سنگین در خاک معنی‌دار نبود. نتایج نشان داد که بیشترین عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده در آبیاری با منبع پساب به ترتیب به میزان ۹۱۸/۶۶ کیلوگرم در هکتار و ۱/۴۵ کیلوگرم در مترمکعب مشاهده شد. بهره‌گیری از آبیاری زیرسطحی افزایش ۶۷ درصدی عملکرد دانه و ۲۸ درصدی بهره‌وری زیست‌توده در مقایسه با روش قطره‌ای نوار تیپ، را در پی داشت. بر پایه یافته‌ها، استفاده از پساب در مقایسه با آب چاه، باعث جذب میزان بیش‌تری از مقادیر سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه گیاه ذرت شد در حالیکه غلظت فلزات سنگین زه‌آب حاصل از آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشتند. به طور کلی، استفاده بهینه از پساب برای آبیاری، با بهبود شرایط فیزیکی و شیمیایی خاک، افزایش عملکرد گیاه را به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری زیرسطحی، پساب، عملکرد دانه، فلزات سنگین، قابلیت هدایت الکتریکی

مقدمه

افزایش داده است (Mahfooz et al., 2020). بنابراین استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده، نیمه‌تصفیه‌شده یا تصفیه نشده بیشتر موردتوجه قرار گرفته است (Abegunrin et al., 2016). با توجه به اینکه مناطق وسیعی از ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک می‌باشند، لذا دارای بارندگی سالانه کم و تخییر سالانه زیادی می‌باشند. این امر موجب شده است که تأمین تقاضای آب کشاورزی با منابع معمول آب

گسترش فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، وقوع خشک‌سالی‌های پی‌درپی و محدودیت منابع آب شیرین همگام با رشد روزافزون جمعیت، اهمیت حفاظت از منابع آب را در الویت برنامه‌های کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه جای داده است. افزایش جمعیت نه تنها تقاضای آب شیرین را افزایش داده، بلکه حجم فاضلاب تولیدی را نیز

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته، دانشیار و استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

(Email: magholami@sanru.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

قطره‌ای زیرسطحی نشان می‌دهد که انتقال عناصر سمی به محصولات تا حد زیادی کاهش می‌یابد (Lam et al., 2004). اخیراً، ارزیابی مواد شیمیایی موجود در فاضلاب‌ها به‌ویژه فلزات سنگینی که توانایی نفوذ و انباشت در خاک، گیاه و در نهایت زنجیره غذایی را دارند، توجه محققان و دستداران محیط زیست را به خود جلب کرده است. کابوسی (Kaboosi, 2016) در تحقیق انجام شده روی خصوصیات خاک در شهر بندرگز، بیان نمود که استفاده مداوم از فاضلاب در مقایسه با آب شیرین هیچ محدودیتی در خاک از جنبه خطر شوری و سدیمی بودن ایجاد نکرد. همچنین استفاده از فاضلاب تصفیه‌شده برای آبیاری بر اساس استانداردها و معیارهای جهانی باوجود محدودیت‌های کلر و بی‌کربنات را مناسب دانستند. برخی مطالعات حاکی از تأثیرات پساب بر افزایش آلودگی خاک به فلزات سنگین می‌باشند که می‌توان به مطالعات (Hoseinpoor et al., 2008; Singh and Agrawal, 2012; Chen et al., 2013) اشاره کرد. هنگامی که ظرفیت خاک برای نگهداری فلزات سنگین به دلیل استفاده مکرر از فاضلاب کاهش می‌یابد، خاک شروع به آزاد سازی فلزات سنگین محلول برای جذب گیاه می‌کند. در نتیجه، این عناصر وارد گیاه شده و باعث ورود نهایی آن‌ها به زنجیره غذایی می‌شوند (Tripathi et al., 2016). بنابراین پساب برای استفاده مجدد باید با استانداردهای استفاده مجدد مطابقت داشته باشد، تا بتواند خطرات بهداشتی را کاهش دهد (WHO, 1989). کاربرد پساب در کشاورزی نیازمند مدیریت خاص می‌باشد تا ضمن بهره‌گیری مطلوب از آن، مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی در خاک، گیاه و منابع آب سطحی به کمترین حد ممکن برسد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی اثرات پساب شهری بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و انباشت فلزات سنگین و عملکرد ذرت انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی تأثیر آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده بر خصوصیات شیمیایی خاک و عملکرد ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) در شرایط لایسیمتری، آزمایشی بر پایه فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی در سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری اجرا شد. در این آزمایش عامل منبع آب آبیاری (W) در دو سطح شامل: پساب (W1) و آب چاه (W2) و همچنین عامل روش آبیاری (S) نیز در دو سطح شامل: قطره‌ای نوار تیپ (S1) و قطره‌ای زیرسطحی (S2) در نظر گرفته شد. عملیات کاشت گیاه ذرت رقم سینگل کراس ۷۰۴، در تاریخ ۱۱ خرداد ۱۳۹۸ در عمق ۵ سانتی‌متری خاک و در فواصل ۲۰ سانتی‌متر در ردیف، به‌صورت دستی در ۱۲ لایسیمتر زهکش‌دار به شکل استوانه با قطر قاعده ۱۱۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۴۵ سانتی‌متر از جنس پلی‌اتیلن انجام شد. خاک

با دشواری‌های فراوانی همراه شود (Keshavarz et al., 2005). استفاده از آب‌های نامتعارف به‌ویژه پساب شهری در کشاورزی برای تأمین نیاز آبی گیاهان و کاهش فشار بر منابع آب شیرین موجود، یک روش معمول در جهان به شمار می‌رود (Khawla et al., 2019). طباطبایی و همکاران (Tabatabaei et al., 2020)، بیان کردند که با وجود اینکه تخلیه فاضلاب به خاک یکی از بهترین روش‌های دفع فاضلاب است، اما فاضلاب به‌عنوان آلاینده زیست‌محیطی عمل کرده و برای جمع‌آوری، تصفیه و بازگرداندن فاضلاب به چرخه آب در طبیعت رعایت نکات و مسائل بهداشتی بایسته است. از یک‌سو، پساب می‌تواند باعث افزایش مواد مغذی و آلی خاک، بهبود فعالیت‌های بیولوژیکی و شرایط بهداشتی خاک (مواد آلی قابل تجزیه و میکروارگانیسم‌های مفید) گردد و در نتیجه کیفیت و پایداری خاک را ارتقا دهد. از سوی دیگر، بسته به منبع پساب، فاضلاب تصفیه شده ممکن است حاوی عناصر سمی باشد که می‌تواند در خاک و گیاه انباشته‌شده و در نتیجه سلامتی انسان را تهدید نماید (Salehi et al., 2008). فلزاتی مانند روی، کادمیوم، سرب، آهن، مس و نیکل اگر به مقدار زیاد به خاک وارد شوند، ممکن است باعث سمیت خاک و گیاه شود (Gatta et al., 2018).

آسولین و ناریس (Assouline and Narkis, 2011) اظهار داشتند که کاربرد پساب به‌طور متفاوتی در پروفیل خاک بسته به پارامترهای مدیریت آبیاری و خصوصیات جذبی گیاه تأثیرگذار است. نتایج سینگ و اگروال (Singh and Agrawal, 2012) نشان داد که آبیاری با فاضلاب منجر به تغییرات مفیدی در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک می‌شود. استفاده از فاضلاب باعث صرفه‌جویی در مواد مغذی غیر آلی شده و فرصتی مناسب برای دفع آن فراهم می‌آورد، اما مصرف‌کنندگان را از طریق عوامل بیماری‌زای مضر و انباشت عناصر سمی تهدید می‌کند.

اتخاذ راهکارهای مدیریتی و تصمیم‌گیری صحیح می‌تواند خطرات احتمالی مسمومیت خاک، به‌واسطه آبیاری با فاضلاب تصفیه‌شده را کاهش دهد (Asgari et al., 2007). خاولا و همکاران (Khawla et al., 2019) انتخاب روش آبیاری را راهکاری مناسب برای استفاده از پساب پیشنهاد کردند. لی و همکاران (Li et al., 2015) بیان نمودند که روش آبیاری قطره‌ای برای بهره‌برداری از فاضلاب تصفیه‌شده در مقایسه با سایر روش‌ها برای دستیابی به عملکرد مطلوب و رعایت مسائل بهداشتی برای کشاورزان و مصرف‌کنندگان مؤثرتر است. آبیاری قطره‌ای مستلزم آب باکیفیت مناسب است تا سیستم دچار گرفتگی قطره‌چکان نشود و آب به‌طور یکنواخت در سطح مزرعه توزیع گردد. سیستم‌های آبیاری قطره‌ای می‌توانند آب و مواد شیمیایی را به میزان کارآمدتری نسبت به سایر اشکال سیستم آبیاری به منطقه ریشه گیاهان برسانند (Thorburn et al., 2002). استفاده از فاضلاب از طریق سیستم‌های آبیاری

ظرفیت زراعی انجام شد.

$$I_n = \sum_{i=1}^m (\theta_{FCi} - \theta_{Bli}) i \times D_i \quad (1)$$

که در آن: I_n مقدار آب مورد نیاز خاک برای رسیدن به حد ظرفیت زراعی (میلی‌متر)؛ θ_{FCi} مقدار رطوبت حجمی در حالت ظرفیت زراعی؛ θ_{Bli} میزان رطوبت حجمی خاک قبل از آبیاری در لایه i و D_i ضخامت لایه i (میلی‌متر) می‌باشد. در سیستم آبیاری زیر سطحی، از لوله‌های زیر سطحی سان استریم با قطره‌چکان‌های درخت با فواصل ۲۰ سانتی‌متر با دبی ۱/۶ لیتر بر ساعت به صورت دو ردیفه و در سیستم آبیاری نوار تیپ نیز از قطره‌چکان‌های با فاصله ۲۰ سانتی‌متر و دبی ۲/۵ لیتر بر ساعت استفاده شد.

محل آزمایش دارای بافت لومی (۳۸ در صد شن، ۴۲ در صد سیلت و ۲۰ درصد رس) بود. برخی ویژگی‌های شیمیایی خاک و ویژگی‌های کیفی منابع آب مورد استفاده در آزمایش (چاه و فاضلاب تصفیه شده) در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شد.

مقدار و دور آبیاری اولیه به منظور سبز شدن و استقرار گیاه تا مرحله پنج‌برگی یکنواخت بود. تیمارهای مورد نظر پس از استقرار گیاه در مزرعه اعمال شدند. برنامه آبیاری بر اساس مدیریت آبیاری دقیق انجام شد. بدین منظور، با پایش روزانه میزان رطوبت خاک (رطوبت سنج Sentek مدل Diviner 2000) در منطقه توسعه ریشه، زمان آبیاری قبل از رسیدن رطوبت به حد بحرانی و مقدار آن نیز با استفاده از رابطه ۱، بر اساس کمبود رطوبت خاک تا رسیدن به حد

جدول ۱- ویژگی‌های شیمیایی خاک پیش و پس از اجرای آزمایش

Table 1- Soil chemical characteristics before and after testing

پارامتر Parameter	پیش از آزمایش Before experiment	پس از آزمایش After experiment
اسیدیته	pH 7.42	pH 7.6
قابلیت هدایت الکتریکی	EC (dS.m ⁻¹) 0.71	EC (dS.m ⁻¹) 1.62
نیتروژن کل	N (%) 0.08	N (%) 0.07
فسفر	P (mg.kg ⁻¹) 5.66	P (mg.kg ⁻¹) 17.54
پتاسیم	K (mg.kg ⁻¹) 137.26	K (mg.kg ⁻¹) 234.15
کلسیم	Ca (mg.kg ⁻¹) 4	Ca (mg.kg ⁻¹) 7.44
منیزیم	Mg (mg.kg ⁻¹) 10.27	Mg (mg.kg ⁻¹) 26.68
سدیم	Na (mg.kg ⁻¹) 0.42	Na (mg.kg ⁻¹) 7.60
سرب	Pb (mg.kg ⁻¹) 1.33	Pb (mg.kg ⁻¹) 1.35
کادمیوم	Cd (mg.kg ⁻¹) 0.04	Cd (mg.kg ⁻¹) 0.06

جدول ۲- متوسط ویژگی‌های شیمیایی آب چاه، پساب و حداکثر حد مجاز استفاده از آب پساب برای مصارف کشاورزی بر اساس استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، خواروبار کشاورزی و محیط‌زیست ایران (Yazdani et al., 2017)

Table 2- Chemical characteristics average of well water, treated wastewater and maximum permissible limits for treated wastewater application in agriculture according to World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization (FAO) and Iranian Department of Environment (IRNDOE)

ویژگی‌ها Characteristics	آب چاه Well water	پساب wastewater	استانداردهای پساب برای کشاورزی Wastewater standards for agriculture		
			WHO (1992)	FAO (2006)	IRNDOE
pH	7.3	8.07	6.5-8	6.5-8	6-8.5
EC (dS.m ⁻¹)	0.77	0.98	0.7	0.7	-
NTU	10	3.48	-	-	50
TSS (mg.l ⁻¹)	16	39.71	-	-	100
TDS	501	632.57	450	450	-
TP (mg.l ⁻¹)	2.22	4.13	4	4	6
Cod (mg.l ⁻¹)	3	18.93	-	-	200
N (mg.l ⁻¹)	0.6	11.45	-	-	-
Ca (mg.l ⁻¹)	60	74.29	-	-	-
Na (mg.l ⁻¹)	73.6	97.26	-	-	-
Mg (mg.l ⁻¹)	16.8	20.57	-	-	100
COD(mg.l ⁻¹)	1	6.51	-	-	100
Pb (μg.l ⁻¹)	0.31	0.15	5	5	1
Cd (μg.l ⁻¹)	0	0.01	0.01	0.01	0.05

تجمعی آب مصرفی، بهره‌وری نیز محاسبه شد. همچنین ارزیابی غلظت سرب و کادمیوم در ساقه، برگ و دانه ذرت با اضافه کردن ۲/۵ میلی‌لیتر اسیدنیتریک به ۰/۱ گرم از اندام‌های خشک شده گیاه و پس از ۲۴ ساعت با استفاده از دستگاه جذب اتمی مدل Varian انجام شد. در انتهای فصل تمامی زه آب‌های خارج‌شده حاصل از آبیاری با استفاده از ظروف پلاستیکی به شیر خروجی که زه آب‌ها را تخلیه می‌کرد متصل و جمع‌آوری شده و سرب و کادمیوم موجود در آن به روش کوره گرافیتی و با دستگاه جذب اتمی مدل Savant اندازه‌گیری شد. در پایان داده‌های حاصل با استفاده از نرم‌افزار SASver9.2 تجزیه و تحلیل و آزمون مقایسه با استفاده از روش SNK^۵ انجام شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی و غلظت فلزات سنگین خاک در جدول ۳ ارائه گردید. بر پایه یافته‌ها، تأثیر نوع منبع آبیاری بر قابلیت هدایت الکتریکی خاک، غلظت عناصر پرمصرف (نیترژن، فسفر و پتاسیم) و فلزات سنگین (کادمیوم و سرب) در خاک تفاوت معنی‌دار داشت ($P \leq 0.01$). همچنین تأثیر نوع روش آبیاری و اثر متقابل نوع منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی، غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک معنی‌دار نبود (جدول ۳).

ویژگی‌های شیمیایی خاک، غلظت عناصر پرمصرف و انباشت فلزات سنگین در خاک

بر پایه نتایج مقایسه میانگین‌ها، منبع آب بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک تأثیر معنی‌داری داشت. به‌طوری‌که بیشترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی خاک با مقدار ۱/۸ دسی‌زیمنس در متر در تیمار استفاده از پساب و کمترین مقدار آن در تیمار استفاده از آب چاه با مقدار ۱/۱ دسی‌زیمنس در متر، مشاهده شد (شکل ۱ الف). همچنین نتایج گویای آن بود که اثر نوع روش آبیاری و اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، میزان اسیدیته خاک در طول آزمایش تقریباً ثابت باقی ماند (شکل ۱ ب). قابلیت هدایت الکتریکی، توانایی خاک برای هدایت جریان الکتریکی را نشان می‌دهد. افزایش بیش از حد قابلیت هدایت الکتریکی خاک باعث آسیب به خاک و محدودیت رشد گیاهان می‌گردد (Fath Al-Ulumi et al., 2015). زارعی و همکاران (Zarei et al., 2014) مدیریت مناسب آبیاری و کنترل شرایط را از

آب چاه با لوله به محل اجرای آزمایش انتقال داده شد و پساب مورد استفاده از تصفیه‌خانه شهر ساری واقع در روستای عالیواک تأمین شد. بر اساس نتایج تجزیه شیمیایی خاک جهت تأمین نیاز غذایی گیاه، کود نیترژن از منبع اوره در دو مرحله به مقدار ۱۸۰ کیلوگرم در هکتار همزمان با کود فسفاتی به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سوپر فسفات تریپل و کود پتاسیم به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع سولفات پتاسیم به‌صورت قبل از کاشت و به مقدار ۷۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت سرک در اختیار گیاه قرار داده شد (Mousavi Nik, 2011).

پس از تهیه گل اشیاع، عصاره اشیاع خاک به‌وسیله‌ی دستگاه پمپ مکش تهیه و میزان شوری در عصاره‌ی اشیاع به‌وسیله‌ی دستگاه هدایت‌سنج واسنجی شده با کلروپتاسیم ۰/۰۱ نرمال مدل JENWAY مدل اندازه‌گیری شد (Page et al., 1987). برای اندازه‌گیری اسیدیته خاک از دستگاه pH متر مدل (mod 821)، استفاده شد. اندازه‌گیری کلسیم و منیزیم با تهیه نمونه نهایی با استفاده از روش تیتراسیون با ورسین EDTA و در حضور معرف اریوکروم بلکتی ۱ (تغییر رنگ ارغوانی به آبی در منیزیم و تغییر رنگ صورتی به ارغوانی در کلسیم) انجام شد (Rezaei et al., 1993). همچنین سدیم و پتاسیم محلول در عصاره گل اشیاع با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر مدل (Sherwood 410) به روش شعله، بعد از قرائت استانداردها مورد سنجش قرار گرفت. میزان فسفر قابل جذب با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتر مدل (T90+UV/VI) در طول موج ۷۲۰ نانومتر قرائت شد (Ehyaei and Behbahanzadeh, 1999). نیترژن کل خاک به روش کربن آلی به دست آمد. به‌طوری‌که نمونه تهیه شده در حضور معرف ارتوفل‌تروپین ۲ با فروآمونیم سولفات ۰/۵ نرمال تیتر شد و در انتهای تیتراسیون رنگ نمونه از سبز کدر به قرمز تغییر یافت. مقدار نیترژن کل خاک با ضرب عدد به‌دست‌آمده (معادل کربن آلی خاک) در مقدار ۰/۱ محاسبه گردید (Yasrebi et al., 2003). عصاره‌گیری سرب و کروم با استفاده از روش دی تی پی ای^۴ لیندسی و نورول (Lindsay and Norvell, 1987) انجام و برای قرائت از دستگاه جذب اتمی Varian استفاده شد. به‌منظور اندازه‌گیری عملکرد و اجزای عملکرد گیاه ذرت، از هر لایسیمتر به‌صورت تصادفی ۳ بوته انتخاب و صفات موردنظر شامل عملکرد دانه، عملکرد زیست‌توده^۴، وزن هزار دانه با توزین نمونه‌ها اندازه‌گیری شدند و تعداد دانه در ردیف نیز شمارش گردید. پس از محاسبه عملکرد محصول ذرت، برای تیمارهای مختلف با توجه به مقدار

4- Biomass

5- Student-Nueman-Kouel

1- Eriochrome Black T

2- Orthophenoltroline

3- Diethylene thiamine pentaacetic acid

همسنگی با نتایج این پژوهش کاملاً همسو بود. نتایج مقایسه میانگین‌ها، نشان داد که غلظت عناصر پرمصرف در خاک در شرایط استفاده از آبیاری با پساب نسبت به منبع آب چاه بیشتر بود. به طوری که بیشترین میزان نیترژن کل با مقدار ۰/۰۸۶ درصد در منبع آبیاری پساب و کمترین آن در منبع آب چاه با مقدار ۰/۰۵۳ درصد مشاهده شد (شکل ۲ الف). همچنین نتایج نشان داد که میزان فسفر و پتاسیم در خاک با استفاده از آبیاری با پساب در مقایسه با آبیاری با آب چاه، افزایش یافت. به طوری که بیشترین میزان فسفر و پتاسیم خاک، در شرایط استفاده از منبع آب پساب به ترتیب با مقادیر ۲۴/۲ و ۲۲۶/۲ میلی‌گرم در کیلوگرم مشاهده شد.

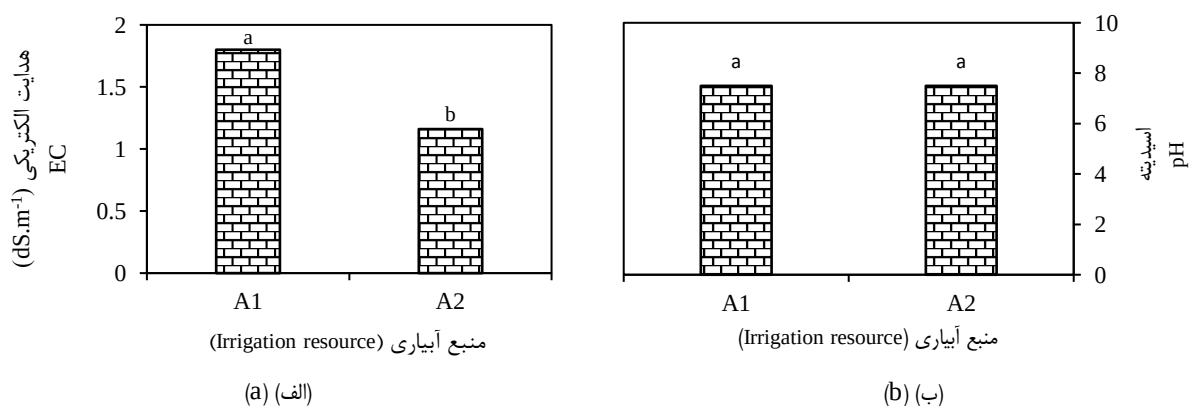
عوامل مهم در جلوگیری از شوری خاک در آبیاری با لجن فاضلاب بر شمرده می‌شوند. میزان قابلیت هدایت الکتریکی فاضلاب‌ها معمولاً به دلیل محتوای املاح و نمک‌های سدیم، پتاسیم و کلسیم بالاست. اما با توجه به تصفیه فاضلاب مورد استفاده، مدیریت آبیاری (مقدار و دور آبیاری) و زراعی (کشت در لایسمتر)، میزان شوری خاک کنترل گردید. البته با توجه به مقدار قابلیت هدایت الکتریکی در این پژوهش محدودیت چندانی در شوری خاک وجود نداشت. سینگ و اگر وال (Singh and Agrawal, 2012) و محمد و مازاریح (Mohammad and Mazahreh, 2003)، افزایش قابلیت هدایت الکتریکی خاک در استفاده از پساب نسبت به آب چاه کشاورزی را گزارش کردند، که در

جدول ۳- نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر ویژگی‌های شیمیایی و غلظت فلزات سنگین خاک
Table 3- Analysis of variance the effect of source and irrigation method on chemical characteristics, heavy metals concentration

منابع تغییر (S.O.V)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean square)						
		ویژگی‌های شیمیایی (Chemical characteristics)			عناصر پرمصرف (Micronutrients)		فلزات سنگین (Heavy metals)	
		pH	EC (ds.m ⁻¹)	N (%)	P (mg.kg ⁻¹)	K (mg.kg ⁻¹)	Pb (mg.kg ⁻¹)	Cd (mg.kg ⁻¹)
منبع آب Water resource	1	0.0008 ^{ns}	1.203 ^{**}	0.0031 ^{**}	329.7 ^{**}	124.33 ^{**}	35.27 ^{**}	0.00005 ^{**}
روش آبیاری Irrigation method	1	0.0071 ^{ns}	0.0033 ^{ns}	0.0030 ^{ns}	0.3008 ^{ns}	39.603 ^{ns}	0.0075 ^{ns}	0.000008 ^{ns}
منبع × روش Resource × method	1	0.0069 ^{ns}	0.0029 ^{ns}	0.0033 ^{ns}	0.0675 ^{ns}	66.27 ^{ns}	0.0008 ^{ns}	0.000007 ^{ns}
خطا Error	8	0.005	0.0158	0.0015	4.822	21.237	21.237	0.0005
ضریب تغییرات C.V	-	0.93	8.4	17.4	11.5	2.1	2.1	10.6

*, **, و ^{ns} به ترتیب سطوح معنی‌داری ۵ درصد، ۱ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند.

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

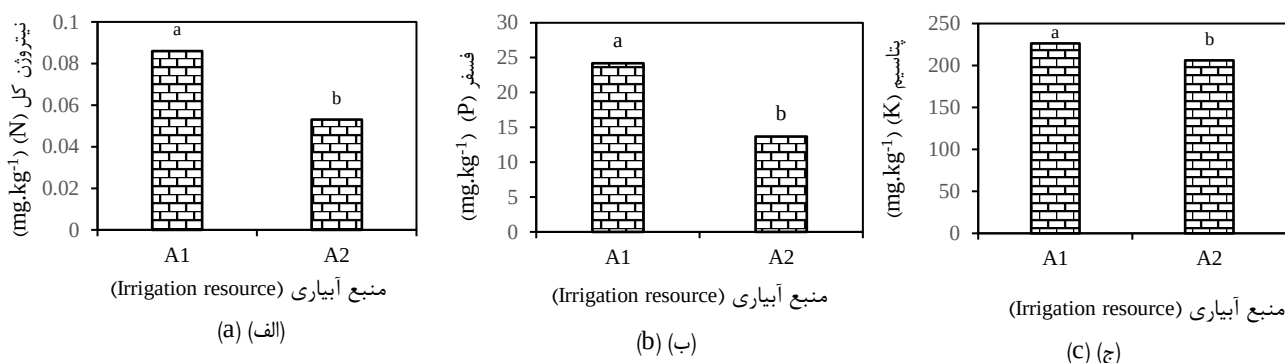


شکل ۱- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آب آبیاری بر میزان قابلیت هدایت الکتریکی (الف) و اسیدیته خاک (ب)
Figure 1- Comparison of the effect of using irrigation water source on electrical conductivity (a) and soil acidity (b)

در شرایط آبیاری با منبع آب چاه، میزان انباشت فلزات سنگین کادمیوم و سرب در خاک در مقایسه با پساب کمتر بود. بیشترین میزان انباشت فلز سرب مربوط به شرایط استفاده از پساب با مقدار ۰/۰۷ میلی گرم در کیلوگرم و کمترین میزان آن در شرایط استفاده از منبع آب چاه با مقدار ۰/۰۵ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد (شکل ۳ الف). همچنین بالاترین میزان انباشت فلز کادمیوم در خاک در آبیاری با پساب با مقدار ۰/۰۱۴ میلی گرم در کیلوگرم مشاهده شد و پایین ترین میزان انباشت آن مربوط به آبیاری با آب چاه با مقدار ۰/۰۱۰ میلی گرم در کیلوگرم بود (شکل ۳ ب).

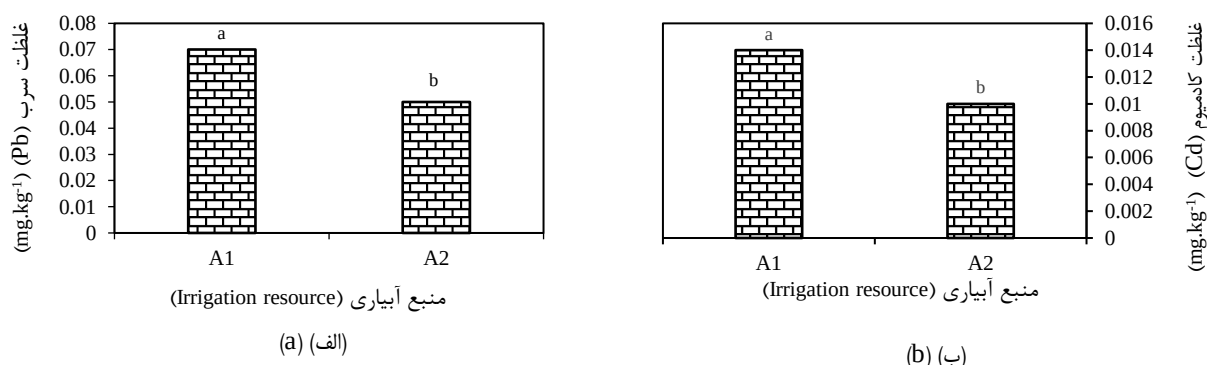
همچنین مشابه با ارزیابی غلظت عناصر پرمصرف در خاک، نتایج بررسی اثر گذاری روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع و روش آبیاری بر انباشت فلزات سنگین، بیانگر عدم وجود تفاوت معنی دار بود. خاولا و همکاران (Khawla et al., 2019)، اظهار داشتند که در پی استفاده از پساب برای کشاورزی، غلظت فلز کادمیوم در خاک افزایش می یابد.

کمترین مقدار این عناصر مربوط به شرایط استفاده از منبع آب چاه به ترتیب با مقادیر ۱۳/۷ و ۲۰۵/۹ میلی گرم در کیلوگرم بود (شکل ۲ ب و شکل ۲ ج). بر پایه یافته ها، تأثیر نوع روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر غلظت عناصر پرمصرف در خاک، تفاوت معنی داری نداشت. آبیاری با فاضلاب با فراهم ساختن عناصر غذایی و ریزمغذی های ضروری، سطح باروری خاک را بهبود می بخشد و همچنین پتانسیل معدنی شدن نیتروژن با استفاده از آبیاری با پساب به واسطه افزایش مقدار نیتروژن کل، نیز افزایش می یابد (Singh and Agrawal, 2012). زارعی و همکاران (Zarei et al., 2014) اظهار داشتند که نیتروژن موجود در فاضلاب منبع و دلیل افزایش نیتروژن کل در خاک می باشد. نتایج مطالعات پانوراس و همکاران (Panoras et al., 2003) و نازاریو و همکاران (Nazario et al., 2019) نیز تأثیر استفاده از پساب بر افزایش غلظت عناصر پرمصرف به ویژه نیتروژن کل در خاک را نشان می دهند. نتایج مقایسه میانگین ها نشان داد که انباشت فلزات سنگین در خاک تحت تأثیر استفاده از نوع منبع آب آبیاری می باشد. به طوری که



شکل ۲- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آب آبیاری بر غلظت عناصر پرمصرف (نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم) خاک

Figure 2- Comparison of the effect of using irrigation water source on the concentration of high consumption elements (total nitrogen (a), phosphorus (b) and potassium (c)) in soil



شکل ۳- مقایسه تأثیر استفاده از منبع آب آبیاری بر انباشت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در خاک

Figure 3- Comparison of the effect of using irrigation water source on the accumulation of heavy metals lead and cadmium in soil

به‌طوری‌که بیشترین مقدار عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده در آبیاری با منبع پساب به ترتیب با مقادیر ۹۱۸/۶۶ کیلوگرم در هکتار و ۱/۴۵ کیلوگرم در مترمکعب و کمترین میزان آن‌ها در آبیاری با منبع چاه به ترتیب با مقادیر ۵۱۶/۱۷ کیلوگرم در هکتار و ۱/۲۰ کیلوگرم در مترمکعب مشاهده شد (جدول ۵). همچنین نتایج حاکی از آن بود که میزان عملکرد دانه در روش آبیاری زیرسطحی تفاوت قابل‌توجهی را نسبت به روش قطره‌ای نوار تیپ نشان داد. افزایش ۶۷ درصدی عملکرد دانه و ۲۸ درصدی بهره‌وری زیست‌توده در روش آبیاری زیرسطحی در مقایسه با روش قطره‌ای نوار تیپ، مؤید برتری و سودمندی روش زیرسطحی بر میزان عملکرد دانه بود (جدول ۵). پساب باعث بهبود خصوصیات فیزیکی خاک شده و شرایط مطلوبی را به‌واسطه افزایش مواد آلی و اصلاح خاک برای رشد گیاه فراهم می‌سازد که درنهایت باعث افزایش تولید زیست‌توده آن می‌شود (Hassanpour Darvishi et al., 2010). فتح‌العلومی و همکاران (Fath Al-Ulumi et al., 2015) بیان کردند که پساب با افزایش پایداری خاکدانه‌ها باعث بهبود شرایط فیزیکی خاک و درنتیجه افزایش باروری خاک می‌شود. استفاده از پساب با توجه به اینکه حاوی عناصر -ر غ- لذایی نیت- روثن، فس- فر، پتاس- یم و ریزمغذی‌ها می‌باشد، بهبود رشد گیاه ذرت را در پی داشت. تولید فرآورده‌های فتو سنتزی و افزایش میزان بهره‌وری سیستم فتو سنتزی گیاه، در گرو رشد مطلوب اندام‌های گیاهی است.

شایان‌ذکر است که بر اساس نتایج برخی از محققین، انباشت فلزات سنگین ازجمله کادمیوم و سرب به دلیل کم‌تحرک بودن، به‌مرور زمان در خاک صورت می‌پذیرد (Chen et al., 2013; Gatta et al., 2015). بر اساس گزارش خان و همکاران (Khan et al., 2008)، آبیاری با فاضلاب شهری به مدت ۵۰ سال، منجر به افزایش شاخص انباشت آلودگی روی، مس، کادمیوم، سرب و نیکل در خاک شد. همچنین نتایج برخی تحقیقات ازجمله مجیری و همکاران (Mojiri et al., 2011) و ریچادوری و همکاران (et Raychaudri al., 2014) نشان داد که استفاده از پساب تأثیر چندانی قابل‌توجهی بر میزان انباشت کادمیوم و سرب در خاک نداشت و تغییر غلظت این فلزات در طول آزمایش تقریباً ثابت باقی ماند.

عملکرد دانه و غلظت فلزات سنگین در گیاه و زه‌آب

نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده ذرت، غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در اندام‌های گیاهی و زه‌آب حاصل از آبیاری در طول فصل رشد ۱۳۹۸-۹۹، در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده ذرت بسیار معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). این در حالی بود که اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر دو صفت مذکور، معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که، استفاده از پساب نسبت به آب چاه، میزان عملکرد دانه و بهره‌وری زیست‌توده را افزایش داد.

جدول ۴- نتایج تجزیه واریانس تأثیر منبع و روش آبیاری بر عملکرد، غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در گیاه ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) و زه‌آب حاصل از آبیاری
Table 4- Results of analysis of variance Effect of source and method of irrigation on yield, concentration of heavy metals adsorbed in corn (single cross 704) and drainage from irrigation

منابع تغییر (S.O.V)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean of square)									
		عملکرد دانه Yield		غلظت فلزات سنگین گیاه Plant HV							
		GY (kg.ha ⁻¹)	BP (kg.m ⁻³)	Pb _G (mg/g)	Pb _L (mg/g)	Pb _S (mg/g)	Cd _G (mg/g)	Cd _L (mg/g)	Cd _S (mg/g)	Pb _{ad} (μg/l)	Cd _{ad} (μg/l)
منبع آب Water resource	1	60.39**	117.77**	33.24**	66.03**	32.64**	125.58**	23.78**	24.30**	0.85 ^{ns}	1.22 ^{ns}
روش آبیاری Irrigation method	1	48.35**	212.24**	0.33 ^{ns}	0.02 ^{ns}	0.01 ^{ns}	1.06 ^{ns}	7.50 ^{ns}	0.55 ^{ns}	1.41 ^{ns}	1.10 ^{ns}
منبع × روش Resource × method	1	0.54 ^{ns}	1.84 ^{ns}	0.27 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.01 ^{ns}	4.69 ^{ns}	5.44 ^{ns}	0.18 ^{ns}	3.16 ^{ns}	1.10 ^{ns}
خطا Error	8	405.23	0.0015	62.31	21.01	35.14	0.1128	0.106	0.823	12.51	0.03
ضریب تغییرات C.V	-	12.46	2.92	15.9	39.0	15.0	27.0	16.5	15.8	15.1	17.3

GY: Grain Yield (عملکرد دانه)، BP: Biomass productivity (بهره‌وری زیست‌توده)، Pb_G: غلظت سرب دانه، Pb_L: غلظت سرب برگ، Pb_S: غلظت سرب ساقه، Cd: غلظت کادمیوم، Cd_G: غلظت کادمیوم دانه، Cd_L: غلظت کادمیوم برگ، Cd_S: غلظت کادمیوم ساقه، Pb_{ad}: غلظت سرب زه‌آب و Cd_{ad}: غلظت کادمیوم زه‌آب. ns و ** به ترتیب سطوح معنی‌داری ۵ درصد و ۱ درصد و عدم معنی‌داری را نشان می‌دهند. *, ** and ns: significant at $p \leq 0.01$, $p \leq 0.05$ and non-significant, respectively.

همان‌طور که در جدول ۴ نیز مشاهده می‌شود، اثر منبع آب آبیاری بر غلظت فلزات سنگین جذب‌شده در اندام‌های گیاهی (دانه، برگ و ساقه) ذرت، معنی‌دار بود ($P \leq 0.01$). اما اثر روش آبیاری و همچنین اثر متقابل منبع آب و روش آبیاری بر آن، تفاوت‌چندان قابل‌توجهی نداشت. همچنین نتایج حاکی از آن بود که تأثیر منبع آب، روش آبیاری و اثر متقابل آن‌ها، بر غلظت فلزات سنگین زه‌آب حاصل از آبیاری، معنی‌دار نبود. نتایج مقایسه میانگین‌ها، نشان داد که استفاده از منبع آب پساب در مقایسه با آب چاه، باعث جذب میزان بیش‌تری از فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه گیاه ذرت شد. به‌طوری‌که در اثر استفاده از منبع آب پساب، میزان جذب فلز سرب در میان بخش‌های مختلف گیاه ذرت، به ترتیب با مقادیر ۲۷/۲، ۲۲/۵ و ۲۰/۵ میلی‌گرم بر گرم مربوط به بخش دانه، برگ و ساقه بود.

فراهمی عناصر غذایی مورد نیاز گیاه به‌ویژه نیتروژن در خاک، با افزایش رشد اندام هوایی باعث گسترده‌گی سطح برگ و در نهایت سایه‌بان گیاه می‌شود. افزایش میزان دریافت تابش‌های خورشیدی با سطح برگ گیاه، ارتباط تنگاتنگی دارد. به‌طوری‌که با افزایش یا کاهش سطح برگ گیاه، میزان دریافت نور و در نهایت فعالیت فتوسنتزی و انتقال فرآورده‌های فتوسنتزی افزایش و یا کاهش می‌یابد (Kouchaki et al., 2010). زارعی و هم‌کاران (Zarei et al., 2014) نشان دادند که پساب عمده‌تاً به دلیل دارا بودن عناصر غذایی ضروری موجب افزایش تعداد برگ می‌گردد. افزایش تعداد برگ باعث افزایش میزان فتوسنتز در گیاه و در نتیجه افزایش عملکرد می‌شود. بهره‌برداری از عناصر غذایی موجود در پساب در طول دوره‌ی رشد، در مراحل مختلف از رشد گیاه به‌ویژه در مرحله رشد زایشی که حساسیت بالایی نسبت به کمبود آن‌ها وجود دارد، افزایش عملکرد را به همراه دارد (Yazdani et al., 2017). بدیعی و هم‌کاران (Badiie et al., 2016) اظهار داشتند که وجود عناصر غذایی کافی در مرحله رشد زایشی گیاه، نقش مهمی را در رشد دانه‌ها بازی می‌کند. بنابراین می‌توان این‌گونه بیان نمود که عناصر مغذی موجود در پساب باعث افزایش عملکرد دانه با استفاده از منبع آب پساب شده است. به دلیل اینکه پساب حاوی عناصر غذایی و ریزمغذی‌هایی از جمله، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم، روی و آهن بود نسبت به منبع آب چاه، افزایش عملکرد دانه ذرت را به دنبال داشت (Mousavi and Shahsavari, 2014). نتایج دهقانی سانج و هم‌کاران (Dehghani Sanij et al., 2014) نشان داد که روش

میانگین مربعات (Mean of square)

تیمار Treatment	سطح Level	میانگین مربعات (Mean of square)									
		عملکرد Yield		فلزات سنگین گیاه Plant HV						فلزات سنگین زه‌آب Water drainage HV	
		GY (kg.ha ⁻¹)	BP (kg.m ⁻³)	Pb _G (mg/g)	Pb _L (mg/g)	Pb _S (mg/g)	Cd _G (mg/g)	Cd _L (mg/g)	Cd _S (mg/g)	Pb _{wd} (µg/l)	Cd _{wd} (µg/l)
منبع آب Water resource	پساب Wastewater	918.66 ^a	1.45 ^a	27.2 ^a	22.52 ^a	20.5 ^a	2.32 ^a	1.35 ^a	2.01 ^a	1.19 ^a	0.11 ^a
	چاه Well water	516.17 ^b	1.20 ^b	0.97 ^b	0.99 ^b	0.98 ^b	0.15 ^b	0.43 ^b	0.33 ^b	1.30 ^a	0.12 ^a
روش آبیاری Irrigation method	زیرسطحی Subsurface	897.33 ^a	1.49 ^a	15.4 ^a	11.9 ^a	10.9 ^a	1.14 ^a	0.65 ^a	1.43 ^a	1.46 ^a	0.11 ^a
	قطره‌ای نوار تیپ Drip	538.22 ^b	1.16 ^b	12.7 ^a	11.5 ^a	10.5 ^a	1.34 ^a	0.63 ^a	1.82 ^a	1.03 ^a	0.11 ^a

Cd Grain Yield (GY): عملکرد دانه، Biomass productivity (BP): بهره‌وری زیست‌توده، Pb Grain (Pb_G): غلظت سرب دانه، Pb leaf (Pb_L): غلظت سرب برگ، Pb Stem (Pb_S): غلظت سرب ساقه، Cd Water drainage (Cd_{wd}): غلظت کادمیوم زهاب و Cd Leaf (Cd_L): غلظت کادمیوم دانه، Cd Stem (Cd_S): غلظت کادمیوم برگ، Grain (Cd_G): غلظت کادمیوم دانه، Pb Water drainage (Pb_{wd}): غلظت سرب زهاب و Cd Water drainage (Cd_{wd}): غلظت کادمیوم زهاب.

میانگین‌ها با حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهنده عدم تفاوت معنی‌دار می‌باشند.

Means that carry the same letter on each column have no significant difference.

نتیجه‌گیری

بررسی تأثیر فاضلاب تصفیه شده بر غلظت عناصر پرمصرف و فلزات سنگین خاک و برخی ویژگی‌های ذرت سینگل کراس ۷۰۴، حاکی از آن بود که آبیاری با پساب به دلیل غنی بودن از عناصر غذایی و ریزمغذی‌ها، باعث بهبود حاصلخیزی خاک شده و شرایط مطلوبی را به واسطه افزایش مواد آلی و املاح خاک برای رشد گیاه فراهم می‌سازد. به‌طوری‌که بیشترین میزان عناصر پرمصرف نیتروژن، فسفر و پتاسیم خاک در شرایط استفاده از پساب مشاهده شد. همچنین بالاترین میزان قابلیت هدایت الکتریکی و انباشت فلزات سنگین سرب و کادمیوم خاک، مربوط به منبع پساب در مقایسه با آب چاه بود. اما به دلیل اینکه از مقادیر حد آستانه استانداردهای سازمان بهداشت جهانی، خواروبار کشاورزی و محیط‌زیست ایران کمتر بود، استفاده از پساب در آبیاری گیاه ذرت محدودیت خاصی در خاک ایجاد نکرد. بر پایه یافته‌ها، استفاده از پساب شرایط مطلوب برای تولید فرآورده‌های فتوسنتزی را به همراه داشت و باعث افزایش عملکرد و بهره‌وری زیست‌توده گیاه ذرت سینگل کراس ۷۰۴ گردید. بر پایه نتایج، غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه در اثر استفاده از پساب در مقایسه با آب چاه، تفاوت بسیار معنی‌داری داشت؛ که در این میان بیشترین میزان جذب فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش دانه ذرت مشاهده شد؛ به‌طور کلی، می‌توان اینگونه اظهار داشت که استفاده بهینه از پساب می‌تواند برخی از ویژگی‌های فیزیکی و حاصلخیزی خاک را افزایش دهد و در نتیجه با افزایش توان جذب عناصر مغذی توسط گیاه از خاک، عملکرد گیاه نیز افزایش یابد. ذکر این نکته ضروری است که این آزمایش باید برای چندین سال متوالی انجام گیرد تا بتوان اثرات باقیمانده فلزات سنگین در خاک ناشی از آبیاری سال‌های قبل را مورد بررسی قرار داد.

این در حالی بود که میزان جذب فلز کادمیوم در بخش‌های دانه، برگ و ساقه به ترتیب ۲/۳۲، ۱/۳۵ و ۲/۰۱ میلی‌گرم بر گرم مشاهده شد. همچنین نتایج مقایسه میانگین‌ها نشان داد که میزان فلزات سنگین زه‌آب حاصل از آبیاری، در اثر استفاده از منبع آب (پساب و چاه) و نوع روش آبیاری (زیرسطحی و قطره‌ای نوار تیپ) اختلاف چندانی نداشتند.

کیفیت محصول به راحتی تحت تأثیر فلزات سنگین موجود در خاک از جمله؛ سرب، کروم و کادمیوم قرار می‌گیرد (Sadeghi et al., 2020). یون‌های فلزی سمی همراه با مواد مغذی از محلول خاک وارد بافت‌های گیاهی می‌شوند (Dal Corso et al., 2013). شایع‌ترین پیامد فیزیولوژیکی مواجهه با فلزات سنگین در گیاهان، کاهش رشد است. ساختار و فیزیولوژی برگ همراه با کاهش فتوسنتز و تنفس تغییر می‌کند. در نتیجه این تغییرات متابولیسم تحت تأثیر قرار می‌گیرد و تولید انرژی کاهش می‌یابد (Hu et al., 2013). تعرق و انتقال مواد بین اندام‌های مختلف نیز تحت تأثیر قرار می‌گیرد. توانایی ریشه برای جذب مواد مغذی و آب نیز کاهش می‌یابد. به دلیل جذب فلزات سنگین، عملکرد محصولات کشاورزی کاهش می‌یابد و با ورود آنها به زنجیره غذایی اثرات خطرناک سلامتی مشاهده می‌شود. در میان فلزات سنگین مختلف، کادمیوم برای گیاهان بسیار سمی است و مانع فتوسنتز و کاهش رشد ریشه و اندام هوایی می‌شود (Shahid et al., 2015). زیاد بودن غلظت سرب و کادمیوم در دانه سلامت انسان را تهدید می‌نماید. همچنین غلظت سرب و کادمیوم در برگ و ساقه ذرت با به خطر انداختن سلامت دام و طیور، به‌طور غیرمستقیم نیز سلامت انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اما نتایج این پژوهش نشان داد که با توجه به اینکه مقادیر معمول فلز سرب در گیاهان بین ۵-۲ میلی‌گرم در کیلوگرم (Chaney, 1989) و همچنین فلز کادمیوم که عنصر ضروری برای رشد گیاهان نبوده و غلظت‌های مجاز آن ۳-۰/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم (Baker and Brooks, 1989) در گیاهان می‌باشد، میزان غلظت فلزات سنگین سرب و کادمیوم در بخش‌های دانه، ساقه و برگ ذرت سینگل کراس ۷۰۴، مشکلی را برای مصرف‌کنندگان بوجود نخواهد آورد. همچنین غلظت سرب و کادمیوم در زه‌آب حاصل از آبیاری در مقایسه با حد آستانه مجاز استانداردهای WHO^۲ و FAO^۱، بسیار کمتر بود و بدین ترتیب خطر انتقال سرب و کادمیوم به منابع آب زیرزمینی را به مقدار بسیار قابل توجهی کاهش می‌دهد.

منابع

1. Abegunrin, T.P., Awe, G.O., Idowu, D.O., & Adejumo, M.A. (2016). Impact of wastewater irrigation on soil Physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. *Catena* 139: 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.12.014>.
2. Ali Ehyaei, M., & Behbahanizadeh, A. (1999). *Description of soil chemical decomposition methods*. Soil and Water Research Institute. 893: 128p. (In Persian)
3. Asgari, K., Najafi, P., & Solymani, A. (2007). Effect of treated wastewater on growth parameters of sunflower in the irrigation treatment condition. *Crop Research* 33: 82-87. (In Persian)
4. Assouline, S., & Narkis, K. (2011). Effects of long-term irrigation with treated wastewater on the hydraulic properties of a clayey soil. *Water Resources Research* 47: 1-12. <https://doi.org/10.1029/2011WR010498>.
5. Badiei, A., Karandish, F., & Tabatabai, S. (2016). The effect of irrigation with raw and treated municipal wastewater on wheat yield and microbial properties of soil and plants. *Journal of Water and Soil Science* 4(2): 215-228. (In Persian)
6. Baker, A.J., & Brooks, R. (1989). Terrestrial higher plants which hyper accumulate metallic elements. A review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 2: 81-126.
7. Chaney, R.L. (1989). Toxic element accumulation in soils and crops: protecting soil fertility and agricultural food chains. *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone* 140-158. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74451-8_10.
8. Chen, W., Lu, S., Pen, C., Jiao, W., & Wang, M. (2013). Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation. *Environmental Pollution* 178: 294-299. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.036>.
9. Dal Corso, G., Fasani, E., & Furini, A. (2013). Recent advances in the analysis of metal hyper accumulation and hyper tolerance in plants using proteomics. *Frontiers in Plant Science* 4: 1-7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00280>.
10. Dehghani Sanij, H., Khazaei, A., & Zakerei Nia, M. (2014). The role of accurate irrigation in water consumption and water use efficiency. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1: 180-186. (In Persian with English abstract)
11. Fath Al-Ulumi, S., Asghari, S.h., & Goli Kalanpal, E. (2015). The effect of municipal sewage sludge on the concentration of high consumption elements in soil and plants and some agronomic traits of wheat. *Journal of Soil Management and Sustainable Production* 2: 49-70. (In Persian with English abstract)
12. Gatta, G., Libutti, A., Gagliardi, A., Beneduce, L., Brusetti, L., Borruso, L., Disciglio, G., & Tatantino, E. (2015). Treated agro-industrial wastewater irrigation of tomato crop: Effects on qualitative/quantitative characteristics of production and microbiological properties of the soil. *Agricultural Water Management* 149: 33-43. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2014.10.016>.
13. Hassanpour Darvishi, H., Manshouri, M., & Aliabadi Farahani, H. (2010). The effect of irrigation by domestic waste water on soil properties. *Journal of Soil Sciences and Environmental Management* 1: 30-33. <https://doi.org/10.5897/JSSEM.9000071>.
14. Hoseinpoor, A., Haghnia, G.H., Alizadeh, A., & Fotovat, A. (2008). Effect of irrigation with raw and treated wastewaters on some chemical characteristic of soil in different depth under continuously and intermittent flood conditions. *Iran Journal of Irrigation and Drainage* 2: 73-85. (In Persian with English abstract)
15. Hu, Y.F., Zhou, G., Na, X.F., Yang, L., Nan, W.B., Liu, X., Zhang, Y.Q., Li, J.L., & Bi, Y.R. (2013). Cadmium interferes with maintenance of auxin homeostasis in Arabidopsis seedlings. *Journal of Plant Physiology* 170: 965-975. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.02.008>.
16. Judicial, R. (2016). Evaluation of the effect of irrigation with urban wastewater on the accumulation of some chemical elements in the plant and ecological characteristics of Eucalyptus (*Eucalyptus camadulensis* Dehnh.). *Journal of Plant Ecology* 8: 13-29.
17. Kaboosi, K. (2015). *Evaluation of the effect of irrigation with treated wastewater on soil characteristics (Case study: Bandargaz)*. The 1th national conference on drainage in sustainable agriculture, Iranian Irrigation and Drainage Association, 8 March, Tehran, Iran.
18. Kaboosi, K. (2017). The assessment of treated wastewater quality and the effects of mid-term irrigation on soil physical and chemical properties (case study: Bandargaz-treated wastewater). *Applied Water Science* 5: 2385-2396. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0420-5>.
19. Keshavarz, A., Ashrafi, S., Hydari, N., Pouran, M., & Farzaneh, E. (2005). *Water allocation and pricing in agriculture of Iran*. In Water Conservation, Reuse, and Recycling, Proceedings of an Iranian-American Workshop, National Research Council, The National Academic Press: pp. 153-172.
20. Khan, S., Cao, Q., Zheng, Y.M., Hung, Y.Z., & Zhu, Y.G. (2008). Health risk of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China. *Environmental Pollution* 152(3): 686-692. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.056>.
21. Khawla, K., Besma, K., Enrique, M., & Mohamed, H. (2019). Accumulation of trace elements by corn (*Zea mays*) under irrigation with treated wastewater using different irrigation methods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*

- 170: 530-537. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2018.12.025>.
22. Kouchaki, A., Nasiri Mahallati, M., Khorram Del, S., Anvarkhah, S., Sabet Teymouri, M., & Sanjani, S. (2010). Evaluation of growth indices of hemp (*Cannabis sativa* L.) and sesame (*Sesamum indicum* L.) in intercropping with replacement and additive series. *Journal of Agroecology* 1: 27-36. (In Persian with English abstract)
23. Lam, C.W., Tanabe, S., Chan, S.K., Yuen, E.K., Lam, M.H., & Lam, P.K. (2004). Trace element residues in tissues of green turtles (*Chelonia mydas*) from South China Waters. *Marine Pollution Bulletin* 48: 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.09.003>.
24. Li, X., Kang, Y., Wan, S., Chen, X., & Chu, L. (2015). Reclamation of very heavy coastal saline soil using drip-irrigation with saline water on salt-sensitive plants. *Soil and Tillage Research* 146: 159-73. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.005>.
25. Lindsay, W.L., & Norvell, W. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal* 42: 421-428. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200030009x>.
26. Mahfooz, Y., Yasar, A., Guijan, L., Islam, Q.U., Akhtar, A.B., Rasheed, R., Irshad, S., & Naeem, U. (2020). Critical risk analysis of metals toxicity in wastewater irrigated soil and crops: a study of a semi-arid developing region. *Scientific Reports* 10: 1-10. <https://doi.org/10.1038/S41598-020-69815-0>.
27. Mohammad, M.J., & Mazahreh, N. (2003). Changes in soil fertility parameters in response to irrigation of forage crops with secondary treated waste water. *Communication in Soil Sciences and Plant Analysis* 34(9-10): 1281-1294. <https://doi.org/10.1081/CSS-120020444>.
28. Mojiri, A., & Aziz, H.A. (2011). Effects of municipal wastewater on accumulation of heavy metals in soil and wheat (*Triticum aestivum* L.) with two irrigation methods. *Roman Agriculture Researches* 28: 217-222.
29. Mousavi Nik, M. (2011). Study of the effects of planting density on grain yield and yield components and some morphological traits of grain maize cultivars. *Scientific Journal of Crop Ecophysiology (Agricultural Sciences)* 17: 89-98. (In Persian with English abstract)
30. Mousavi, S.R., & Shahsavari, M. (2014). Effects of treated municipal wastewater on growth and yield of maize (*Zea mays*). *Biological Forum* 6(2): 228-233. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.624>.
31. Nazario, A.A., Zution, I., Agnellos Barbosa, E., Nazario, L., Rodrigues, D., & Matsura, E.E. (2019). Impact of the application of domestic wastewater by subsurface drip irrigation on the soil solution in sugarcane cultivation. *Applied and Environmental Soil Science* 1: 1-11. <https://doi.org/10.1155/2019/8764162>.
32. Oron, G., Campos, C., Gillerman, L., & Salgot, M. (1999). Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities. *Agricultural Water Management* 38: 223-234. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00066-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00066-3).
33. Page, M.C., Sparks, D.L., Noll, M.R., & Hendricks, G.J. (1987). Kinetics and mechanisms of potassium release from sandy Middle Atlantic Coastal Plain soils. *Soil Science Society of American Journal* 51: 1460-1465. <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100060011x>.
34. Panoras, A., Evgenidis, G., Bladenopoulous, S., Melidis, V., Doitsinis, A., Samaras, I., Zdragkas, A., & Matsi, T.h. (2003). Corn Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater. *GlobalNEST International Journal* 5(1): 39-45.
35. Qazavie, R., & Earst, M. (2016). Evaluation of the effect of irrigation with municipal effluent on the accumulation of some chemical elements in the plant and ecological characteristics of the eucalyptus plant (*Eucalyptus camadulensis* Dehnh). *Journal of Plant Ecology* 8: 13-29. (In Persian)
36. Raychaudri, S., Raychaudri, M., Rautaray, S.K., & Kumar, A. (2014). *Impact of urban wastewater on soil and crop*. Edition: DWM Bulletin No. 64. Publisher: Directorate of Water Management, Bhubaneswar, Orissa. 32pp.
37. Rezaei, H., Behran, S.H., & Mosharef, S.H. (1993). *Instructions for soil science tests in saline and alkaline soils and their modification*. Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology. (In Persian)
38. Sadeghi, M., Noroozim, M., Kargar, F., & Mehrbakhsh, Z. (2020). Heavy Metal Concentration of Wheat Cultured in Golestan Province, Iran and Its Health Risk Assessment. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development* 5(2): 993-1000. <https://doi.org/10.18502/jehsd.v5i2.3386>.
39. Salehi, A., Tabari, M., Mohammadi, J., & Aliarb, A. (2008). Effect of Irrigation with Municipal Effluent on Soil and Growth of *Pinus Eldarica* Medw. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research* 16: 186-196. (In Persian with English abstract)
40. Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G.h., Shahid, N., Nadeem, M., Sabir, M., Aslam, M., & Dumat, C. (2015). *Heavy Metal Stress and Crop Productivity*. Crop Production and Global Environmental Issues. Edition: 1, Publisher: Springer, 1-25pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4_1.
41. Singh, A., & Agrawal, M. (2012). Effects of Waste Water Irrigation on Physical and Biochemical Characteristics of Soil and Metal Partitioning in *Beta vulgaris* L. *Agriculture Researches* 4: 379-391. <https://doi.org/10.1007/s40003-012-0044-4>.
42. Singh, P.K., Deshbhratar, P.B., & Ramteke, D.S. (2012). Effects of sewage wastewater irrigation on soil properties, crop yield and environment. *Agricultural Water Management* 103: 100-104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.10.022>.
43. Tabtabaei, S.H., Nourmahnad, N., Golestani Kermani, S., Tabtabaei, S.A., Najafi, P., & Heidarpour, M. (2020).

- Urban wastewater reuse in agriculture for irrigation in arid and semi-arid regions - A review. *International. Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture* 9: 193-220. <https://doi.org/10.30486/IJROWA.2020.671672>.
44. Thorburn, P.J., Cook, F.J., & Bristow, K.L. (2002). *New water-saving production technologies: advances in trickle irrigation Proceedings*. Water for Sustainable Agriculture in Developing Regions-More Crop from Every Scarce Drop 53-62.
 45. Tripathi, V.K., Rajput, T.B., & Patel, N. (2016). Biometric properties and selected chemical concentration of cauliflower influenced by wastewater applied through surface and subsurface drip irrigation system. *Journal of Cleaner Production* 139: 396-406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.054>.
 46. Wang, J.F., Wang, G.X., & Wanyan, H. (2007). Treated wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: Wastewater recycling in the loess area of China. *Journal of Environmental Science* 19: 1093-1099. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60178-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60178-8).
 47. WHO. (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture*. Technical report series no. 778. World Health Organization, Geneva.
 48. Yasrebi, J., Karimian, N.J., Maftoon, M., Abtahi, A., Ronaghi, A., & Asad, M.T. (2002). Distribution of nitrogen forms in cultivated calcareous soils of Fars province and their relationship with soil characteristics. *Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources* 7(4): 39-51.
 49. Yazdani, A., Saffari, M., & Ranjbar, G.H. (2017). Effect of treatment with treated municipal wastewater on grain yield and accumulation of heavy metals in grain of barley genotypes (*Hordeum vulgare* L.). *Iranian Journal of Crop Sciences* 4: 284-296. (In Persian with English abstract)
 50. Zarei, M., Charm, M., & Moallemei, N. (2014). Effect of treated municipal wastewater sludge on chemical properties and essential nutrients of soil and physiological characteristics of olive seedlings. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)* 2: 1-15. (In Persian)



Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model

S. Pourentezari¹, K. Esmaili^{2*}, A. Faridhosseini³, E. Ghafari⁴

Received: 29-01-2022

Revised: 06-07-2022

Accepted: 08-08-2022

Available Online: 21-11-2022

How to cite this article:

Pourentezari, S., Esmaili, K., Faridhosseini, A., & Ghafari, E. (2022). Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model. *Journal of Water and Soil* 36(4): 525-539. (In Persian with English abstract)

DOI: [10.22067/JSW.2022.74417.1129](https://doi.org/10.22067/JSW.2022.74417.1129)

Introduction

Precipitation is one of the most important input parameters of the hydrological models for rainfall-runoff simulation, which due to the lack of proper dispersion of rain gauge stations and the newly established some of these stations in most basins of the country, the use of these precipitation data faces serious challenges. Therefore, the use of remote-sensing methods is one of the ways that can be used for the streamflow simulation using hydrological models. Runoff is also one of the most important hydrological variables and rainfall-runoff modeling is one of the key items in hydrological sciences to estimate runoff characteristics such as volume, peak flow and arrival time to peak flow. In the present study, we used reanalyzed precipitation data and then evaluated the simulated streamflow using this precipitation data in the Zoshk subbasin. The precipitation data was validated with in situ data, of Kashafrud basin.

Materials and Methods

The reanalysis precipitation data was selected from the ERA5 precipitation data, and the HEC-HMS was used for the rainfall-runoff simulation. The basin parameters were calculated by the GIS menu. This menu is the newest option in the HEC-HMS software that needs only the DEM basin for calculating the basin parameters. In the present study, we should validate the ERA5 reanalysis precipitation data with in situ data, so we did that in the Kashafrud basin. The number of the rain gauge stations were 34, but some of the stations didn't have complete data and omitted them from the list of the rain gauge stations. For the validation ERA5 reanalysis precipitation data was used from the R, NSE, RMSE, Bias, FAR, POD and TS statistical indicators. These indicators were calculated by programming in EXCEL Visual Basic. The ERA5 precipitation data was evaluated for the Kashafrud basin at daily and monthly time steps. The DEM Zoshk was downloaded with the spatial resolution of 12.5 meters from ALOS-PALSAR satellite and then the basin parameters were calculated by the GIS menu. The SCS curve number was selected as a loss method. In this method, the calculations related to the percentage of impermeability and the average curve number of each sub-basin were obtained through land use and curve number layers, respectively. The SCS unit hydrograph was selected as a transform method. The recession method was selected as a base flow method. NSE and PBias were used for the calibration and validation events in HEC-HMS. In this way, at first the HEC-HMS model was calibrated by two in situ rainfall-runoff events (91/1/11 and 91/2/6), and then validated by one in situ rainfall-runoff event (99/1/23). For validation streamflow of the ERA5 reanalysis precipitation data, the event on 99/1/23 was used and their streamflow hydrographs were evaluated with each other in Zoshk station.

Results and Discussion

The results showed that the reanalysis precipitation data of ERA5 had underestimation in daily and monthly time steps. Also in monthly time step, the accuracy of these precipitation dataset in detecting precipitation events (in terms of FAR, TS, and POD indices) was higher than a daily one. In addition, in monthly time steps it had

1, 2, 3 and 4- M.Sc. Student, Associate Professors and Ph.D. Graduate of Water Science and Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, respectively.

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

worse accuracy in summer months than the rest of the year in detecting precipitation events (in terms of FAR, TS, and POD indices). For streamflow evaluation, in the calibration phase both NSE was in very good and good ranges, and PBias was in very good, good and acceptable ranges. In addition, the model underestimated the observational one. Finally the ERA5 reanalysis precipitation data was compared by 99/1/23 hydrograph event. The streamflow hydrograph from the ERA5 reanalysis precipitation data was underestimated due to ERA5 underestimation of the precipitation at the Zoshk rain gauge on the days corresponding to the 23/6/99 incident. The ERA5 reanalyzed precipitation data with NSE and Bias percentage coefficients in unacceptable range ($NSE \leq 0.5$ and $PBias \leq \pm 25$), compared to flow hydrograph obtained from Zoshk station precipitation data, the efficiency of this precipitation dataset is low. The range of the streamflow hydrograph from the ERA5 precipitation data was unsatisfactory in compared to the observational hydrograph ($NSE = -0.47$ and $PBias = -55.16$).

Conclusion

In general, the accuracy of the flow hydrograph of this product compared to the flow hydrograph of the precipitation data of Zoshk station ($NSE = 0.64$ and $PBias = -15.82$), cannot be a relatively reliable source instead of in situ rainfall data in hydrological simulation. The suggestion for future studies is to evaluate other rainfall data based on remote sensing methods in hydrological modeling.

Keywords: ERA5, GIS Menu, HEC-HMS, Streamflow hydrograph estimation, Zoshk river

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۱، ص. ۵۲۵-۵۳۹

ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS

سعیده پورانتظاری^۱ - کاظم اسماعیلی^{۲*} - علیرضا فریدحسینی^۳ - الهه غفاری^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

چکیده:

بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های بارانسنجی و تازه تأسیس بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از این داده‌های بارش با چالشی جدی روبروست. از این رو استفاده از روش‌های سنجش از دوری می‌تواند یکی از گزینه‌های مورد استفاده در زمینه شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی باشد. در پژوهش حاضر، داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 برای حوضه آبریز کشف‌رود در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه ز شک و پارامترهای مربوط به حوضه آبریز ز شک در نرم‌افزار HEC-HMS، هیدروگراف جریان آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های بارش ERA5 در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه دارای کم‌برآوردی می‌باشند و نیز در گام زمانی ماهانه دقت این داده‌های بارش در تشخیص وقایع بارشی (از نظر شاخص‌های FAR، TS، POD) بالاتر از گام زمانی روزانه بود. همچنین داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در گام زمانی ماهانه، در ماه‌های گرم تابستان دقت پایین‌تری در تشخیص وقایع بارش نسبت به بقیه ماه‌های سال داشتند. هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 نسبت به هیدروگراف مشاهداتی دارای کم‌برآوردی بود که علت آن کم‌برآورد کردن میزان بارش در موقعیت ایستگاه ز شک در محدوده روزهای متناظر با واقعه ۹۹/۱/۲۳ تا ۹۹/۱/۲۴ ERA5 بود. همچنین هیدروگراف یاد شده در مقایسه با هیدروگراف مشاهداتی در محدوده غیر قابل قبول ($NSE \leq 0.5$ و $PBias \leq \pm 25$) بود. به طور کلی دقت هیدروگراف جریان حاصل از این محصول نسبت به هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه ز شک، نمی‌تواند منبع مورد اعتمادی در مدلسازی هیدرولوژیکی باشد.

واژه‌های کلیدی: زشک، مدل‌سازی بارش-رواناب، منوی GIS، ERA5، HEC-HMS

مقدمه

توسعه یافته‌اند که دارای توانایی‌های مناسب در بعد مکانی و زمانی هستند (Azari et al., 2009). داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 پنجمین نسل از داده‌های پایگاه مرکز پیش‌بینی وضع آب و هوای اروپا (ECMWF^۵) هستند که از ۱ ژانویه ۱۹۷۹، کل کره زمین را پوشش می‌دهند و دارای توان تفکیک مکانی و زمانی به ترتیب $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ و ۱ ساعت می‌باشند (Sabah et al., 2021). داده‌های بازتحلیل شده از ترکیب نتایج حاصل از پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت

بارش مؤلفه اصلی بیان آب و پارامتر کلیدی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی است که نو سانات زمانی و مکانی آن، اندازه‌گیری نقطه ای داده‌ها و نیز نبود شبکه متراکم برداشت داده، سبب شده است که اطلاعات برداشت شده نماینده خوبی برای تخمین میزان بارش در کل منطقه نباشند. در طی زمان، مدل‌های پیشرفته‌ای جهت برآورد خصوصیات بارش با استفاده از سنجش از دور و پدیده‌های هواشناسی

۱، ۲، ۳ و ۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشیاران و دانش آموخته گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد،

ایران

(Email: esmaili@um.ac.ir)

(*)- نویسنده مسئول:

کشور (مانند (Izadi et al., 2021)) صورت گرفته است اما در زمینه استفاده از این داده‌ها در مدل‌های هیدرولوژیکی به‌ویژه در نرم‌افزار HEC-HMS، تحقیقات کمی (از جمله (Shayeghi et al., 2019)) انجام شده است. بنابراین اهداف پژوهش حاضر عبارتند از: ۱) ارزیابی دقت داده‌های بارش یاد شده در حوضه آبریز کشف‌رود با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران سنجی و ۲) بررسی دقت داده‌های بارش ERA5 در نرم‌افزار HEC-HMS جهت برآورد هیدروگراف جریان در حوضه آبخیز زشک-ابره؛ در راستای اهداف مورد نظر تاکنون مطالعه‌ای در حوضه‌های به‌ترتیب کشف‌رود و زشک-ابره صورت نگرفته است. همچنین جهت شبیه‌سازی مشخصات حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS از ابزارهای موجود در نرم‌افزار GIS استفاده شد که آوریل ۲۰۲۱ به این نرم‌افزار افزوده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبخیز زشک-ابره (یا حوضه زشک) در موقعیت جغرافیایی $39^{\circ}59'39''$ تا $59^{\circ}16'13''$ طول شرقی و $36^{\circ}15'16''$ تا $36^{\circ}23'12''$ عرض شمالی قرار گرفته است (شکل ۱). این حوضه دارای مساحت حدود $9227,7$ هکتار، محیط $57,9$ کیلومتر، ارتفاع متوسط در حدود $2234,6$ متر، ارتفاع حداقل 1429 و حداکثر 3261 متر و شیب متوسط حدود $37,7$ در صد در حوضه آبریز کشف‌رود و از نظر سیاسی در محدوده شهرستان طرکبه-شاندیز واقع شده است. طول حوضه $21,5$ کیلومتر بوده و تمامی رواناب این حوضه از طریق رودخانه زشک-ابره عبور نموده و وارد دشت مشهد می‌شود. بارش متوسط حوضه حدود 404 میلی‌متر و بیشترین بارندگی ماهانه به‌ترتیب با 71 و 65 میلی‌متر در ماه‌های فروردین و اردیبهشت اتفاق می‌افتد که هرکدام حدود 18 و 16 درصد از کل بارش را به خود اختصاص می‌دهند و ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور نیز خشک‌ترین ماه‌های سال می‌باشند. درجه حرارت متوسط این حوضه حدود $8,7$ درجه سانتی‌گراد، متوسط حداقل و حداکثر درجه حرارت سالیانه به‌ترتیب $2,8$ و $14,2$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در پژوهش حاضر لایه‌های مورد نیاز از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی و داده‌های دبی و بارش ایستگاه‌های باران سنجی حوضه آبریز کشف‌رود از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی دریافت شد که به علت نقص در داده‌های ایستگاه‌های حصار-دهبار، خرکت، دولت‌آباد خرم‌دره، شریف‌آباد کشف‌رود، شغل‌آباد و مزدوران، این ایستگاه‌ها از مراحل

مدل‌های عددی پیش‌بینی وضع هوا با انواع داده‌های محاسباتی و مشاهداتی از سنجنده‌های مختلف به دست می‌آیند (Karimi et al., 2021). رواناب نیز از مهم‌ترین متغیرهای هیدرولوژیکی است و مدل‌سازی بارش-رواناب یکی از موارد کلیدی در علوم هیدرولوژی برای دستیابی به مشخصات رواناب از قبیل میزان حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج جریان به شمار می‌رود. HEC-HMS یکی از نرم‌افزارهای پرکاربرد در زمینه هیدرولوژی است که فرآیندهای بارش-رواناب حوضه‌های آبریز را شبیه‌سازی می‌کند و برای حل گسترده‌ترین مسائل از قبیل هیدرولوژی سیل، تأمین آب حوضه رودخانه‌های بزرگ و رواناب حوضه‌های طبیعی یا کوچک شهری طراحی شده است (USACE, 2021). محققان مختلفی در تحقیقات خود از داده‌های بارش ماهواره‌ای جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب در مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرده‌اند. زو و همکاران (Xu et al., 2022) در حوضه دریاچه‌های بزرگ Laurentian واقع در آمریکای شمالی از داده‌های بارش ERA5 و MERRA-2 جهت شبیه‌سازی جریان در مدل هیدرولوژیکی MESH^۳ استفاده کردند. نتایج نشان داد که داده‌های بارش ERA5 عملکرد بهتری نسبت به داده‌های بارش MERRA-2 داشت. نذیر و همکاران (Nazeer et al., 2022) از دو محصول ERA5-Land و JRA-55^۳ برای شبیه‌سازی ذوب برف/یخچال و رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی DDD^۴ در حوضه Gilgit در شمال پاکستان استفاده کردند. نتایج شبیه‌سازی رواناب نشان داد که محصول ERA5 عملکرد بهتری نسبت به JRA-55 دارد. چامپین و همکاران (Champagne et al., 2021) از داده‌های بارش ERA5 در حوضه‌های آبخیز خلیج هادسون، کانادا در مدل هیدرولوژیکی MESH^۵ استفاده نمودند. نتایج حاکی از دقت قابل قبول مدل (با توجه به مطالعه موربایی و همکاران (Moriassi et al., 2015)) از لحاظ راندمان نش ساتکلیف ($NSE < 0,7$) و درصد اریبی ($PBias > 12$) بود. Lorenzo و همکاران (Lorenzo et al., 2020) از داده‌های بارش ERA5 در سطح جهان در مدل هیدرولوژیکی GloFAS^۵ استفاده کردند. نتایج دقت مدل با $R = KGE = 0,67$ و $R = 0,8$ مناسب ارزیابی شد. در بررسی‌های صورت‌گرفته در پژوهش‌های پیشین، مطالعات متعددی در زمینه اعتبارسنجی داده‌های بازتحلیل شده ERA5 در سراسر جهان (مانند (Hwang et al., 2019))، (Singh et al., 2021)، (Voropay et al., 2021) و (Yuan et al., 2021)) و نیز در مناطق مختلف کشور در محدوده‌های استانی (مانند (ErfaniRahmatnia et al., 2018))، حوضه‌ای (مانند (Gorjizade et al., 2019)) و (Shayeghi et al., 2019)) و کل

3- Japanese 55-year Reanalysis

4- Distance Distribution Dynamics

5- Global Flood Awareness System

6- Kling-Gupta Efficiency

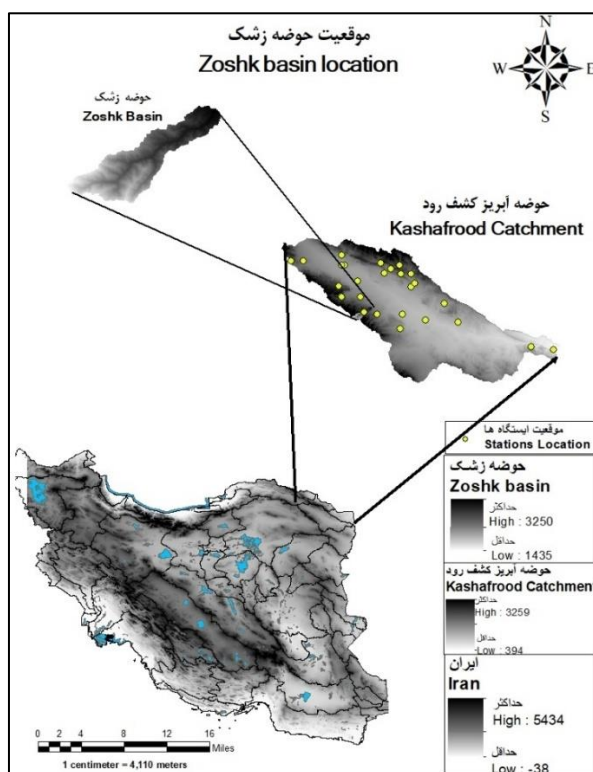
1- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

2- Modélisation Environnementale Communautaire-Surface and Hydrology

بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای ورودی در مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که به علت عدم پراکندگی مناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی و تازه تأسیس بودن برخی از این ایستگاه‌ها در اکثر حوضه‌های کشور، استفاده از این داده‌های بارش با چالشی جدی روبروست. از این رو استفاده از روش‌های دورسنجی یکی از گزینه‌های مورد استفاده در زمینه مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی می‌باشد.

انجام پژوهش حذف گردیدند. همچنین داده‌های بازتخلیل‌شده ERA5 نیز از پایگاه <https://cds.climate.copernicus.eu> دریافت گردید. **جدول ۱** و **۲** به ترتیب خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک و مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود را نشان می‌دهند.

روش پژوهش



شکل ۱- موقعیت حوضه آبخیز زشک-ابرده
Figure 1- Location of Zoshk-Abardeh Basin

جدول ۱- خصوصیات فیزیوگرافی حوضه زشک-ابرده (مأخذ: مهندسین مشاور آبخیز گستر شرق)

Table 1- Physiographic characteristics of Zoshk-Abardeh basin (Source: East Watershed Consulting Engineers)

نام حوضه Basin Name	مساحت (km^2) Area	محیط (km) Perimeter	شیب متوسط (%) Mean Slope	طول حوضه (km) Basin Length	ارتفاع حداکثر (m) Maximum Elevation	ارتفاع حداقل (m) Minimum Elevation	ارتفاع میانه (m) Medium Elevation	ارتفاع متوسط (m) Mean Elevation
زشک Zoshk	92.28	57.89	52.46	21.53	3261	1429	2238	2234.61

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه آبریز کشف‌رود (مأخذ: شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی)
Table 2- Geographical location of Kashfarrood catchment rain gauge stations (Source: Khorasan Razavi Regional Water Company)

نام ایستگاه Station	طول Longitude	عرض Latitude	ارتفاع (m) Elevation
آبقد ارداک (Abqad Ardak)	59.46	36.76	1505
آبقد فریزی (Abqad Ferizi)	58.96	36.49	1390
اداره مشهد (Edareh Mashhad)	59.57	36.31	1018
ارداک بند ساروج (Ardak Band Sarooj)	59.39	36.72	1320
آق دربند (Aq Darband)	60.85	35.99	602
آل (Al)	59.66	36.71	1464
امامزاده رادکان (Emamzadeh Radkan)	59	36.8	1214
امامزاده میامی (Emamzadeh Maimey)	60.126	36.23	1039
اندرخ (Andarokh)	59.66	36.58	1207
اولنگ اسدی (Oolang Asadi)	59.8	36.25	912
بلغور (Balqoor)	58.59	36.84	1941
بهمن جان علیا (Bahmanjan Olia)	58.97	36.9	1371
پل خاتون (Pol Khatoon)	61.07	35.96	410
تلغور (Talqoor)	59.36	36.82	1563
جاغرق (Jaqarq)	59.32	36.31	1434
چکنه علیا (Chakaneh Olia)	58.47	36.84	1704
چناران (Chenaran)	59.13	36.64	1186
دهانه اخلمد (Dahaneh Akhlamad)	58.94	36.59	1467
ز شک خراسان (Zoshk Khorasan)	59.19	36.33	1832
سد طرُق (Toroq Dam)	59.55	36.17	1242
سدکارده (Kardeh Dam)	59.69	36.62	1279
فریزی (Ferizi)	58.97	36.48	1631
قدیرآباد (Qadir Abad)	58.97	36.8	1195
گلمکان (Golmakan)	59.156	36.48	1440
گوش بالا (Gooshbala)	59.56	36.71	1569
مارشک (Marshk)	59.54	36.8	1830
هندل آباد (Handel Abad)	59.99	36.42	1206

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

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (4)$$

$$FAR^r = \frac{F}{H+F} \quad (5)$$

$$POD^a = \frac{H}{H+M} \quad (6)$$

$$TS^r = \frac{H}{H+F+M} \quad (7)$$

که O_i داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده، $\bar{O}$ متوسط داده‌های مشاهداتی، H تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده

در پژوهش حاضر، داده‌های بارش ERA5 پس از دانلود در گام زمانی روزانه و دقت تفکیک $1^\circ \times 1^\circ$ برای سال‌های آبی ۹۶-۱۳۹۵ تا ۹۹-۱۳۹۸ در فرمت NetCDF^۱ از سایت یاد شده در بخش قبل، با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های باران‌سنجی و شاخص‌های آماری به شرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفت.

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

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

- 4- False Alarm Ratio
- 5- Probability of Detection
- 6- Threat Score

- 1- Network Common Data Form
- 2- Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)
- 3- Root-Mean-Square Error

SCS استفاده شد. در این روش، زمان تأخیر زیرحوضه‌ها از طریق زمان تمرکز محاسبه شده توسط نرم‌افزار (رابطه ۱۱) تعیین شد.

$$T_c = 2.2 \times \left(\frac{L \times L_c}{\sqrt{Slope_{10-85}}} \right)^{0.3} \quad (11)$$

که در آن T_c زمان تمرکز (hr)، L طولانی‌ترین مسیر جریان (m)، L_c طول مسیر جریان از مرکز ثقل تا خروجی حوضه (m)، $Slope_{10-85}$ شیب متوسط ۱۰-۸۵٪ طولانی‌ترین مسیر جریان ($\frac{m}{m}$) می‌باشند. پس از معرفی مدل حوضه، مدل هواشناسی، مشخصه کنترل و ورود داده‌های بارش و دبی مشاهداتی به نرم‌افزار، برای دستیابی به بهترین برازش بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهده شده حوضه، اقدام به واسنجی مدل شد. بدین منظور پس از بررسی وقایع متعدد بارش و رواناب در نهایت دو واقعه مربوط به ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ جهت واسنجی و یک واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ جهت اعتبارسنجی مدل انتخاب شدند. برای ارزیابی مدل نیز شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف (NSE) و درصد اریبی استفاده گردیدند. موریاسی و همکاران (Moriasi et al., 2015) در مطالعه‌ای، عملکرد شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی برای مدل‌های حوضه آبریز را ارائه داده‌اند که مبنای سنجش شاخص‌های مورد استفاده در این پژوهش قرار گرفتند.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در حوضه آبریز کشف‌رود مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس، نرم‌افزار HEC-HMS با دو واقعه جریان مربوط به تاریخ‌های ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ برای واسنجی و یک واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ برای صحت‌سنجی با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک اجرا شد و در نهایت داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در موقعیت ایستگاه زشک مربوط به تاریخ ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج مربوط به هیدروگراف خروجی آن با نتایج مربوط به ایستگاه زشک مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه نتایج مربوط به هر بخش به صورت جداگانه آمده‌است.

ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل شده ERA5 در گام زمانی روزانه

در راستای ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی، شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر

موفقیت‌آمیز توسط یک محصول بارشی معین، F تعداد موارد غیرواقعی که به اشتباه پیش‌بینی شده‌اند و M تعداد رویدادهای واقعی که از دست رفته‌اند. شاخص FAR نسبت هشدار اشتباه که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده نادرست به تعداد کل رویدادهای پیش‌بینی شده است و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر می‌باشد و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده دقت بیشتر ماهواره است. POD احتمال تشخیص که نسبت تعداد رویدادهای پیش‌بینی شده درست به کل بارندگی‌های ثبت شده توسط ایستگاه‌ها است و مقدار یک بیانگر آنست که ماهواره همه رویدادهای بارندگی را به درستی پیش‌بینی کرده‌است. TS امتیاز تهدید که اندازه‌گیری یکپارچه‌ای از عملکرد کلی را ارائه می‌دهد و مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده مطابقت کامل رویدادهای شبیه‌سازی شده با رویدادهای مشاهداتی است. پس از اعتبارسنجی داده‌های بارش ERA5، در مرحله بعد لایه مدل رقوم ارتفاعی (DEM^1) با توان تفکیک مکانی ۱۲٫۵ متر ماهواره ALOS-PALSAR^۲ برای حوضه زشک از وبسایت vertex.daac.asf.alaska.edu دریافت گردید و سپس در نرم‌افزار HEC-HMS فراخوانی شد و با استفاده از فرامین موجود در منوی GIS پارامترهای حوضه محاسبه شدند. در ادامه جهت محاسبه میزان تلفات نفوذ از روش شماره منحنی SCS استفاده شد. در استفاده از این روش، در صد نفوذناپذیری، شماره منحنی و تلفات اولیه زیرحوضه‌ها بایستی به مدل معرفی شوند. در این راستا محاسبات مربوط به درصد نفوذناپذیری و متوسط شماره منحنی هر یک از زیرحوضه‌ها به ترتیب از طریق لایه‌های کاربری اراضی و شماره منحنی بدست آمدند.

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (8)$$

S نگهداشت سطحی در سطح حوضه نیز از رابطه زیر قابل

محاسبه است:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{سیستم متریک}) \quad (9)$$

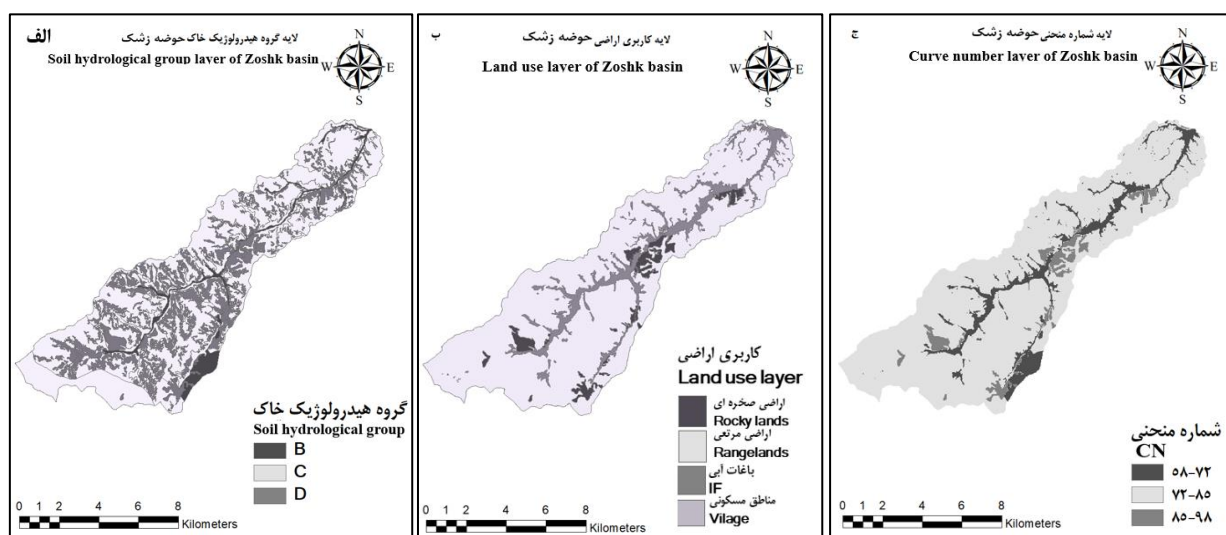
که P_e بارش مازاد تجمعی در زمان t (mm) و P بارش تجمعی در زمان t (mm) می‌باشند. تلفات اولیه I_a (mm) نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$I_a = 0.2S \quad (10)$$

به منظور تبدیل بارش به رواناب نیز از روش هیدروگراف واحد

ایستگاه هندل‌آباد با ۰٫۸۲ (حداقل کارایی) بدست آمد؛ همچنین برای شاخص TS که نشان‌دهنده مطابقت رویدادهای شبیه‌سازی شده با رویدادهای واقعی بارش است، حداقل و حداکثر مقدار آن در این پژوهش مربوط به ایستگاه‌های به‌ترتیب هندل‌آباد و بهمن‌جان علیا بود؛ همچنین در مورد POD حداقل و حداکثر تعداد رویدادهایی که به‌درستی به‌عنوان واقعه بارش، پیش‌بینی شده، مربوط به ایستگاه‌های به‌ترتیب هندل‌آباد و چکنه علیا بود. به‌طور کلی این محصول در تخمین بارش‌های شدید دارای کم‌برآوردی بود که این نتیجه در مطالعه سینق و همکاران (Singh et al., 2021) نیز مشاهده شده است. شکل‌های ۳ و ۴ نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند که مؤید نتایج بدست‌آمده از جدول ۳ می‌باشند.

NSE در محدوده کلی (۱-∞) بدست آمده و حداقل مقدار آن مربوط به ایستگاه بلغور و حداکثر مقدار آن مربوط به ایستگاه اولنگ ا سدی بود. دامنه تغییرات Bias نیز نشان‌دهنده آنست که به‌طور کلی این محصول دارای کم‌برآوردی بوده و حداقل مقدار آن مربوط به ایستگاه چکنه علیا و حداکثر مقدار آن مربوط به ایستگاه آبقد ارداک بود. همچنین حداقل و حداکثر مقدار RMSE به‌ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اندرخ و چکنه علیا بود. در محاسبه ضریب همبستگی نیز حداقل و حداکثر مقدار به‌ترتیب برای ایستگاه‌های امامزاده رادکان و پل خاتون بدست آمد. بر طبق شاخص FAR و نتایج حاصل از این جدول، محصول ERA5 حداقل تعداد وقایعی که به اشتباه، واقعه بارش پیش‌بینی کرده مربوط به ارداک بند ساروج با ۰٫۳۵ بود (حداکثر کارایی) و بیشترین تعداد وقایع به اشتباه پیش‌بینی‌شده مربوط به



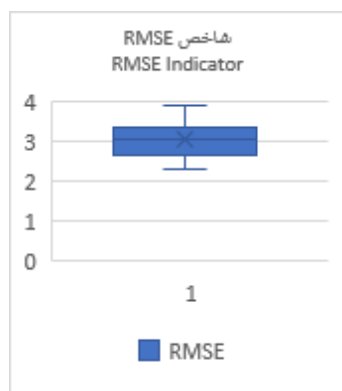
شکل ۲- الف- لایه گروه هیدرولوژیک خاک حوزه زشک؛ ب- لایه کاربری اراضی حوزه زشک؛ ج- لایه شماره منحنی حوزه زشک (دریافتی از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی)

Figure 2- A- Soil hydrological group layer of Zashk basin; B- Land use layer of Zashk basin; C- Curve number layer of Zashk basin (received from the General Department of Natural Resources and Watershed Management of Khorasan Razavi Province)

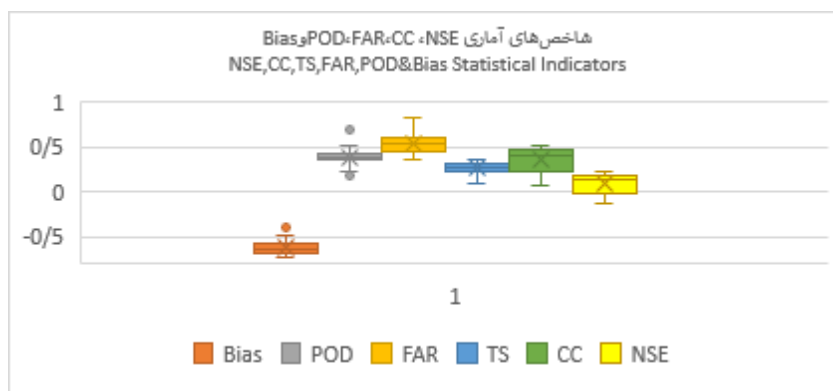
جدول ۳- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه

Table 3- Table of values of statistical indicators to evaluate ERA5 precipitation data in daily time step

	حداقل Minimum	حداکثر Maximum	میان Median	میانگین Mean
Bias	-0.393	-0.741	-0.646	-0.627
RMSE	2.286	3.899	3.063	3.037
POD	0.177	0.686	0.384	0.386
FAR	0.35	0.821	0.535	0.539
TS	0.098	0.352	0.281	0.263
CC	0.081	0.517	0.411	0.363
NSE	-0.132	0.232	0.142	0.097



شکل ۴- نمودار جعبه‌ای شاخص RMSE
Figure 4- Box plot of RMSE indicator



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های CC، NSE، POD، FAR، TS و Bias
Figure 3- Box plot of CC، NSE، POD، FAR، TS & Bias indicators

ماه‌های آبان تا اردیبهشت بود؛ در نهایت براساس شاخص POD حداقل مقادیر بدست‌آمده مربوط به شهریور و حداکثر مقدار آن مربوط به ماه‌های مهر تا خرداد بود. شکل‌های ۵ و ۶ نیز نمودارهای جعبه‌ای شاخص‌های محاسبه‌شده در این پژوهش را نشان می‌دهند. نتایج بدست‌آمده نشان‌دهنده عملکرد نامناسب داده‌های ERA5 در تشخیص وقایع بارش در ماه‌های گرم و خشک (فصل تابستان) بود و در بقیه سال عملکرد مناسب‌تری داشت. به طور کلی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی ماهانه دقت بالاتری نسبت به گام زمانی روزانه داشت.

ارزیابی هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش زمینی
پس از اعتبارسنجی داده‌های بارش ERA5، نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه زشک در وقایع ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ مورد واسنجی و با استفاده از واقعه مربوط به ۱۳۹۹/۱/۲۳ مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. سپس داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی روزانه در موقعیت ایستگاه زشک مربوط برای واقعه ۹۹/۱/۲۳ وارد HEC-HMS شد و نتایج آن با استفاده از شاخص‌های آماری NSE و PBias مورد ارزیابی قرار گرفت.

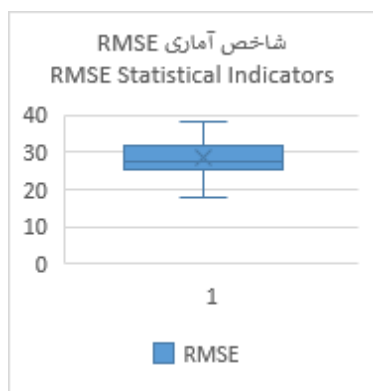
ارزیابی دقت داده‌های بازتحلیل‌شده ERA5 در گام زمانی ماهانه

در ارزیابی دقت داده‌های بارش ERA5 نسبت به داده‌های بارش زمینی، شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۴ آمده‌است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر شاخص‌های ارزیابی به مقدار ایده‌آل خود نسبت به گام زمانی روزانه، نزدیکتر شده‌اند. در ارتباط بین شاخص‌های آماری و هر یک از ماه‌ها، حداکثر مقدار شاخص NSE برای شهریور ماه بدست آمده و حداقل مقدار آن مربوط به فروردین ماه بود. حداقل مقدار Bias نیز مربوط به مرداد ماه و حداکثر مقدار آن مربوط به مهر ماه بود. همچنین حداقل و حداکثر مقدار RMSE به ترتیب برای شهریور ماه و فروردین ماه بدست آمد. در محاسبه ضریب همبستگی نیز حداقل و حداکثر مقدار به ترتیب مربوط به مهر ماه و خرداد ماه بود. براساس شاخص FAR و بنابر این جدول، محصول ERA5 حداقل تعداد وقایعی که به اشتباه، بارش پیش‌بینی کرده مربوط به ماه‌های آبان تا اردیبهشت (حداکثر کارایی) و بیشترین تعداد وقایع به اشتباه پیش‌بینی‌شده، مربوط به شهریور ماه (حداقل کارایی) بود؛ همچنین در مورد شاخص TS حداقل مقادیر بدست‌آمده برای آن مربوط به ماه‌های شهریور و حداکثر مقدار آن مربوط به

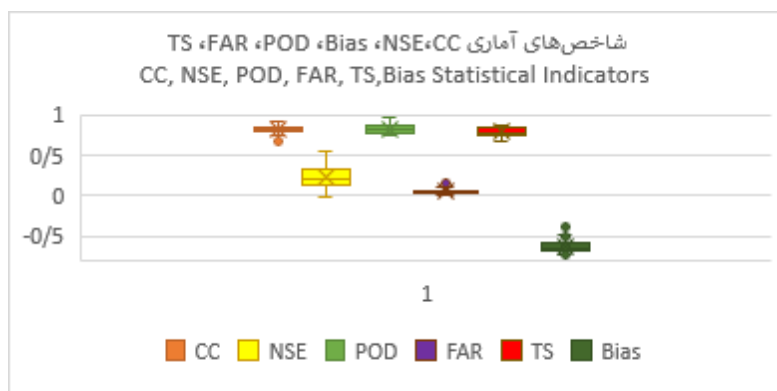
جدول ۴- جدول مقادیر شاخص‌های آماری جهت ارزیابی داده‌های بارش ERA5 در گام زمانی ماهانه

Table 4- Table of values of statistical indicators to evaluate ERA5 precipitation data in monthly time step

	حداقل	حداکثر	میان	میانگین
	Minimum	Maximum	Median	Mean
Bias	-0.39	-0.74	-0.63	-0.65
RMSE	17.85	38.27	28.37	27.67
POD	0.74	0.97	0.83	0.82
FAR	0	0.16	0.06	0.06
TS	0.68	0.88	0.79	0.78
CC	0.68	0.92	0.82	0.82
NSE	-0.02	0.55	0.23	0.2



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای شاخص RMSE
Figure 6- Box plot of RMSE indicator



شکل ۵- نمودار جعبه‌ای شاخص‌های CC، NSE، POD، FAR، TS و Bias
Figure 5- Box plot of CC، NSE، POD، FAR، TS و Bias indicators



شکل ۷- شمایی از مدل حوضه ساخته شده در HEC-HMS از حوضه آبخیز زشک
Figure 3- Scheme of basin model made in HEC-HMS from Zashk watershed

جدول ۵- جدول برخی از پارامترهای محاسبه شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS
Table 5- Table of some parameters calculated by HEC-HMS software

نام زیرحوضه Subbasin name	مساحت (km ²) Area	طولانی‌ترین مسیر جریان (km) Longest flow path	شیب زیرحوضه Basin Slope	۱۰-۸۵٪ طولانی ترین مسیر جریان Length flow path 10-85%	طولانی‌ترین مسیر جریان از مرکز ثقل تا خروجی زیرحوضه‌ها (km) Centroidal flow path length	طولانی ترین شیب مسیر Longest flow path slope	تراکم زهکشی Drainage density	ضریب کشیدگی Drainage coefficient
Z1	14.5	7.16	0.46	5.37	3.51	0.16	0.58	0.59
Z2	6.96	4.25	0.46	3.18	2.04	0.2	0.57	0.7
Z'1	15.83	6.12	0.49	4.59	1.86	0.17	0.72	0.73
Z3	12.02	8.68	0.5	6.51	4.44	0.13	0.62	0.45
Z'2	6.71	4.36	0.51	3.27	1.57	0.18	0.5	0.67
Z'3	8.39	4.3	0.41	3.23	1.15	0.13	0.74	0.76
Z'4	9.42	6.51	0.42	4.88	2.6	0.09	0.65	0.53
Z4	2.99	3.42	0.38	2.56	1.53	0.17	0.74	0.57
Z'5	3.97	5.4	0.3	4.05	3.19	0.08	0.96	0.42
Z'5	10.13	6.72	0.35	5.04	2.96	0.09	0.72	0.53

واسنجی در جدول ۶ آمده است.

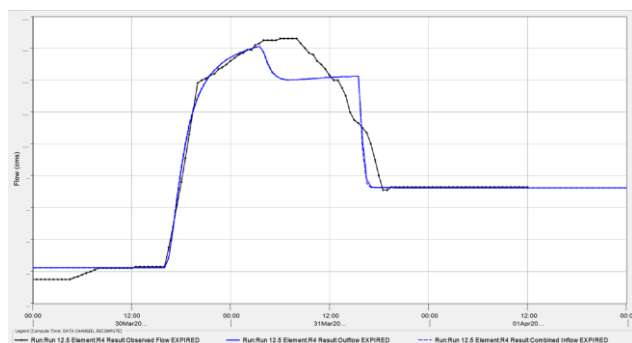
به منظور مقایسه هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در موقعیت ایستگاه زشک، شکل‌های ۸ تا ۱۰ در ادامه ارائه شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مدل در پیش‌بینی بازوی پایین‌رونده هیدروگراف، دقت کمتری داشته‌است که این مسئله به علت ورود داده‌های بارش در گام زمانی روزانه بود که به تبع آن، دقت هیدروگراف محاسباتی نسبت به هیدروگراف مشاهداتی که در گام زمانی ساعتی وارد شده، کمتر بوده‌است. علت استفاده از داده‌های بارش در گام زمانی روزانه، عدم وجود بارانسنج ثابت در حوضه زشک بوده‌است. مقادیر دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج نسبت به هیدروگراف مشاهداتی با اختلاف برآورد شده‌است؛ همچنین سطح زیر منحنی که نشان‌دهنده حجم می‌باشد با دقت کمتری برآورد گردیده‌است که این مسئله با نتایج شاخص‌های آماری در جدول ۷ مطابقت دارد.

در این مطالعه همانطور که قبلاً بیان شد جهت محاسبه پارامترهای حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS، از منوی GIS استفاده شد. شکل ۷ شمایی از مدل حوضه ساخته شده در نرم‌افزار HEC-HMS با استفاده از منوی GIS را نشان می‌دهد. جدول ۵ نیز برخی از پارامترهای محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار HEC-HMS را نشان می‌دهد.

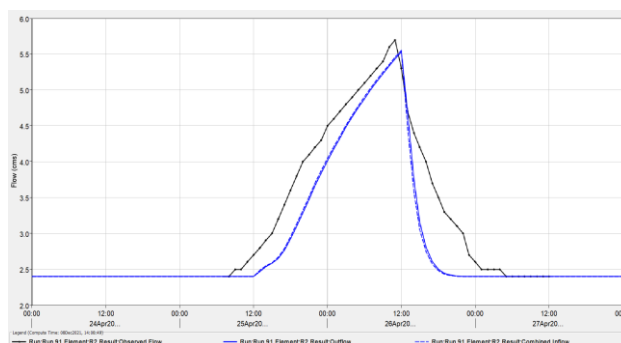
در مرحله واسنجی، دو واقعه انتخاب‌شده جهت واسنجی مدل ۱۳۹۱/۱/۱۱ و ۱۳۹۱/۲/۶ بودند که شرایط رطوبتی اولیه برای این دو واقعه به ترتیب خشک و مرطوب بود و بنابراین میزان شماره منحنی با استفاده از جدول تبدیل شماره منحنی از شرایط رطوبتی متوسط به حالت خشک یا مرطوب تغییر کردند. پس از واسنجی مدل به صورت دستی با توجه به اینکه واقعه انتخاب‌شده جهت اعتبارسنجی دارای شرایط رطوبتی اولیه مرطوب بود مقادیر شماره منحنی بهینه شده در حالت مرطوب برای آن به مدل وارد شد. مقادیر CN پیش و پس از

جدول ۶- مقادیر CN پیش و پس از واسنجی
Table 6- CN values before and after calibration

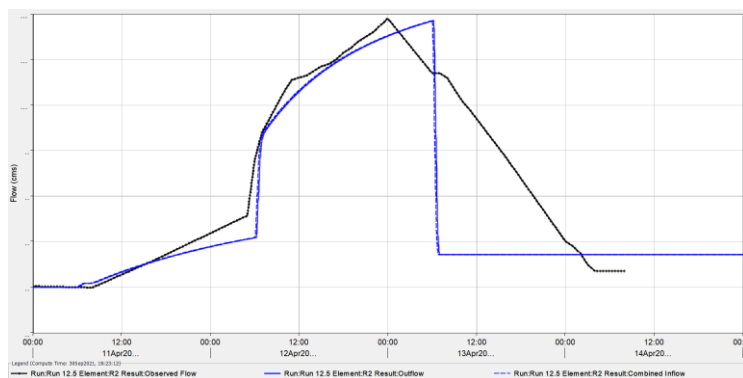
زیرحوضه Subbasin	درصد تغییرات CN					
	مقادیر CN پیش از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN values before calibration for 91/1/11	مقادیر CN پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN values after calibration for 91/1/11	پیش و پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۱/۱۱ CN changes Percentage before and after calibration for 91/1/11	مقادیر CN پیش از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN values before calibration for 91/2/6	مقادیر CN پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN values after calibration for 91/2/6	درصد تغییرات CN پیش و پس از واسنجی مربوط به واقعه ۹۱/۲/۶ CN changes Percentage before and after calibration for 91/2/6
Z1	61.5	56.5	8.13	91	87	4.4
Z2	60	55	8.33	94	90	4.2
Z'1	70	65	7.14	92	88	4.3
Z3	70	65	7.14	93.5	86.5	7.4
Z'2	72	67	6.94	90.5	86.5	4
Z'3	66	61	7.57	90	86	4
Z'4	64.5	64.5	0	89	81	8.9
Z4	56.5	56.5	0	93.5	75.6	19
Z'5	61.5	58	5.69	89.5	76	15



شکل ۹- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۱/۱۱ پس از واسنجی
Figure 5- Event Hydrograph 11/1/1391 Post-Calibration



شکل ۸- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۱/۲/۶ پس از واسنجی
Figure 4- Event Hydrograph 6/2/1391 Post-Calibration



شکل ۱۰- هیدروگراف واقعه ۱۳۹۹/۱/۲۳

Figure 6- Event Hydrograph 23/1/1399

جدول ۷- مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها

Table 7- Volume values and peak flow of observational and computational hydrographs with difference and percentage difference between them

	۶/۲/۹۱ ۶/۲/۹۱			۱۱/۱/۹۱ ۱۱/۱/۹۱			۲۳/۱/۹۹ ۲۳/۱/۹۹		
	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ /S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume
هیدروگراف محاسباتی Computational hydrograph	17.62	5.6	12:00,7/2/91	76.02	16.1	7:00,12/1/91	33.22	13.7	06:00,8/1/99
هیدروگراف مشاهداتی Observational hydrograph	12.19	5.7	11:00,7/2/91	66.02	16.6	12:00,12/1/91	35.27	13.8	00:00,8/1/99
اختلاف Difference	5.43	-0.1	1	10	-0.5	5	-2.05	-0.1	6
درصد اختلاف Percentage difference	0.31	-0.02	-	0.13	-0.03	-	-0.06	-0.007	-

جدول ۸- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی برای وقایع ۹۱/۱/۱۱، ۹۱/۲/۶ و ۹۹/۱/۲۳

Table 8- The values of Nash Sutcliffe efficiency coefficient and bias percentage for the events of 11/1/91, 2/6/91 and 23/1/99

شاخص‌های آماری Statistical indicators	۹۱/۱/۱۱ 11/1/91	۹۱/۲/۶ 6/2/91	۹۹/۱/۲۳ 23/1/99
نش ساتکلیف (NSE)	0.802	0.966	0.644
درصد اریبی (PBias)	-9.75	-1.88	-15.82

از بین پارامترهای آماری سنجش خطا نیز در این پژوهش از ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی استفاده شد که نتایج آن در جدول ۸ آمده است. طبق مطالعه موریا سی و همکاران (Moriasi *et al.*, 2015) در مورد رتبه‌بندی عملکرد شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های حوضه آبریز، نتایج مشروحه در جدول ۸ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند زیرا شاخص‌های NSE در محدوده بسیار خوب (۰٫۸-۱٫۰) و خوب (۰٫۶-۰٫۸) و PBias در محدوده بسیار خوب ($PBias \leq \pm 5$) و خوب ($\pm 5 \leq PBias \leq \pm 10$) قرار گرفتند. در همین جدول مقادیر منفی درصد اریبی نشان می‌دهند که مقادیر جریان شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده است که این مسئله در پژوهش خضریان نژاد و همکاران (Khezriannejad *et al.*, 2013) نیز مشاهده شده بود.

از بین پارامترهای آماری سنجش خطا نیز در این پژوهش از ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد اریبی استفاده شد که نتایج آن در جدول ۸ آمده است. طبق مطالعه موریا سی و همکاران (Moriasi *et al.*, 2015) در مورد رتبه‌بندی عملکرد شاخص‌های ارزیابی برای مدل‌های حوضه آبریز، نتایج مشروحه در جدول ۸ نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل هستند زیرا شاخص‌های NSE در محدوده بسیار خوب (۰٫۸-۱٫۰) و خوب (۰٫۶-۰٫۸) و PBias در محدوده بسیار خوب ($PBias \leq \pm 5$) و خوب ($\pm 5 \leq PBias \leq \pm 10$) قرار گرفتند. در همین جدول مقادیر منفی درصد اریبی نشان می‌دهند که مقادیر جریان شبیه‌سازی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بوده است که این مسئله در پژوهش خضریان نژاد و همکاران (Khezriannejad *et al.*, 2013) نیز مشاهده شده بود.

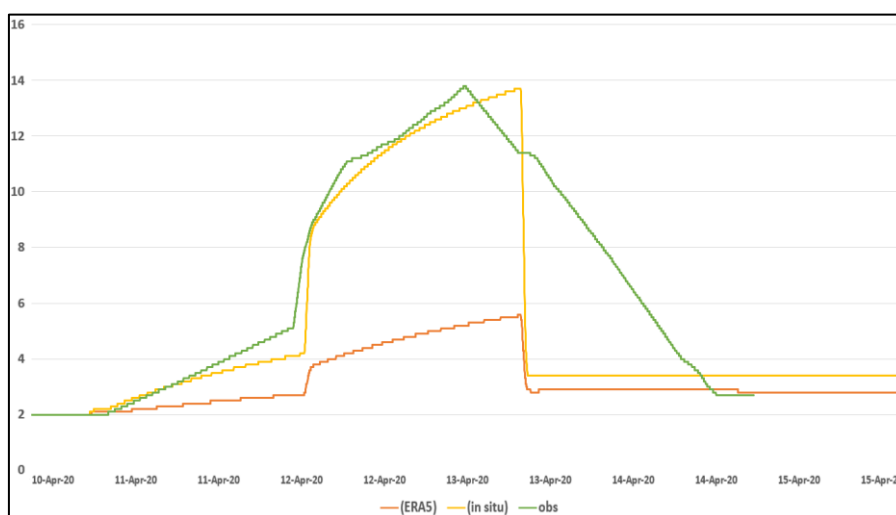
غیر قابل قبول ($NSE \leq 0.5$ و $PBias \leq \pm 25$)، نسبت به هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک، کارایی این منبع بارشی پایین می‌باشد. همچنین با توجه به **جدول ۱۰** به دلیل کم‌برآوردی داده بارش توسط این محصول، در نرم‌افزار HEC-HMS نیز میزان دبی پیک به مقدار کمتری محاسبه شده‌است.

در پژوهش حاضر به بررسی دقت داده‌های بارش بازتحلیل شده ERA5 در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در حوضه زشک پرداخته شد که بدین منظور ابتدا نیاز به اعتبارسنجی داده‌های بارش این محصول در حوضه آبریز کشف‌رود بود. عملکرد این محصول در گام‌های زمانی روزانه و ماهانه دارای کم‌برآوردی بود که همراستا با مطالعه ایزدی و همکاران (*Izadi et al., 2021*) می‌باشد اما در مطالعه امجد و همکاران (*Amjad et al., 2020*) به طور کلی این محصول بیش‌برآوردی داشت. در نهایت دقت این محصول در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS نسبت به هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک رضایت بخش نبود اما در مطالعات چامپین و همکاران (*Champagne et al., 2021*)، لورنزو و همکاران (*Lorenzo et al., 2020*)، یین و همکاران (*Yin et al., 2020*) و زو و همکاران (*Xu et al., 2022*) عملکرد این محصول قابل قبول بود. به طور کلی کم‌برآوردی این محصول در مدلسازی هیدرولوژیکی همراستا با مطالعه زو و همکاران (*Xu et al., 2022*) می‌باشد. مطالعات آینده می‌توانند در خصوص ارزیابی داده‌های بارش محصولات مختلف در نرم‌افزار HEC-HMS باشند. همچنین در جهت افزایش دقت این محصولات، با ترکیب آن‌ها با یکدیگر (*Amjad et al., 2020*) می‌توان به این مهم دست یافت.

ارزیابی هیدروگراف جریان با استفاده از داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5

در نهایت دقت هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 مورد ارزیابی قرار گرفت. **شکل ۱۱** هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (هیدروگراف مشاهداتی)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (داده‌های بارش زمینی) و هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد. طبق این شکل، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 دارای کم‌برآوردی می‌باشد که علت آن کم‌برآورد کردن میزان بارش توسط ERA5 بوده‌است. زمان رسیدن به دبی پیک در هیدروگراف مربوط به داده‌های بارش ایستگاه زشک (زرد) و هیدروگراف مربوط به داده‌های بارش ERA5 (قرمز) با تأخیر ۶ ساعت نسبت به هیدروگراف مشاهداتی (سبز) اتفاق افتاد که علت آن می‌تواند به دلیل دقت کم داده‌های بارش باشد. عدم تطابق بازوی پایین رونده هیدروگراف‌های داده‌های بارش ایستگاه زشک و ERA5 عدم برابری گام‌های زمانی داده‌های دبی و بارش بود که در بخش قبل توضیح داده شد. **جدول ۹** مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5 را نشان می‌دهد.

با توجه به مطالعه Moriasi و همکاران (*Moriasi et al., 2015*) و شاخص‌های NSE و PBias در **جدول ۱۰**، داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5 با دارا بودن ضریب NSE و PBias در محدوده



شکل ۱۱- هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری (منحنی سبز)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ایستگاه زشک (منحنی زرد)، هیدروگراف جریان حاصل از داده‌های بارش ERA5 (منحنی قرمز)

Figure 7- Flow hydrograph of flow data of hydrometric station (green lines), hydrograph of flow of precipitation data of Zoshk station (yellow lines), hydrograph of flow of precipitation data of ERA5 (red lines)

جدول ۹- مقادیر حجم و دبی اوج هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی به همراه اختلاف و درصد اختلاف بین آن‌ها برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

Table 9- Peak volume and flow values of observational and computational hydrographs with difference and percentage difference between them for observational hydrograph and simulated hydrograph from ERA5 precipitation data

	مشاهداتی Observational flow hydrograph 99/1/23			ERA5 ۹۹/۱/۲۳ بارش ERA5 rainfall 99/1/23		
	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ / S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume	حجم Volume (mm)	دبی پیک Peak flow (M ³ / S)	زمان رسیدن به دبی اوج Arrival time toward peak volume
هیدروگراف محاسباتی Computational hydrograph	33.22	13.7	06:00,25/1/99	17.87	5.6	06:00,25/1/99
هیدروگراف مشاهداتی Observational hydrograph	35.27	13.8	00:00,25/1/99	35.27	13.8	00:00,25/1/99
اختلاف Difference	-2.05	-0.1	6	17.4	-7.8	6
درصد اختلاف Percentage difference	-0.06	-0.007	-	-0.97	-1.46	-

جدول ۱۰- مقادیر شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش ساتکلیف و درصد ارزیابی برای هیدروگراف مشاهداتی و هیدروگراف حاصل از داده‌های بارش ERA5

Table 10- The values of Nash Sutcliffe efficiency coefficient and bias percentage for observational hydrographs and hydrographs obtained from ERA5 precipitation data

شاخص‌های آماری Statistical indicators	هیدروگراف جریان مشاهداتی ۹۹/۱/۲۳ Observational flow hydrograph 23/1/99	ERA5 ۹۹/۱/۲۳ بارش ERA5 rainfall 23/1/99
کارایی نش ساتکلیف (NSE)	0.644	-0.47
درصد ارزیابی (PBias)	-15.82	-55.16

منابع

- Amjad, M., Yilmaz, M., Yucel, I., & Yilmaz, K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology* 584: 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>.
- Azari, H., Matkan, A.A., Shakibaa, A., & Pourali, S.H. (2009). Simulation and flood warning with hydrology models in gis and precipitation estimation through remote sensing. *Iranian Journal of Geology* 3: 39-51.
- Champagne, O., Arain, M., Wang, S., Leduc, M., & Russell, H. (2021). Interdecadal variability of streamflow in the hudson bay lowlands watersheds driven by atmospheric circulation. *Journal of Hydrology Regional Studies* 36: 100868. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100868>.
- ErfaniRahmatnia, A., Babaian, I., & Entezari, A. (2018). *Efficiency of era-interim retrieval data in simulating the observed rainfall of khorasan razavi meteorological stations*. p. 5. The Second National Conference on Meteorology of Iran, 9 May. Mashhad Ferdowsi University. (In Persian with English abstract)
- Gorjizade, A., Akhondali, A., Shahbazi, A., & Moridi, A. (2019). Comparison and evaluation of precipitation estimated by era-interim, persiann-cdr and chirps models at the upstream of maroon dam. *Iran Water Resources Research* 15: 267-279. (In Persian with English abstract)
- Hwang, S.-O., Park, J., & Kim, H.M. (2019). Effect of hydrometeor species on very-short-range simulations of precipitation using era5. *Atmospheric Research* 218: 245-256. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.12.008>.
- Izadi, N., Ghasemi, E., Ranjbar, A., Shamsipour, A., Fattahi, E., & Habibi, M. (2021). Evaluation of era5 precipitation accuracy based on various time scales over iran during 2000–2018. *Water* 13: 2538. <https://doi.org/10.3390/w13182538>.
- Karimi, M., Heidari, S., & Rafati, S. (2021). The trend of atmospheric water cycle components (precipitation and precipitable water) in catchments of iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards* 8: 33-54. (In Persian)

- 9- Khezriannejad, N., Hajjam, S., Amirhossein, M., & Ibrahim, M. (2013). Real time runoff forecasting of tire basin using quantitative precipitation forecasting of wrf model. *Journal of Climate Research* 3: 53-66. (In Persian)
- 10- Lorenzo, A., Lorini, V., Hirpa, F.A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C., & Salamon, P. (2020). A global streamflow reanalysis for 1980–2018. *Journal of Hydrology X* 6: 100049. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100049>.
- 11- Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)* 58: 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
- 12- Nazeer, A., Maskey, S., Skaugen, T., & McClain, M.E. (2022). Simulating the hydrological regime of the snow fed and glacierised gilgit basin in the upper indus using global precipitation products and a data parsimonious precipitation-runoff model. *Science of The Total Environment* 802: 149872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149872>.
- 13- Sabah, P., Junaid Nazir, K., Rohitashw, K., & Saqib Parvaze, A. (2021). Flood forecasting in the sparsely gauged jhelum river basin of greater himalayas using integrated hydrological and hydraulic modelling approach. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-461873/v1>.
- 14- Shayeghi, A., Azizian, A., & Brocca, L. (2019). The reliability of reanalysis and remotely sensed precipitation products for hydrological simulation over the sefidrood river basin in iran. *Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques*. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1691217>.
- 15- Singh, T., Saha, U., Prasad, V.S., & Gupta, M.D. (2021). Assessment of newly-developed high resolution reanalyses (imdaa, ngfs and era5) against rainfall observations for indian region. *Atmospheric Research* 259: 105679. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105679>.
- 16- USACE, Hydrologic modeling system hec-hms, user's manual, technical reference manual, Washington, DC: United States Army Corps of Engineers, 2021, p. 676. [Online]. Available.
- 17- Voropay, N., Ryazanova, A., & Dyukarev, E. (2021). High-resolution bias-corrected precipitation data over south Siberia, Russia. *Atmospheric Research* 254: 105528. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>.
- 18- Xu, X., Frey, S.K., & Ma, D. (2022). Hydrological performance of era5 and merra-2 precipitation products over the great lakes basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 39: 100982. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100982>.
- 19- Yin, J., Guo, S., gu, L., Zeng, Z., Liu, D., Chen, J., Shen, Y., & Xu, C.-Y. (2020). Blending multi-satellite, atmospheric reanalysis and gauge precipitation products to facilitate hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 593. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125878>.
- 20- Yuan, X., Yang, K., Lu, H., He, J., Sun, J., & Wang, Y. (2021). Characterizing the features of precipitation for the tibetan plateau among four gridded datasets: Detection accuracy and spatio-temporal variabilities. *Atmospheric Research* 264: 105875. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105875>.

Contents

Investigating the Role of Natural and Human Factors on Intensification of Floods and Flooding in Kalat City	421
S. Attaran, A. Mosaedi, H. Sojasi	
Introducing a New Drinking Water Quality Index for Surface Water Resources Using Multivariate Analysis (Case Study: Sefidroud River)	439
M. Mohammadi Ghaleni, H. Kardan Moghaddam	
GIS-Based Land Capability and Suitability Evaluation for Irrigated Agriculture (Case Study: Karaj-Qazvin)	459
F. Sarmadian, S. Teymuri Bardiani, Sh. Rahmani Syalarz, N. Sayadi	
Effect of Soil Amendments on Physiological Responses of <i>Lycium depressum</i> Stocks to Drought Stress	477
S. Mohammadi, A. Sepehry, M. Farzam, H. Barani	
Evaluation of Efficiency of Classification Methods and Spectral Indices in Cropped Area Estimation of Shush County	493
M. Abiyat, M. Abiyat, M. Abiyat	
Evaluation of Wastewater Effects on Soil Chemical Characteristics, Microelements Concentration, Heavy Metals Accumulation and Maize Yield (Single Cross 704)	511
F. Alizadegan, M.A. Gholami Sefidkouhi, S. Shiukhy	
Evaluation of Streamflow Hydrograph using ERA5 Precipitation Data in HEC-HMS Model	525
S. Pouretezari, K. Esmaili, A. Faridhosseini, E. Ghafari	

WATER AND SOIL

(AGRICULTURAL SCIENCES AND TECHNOLOGY)

Vol . 36

No. 4

2022

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

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

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

Editorial Board:

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

Publisher: Ferdowsi University of Mashhad

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

P.O. Box: 91775- 1163

Fax: +98 51 8787430

E-Mail: jswa3@um.ac.ir

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

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