

Determining Homogeneous Zones of Water Storage Capacity Using Concepts of Algebraic Maps

M Shakouri Katigari¹, M Shabanpour Shahrestani^{*2}, N Davatgar³ and M Vazifiedoust⁴

Received: December 17, 2022

Accepted: June 13, 2023

Revised: June 2, 2023

Published online: June 21, 2024

1-PhD, Department of Soil and Water, Faculty of Agric., University of Guilan, Rasht, Iran.

2-Assoc. Prof., Department of Soil Science, Faculty of Agric., University of Guilan, Rasht, Iran

3- Assoc. Prof., Department of Soil Physics and Irrigation, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

4- Assoc. Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agric, University of Guilan, Rasht, Iran

* Corresponding Author, Email: Shabanpour@guilan.ac.ir

Abstract

Background and Objectives

Available water holding capacity (AWHC) is a key property for quantifying the amount of water available to plants. This property determines the amount of water required for the crop and the irrigation time interval and is related to the inherent productivity of the soil. Determining the homogeneous zones of available water-holding capacity is a possible way to evaluate the contribution of the soil in the optimal input of irrigation water in paddy fields. The rice fields of Guilan province, located in the north of Iran, with an area of about 238,000 hectares, are one of the most important rice cultivation areas because more than 30% of the country's rice is produced in this area. Irrigation in this area is done in the form of uniform flooding for easier transfer of rice seedlings, better water retention and weed control. In recent years, due to drought, population growth and increasing urban and industrial demand for water and inefficient management of flood irrigation, an attempt has been made to manage irrigation in the form of intermittent irrigation. Therefore, determining the homogeneous zones of water storage capacity management is a possible way to evaluate the contribution of soil in the optimal input of irrigation water in paddy fields. Because with its help, it is possible to manage the appropriate time of drying and wetting of paddy fields in intermittent irrigation. Water resource management is a priority to reduce productivity instability and negative socio-economic effects. For this purpose, homogeneous water storage capacity management zones were determined in Kouchesfahan region to investigate the physical-hydraulic conditions of paddy soils, dividing the entire region into zones with the same potential for water storage capacity and investigating its relationship with rice yield.

Methodology

A total of 131 undisturbed and disturbed soil samples with uniform geographic distribution were prepared from the rice root growth area and some chemical, fertility and physical-hydraulic properties were measured. Rice yield was also measured in most of the soil sampling points. Then, among 14 characteristics, seven characteristics (clay, organic carbon, linear expansion coefficient, saturated hydraulic conductivity, average particle diameter, accessible water and integral energy) that can affect



the water holding capacity in the soil were selected. The number of homogeneous zones of water storage capacity was determined using two statistics, fuzzy efficiency index and modified classification entropy index. Then, by using the concepts related to algebraic maps, the integration of information layers was done in the GIS environment and the relevant maps were prepared.

Findings

The results of the fuzzy efficiency index and the entropy index showed that the investigated area can be divided into four water storage capacity areas. The lowest and highest value of the average yield was seen in the first and fourth zones, respectively. A significant difference was seen between available water, organic carbon, Coefficient of Linear Extensibility (COLE), integral energy and Saturated Hydraulic Conductivity (K_s) in four management zones, but no significant difference was seen in the amount of clay and the mean diameter of the pores. In the first zone, organic carbon, Coefficient of linear extensibility (COLE), Median of Soil Pore Size Distribution (d_{median}) and K_s showed the lowest values, but in the fourth zone, all these properties have the opposite behavior. The yield in the first zone showed an increasing trend from 3971 kg ha⁻¹ to 4312 kg ha⁻¹ in the fourth zone.

Conclusion

These results showed that the available water-holding capacity increases from zone one to zone four. Therefore, one and two zones will be particularly sensitive during drought and lack of moisture during the growing season, and the management of these zones needs special attention. In these zones, the irrigation cycle (irrigation time interval) should be shorter than the other two areas, in order to avoid the occurrence of drought stress. The soils of the studied area were uneven in terms of water retention. These results showed that the uniform (fixed) management of water consumption, in addition to increasing costs, can also lead to the waste of a large amount of water. In this situation, location-specific irrigation management can be more efficient in sustainable economic production. The comparison of the estimation map of homogeneous zones shows the water storage capacity and yield, in some zones, although the soil conditions are suitable in terms of moisture conditions, the yield is not in optimal conditions. It seems that until the state of fertility is not favorable, physical conditions cannot show their effects in performance well. In other words, until the lack of fertility is not resolved, restrictions or suitable physical conditions will not have clear effects on performance.

Keywords: Fuzzy Performance Index, Management zones, Modified Partition Entropy, Algebraic maps

مقاله پژوهشی

تعیین نواحی همگون ظرفیت نگهداری آب با استفاده از مفاهیم نقشه های جبری

مریم شکوری کتیگری^۱، محمود شعبانپور شهرستانی^{۲*}، ناصر دوات‌گر^۳، مجید وظیفه‌دوست^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۲

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۰۴/۰۱

۱- دکتری خاکشناسی، گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت

۲- دانشیار گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت

۳- دانشیار مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Shabanpour@guilan.ac.ir

چکیده

ظرفیت نگهداری آب قابل دسترس یک ویژگی کلیدی برای کمی سازی مقدار آب قابل دسترس برای گیاهان است. تعیین نواحی همگون مدیریت ظرفیت نگهداری آب یک راه ممکن برای ارزیابی سهم خاک در ورودی بهینه آب آبیاری در مزارع شالیزاری است. به این منظور نواحی همگون مدیریتی ظرفیت نگهداری آب در منطقه کوچصفهان برای مدیریت آبیاری تناوبی تعیین شد. ۱۳۱ نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده خاک از منطقه رشد ریشه برنج تهیه شد. برخی از ویژگی‌های شیمیایی، حاصلخیزی و فیزیکی-هیدرولیکی اندازه‌گیری شد. سپس از بین ۱۴ ویژگی، هفت ویژگی (رس، کربن آلی، ضریب انبساط خطی، هدایت هیدرولیکی اشباع، قطر میانه ذرات، آب قابل دسترس و انرژی انتگرالی) که می‌توانند بر ظرفیت نگهداری آب در خاک موثر باشند، انتخاب شدند. با استفاده از دو آماره شاخص کارایی فازی و شاخص آنتروپی کلاس‌بندی اصلاح شده تعداد نواحی همگون مشخص شد. سپس با استفاده از مفاهیم مربوط به نقشه جبری، تلفیق لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS و نقشه‌های مربوطه تهیه گردید. نتایج نشان داد که منطقه بررسی شده به چهار ناحیه ظرفیت نگهداری آب قابل جداسازی می‌باشد. عملکرد در ناحیه یک از ۳۹۷۱ کیلوگرم بر هکتار به ۴۳۱۲ کیلوگرم بر هکتار در ناحیه چهارم روند افزایشی را نشان داد. نواحی یک و دو نسبت به نواحی سه و چهار به علت کمتر بودن مواد آلی، رطوبت قابل استفاده، میانه قطر منافذ، ضریب انبساط خطی و هدایت هیدرولیکی اشباع، دارای توانایی نگهداری آب کمتر بوده، بنابراین در هنگام بروز خشکسالی و کمبود رطوبت قابل دسترس در طول فصل رشد نواحی یک و دو دارای حساسیت ویژه‌ای خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: آنتروپی کلاس‌بندی اصلاح شده، شاخص کارایی فازی، نقشه‌های جبری، نواحی مدیریتی

مقدمه

بخش کشاورزی یکی از مهمترین مصرف‌کننده‌های اصلی آب است. به‌طورویژه گیاه برنج نسبت به دیگر محصولات کشاورزی مصرف‌کننده بزرگ آب آبیاری محسوب می‌شود. نیاز آبی گیاه برنج در استان گیلان ۹۳۸۵ مترمکعب در هکتار است (یزدانی و همکاران ۲۰۲۰) است، این درحالی‌ست که برای تولید گندم آبی به ۵۳۴۰ مترمکعب بر هکتار آب نیاز است (شاهرخ نیا و همکاران ۱۴۰۰). در سیستم تولید برنج، مقدار زیادی از آب توسط تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و نفوذعمقی از دست می‌رود. ازاین-رو کاهش آب ورودی به خاک‌های شالیزاری بدون اثرات منفی بر عملکرد برنج بسیار مهم است (ذبیح پور و همکاران، ۲۰۲۳). استراتژی‌های متعددی برای صرفه‌جویی آب^۱ در حال توسعه است (آنینگ و همکاران ۲۰۱۸، ذبیح پور و همکاران ۲۰۲۳، تانگ و بومن، ۲۰۰۳). یکی از راهبردهای صرفه‌جویی آب، مدیریت آبیاری تر و خشک^۲ (AWD) می‌باشد که می‌توان از آن به عنوان یکی از بهترین روش‌های کاهش آب ورودی نام برد (سان و همکاران ۲۰۱۲، لیو و همکاران ۲۰۱۳، کاوسی و یزدانی، ۲۰۱۳). در راهبرد AWD مزرعه غرقاب شده و سپس تا فاصله زمانی بین ۲ تا ۷ روز دوباره آبیاری (غرقاب) مزرعه انجام می‌شود. آبیاری مجدد زمانی است که نشانه‌های ظاهری ناشی از تنش خشکی در گیاه دیده شود یا زمانی که ترک-های مویی در سطح خاک ظاهر شود. طول دوره غرقاب دوباره به پتانسیل آب در خاک، تیپ و عمق آب زیرزمینی بستگی دارد (آنینگ و همکاران ۲۰۱۸). ازاین‌رو نیاز به شناخت عوامل کنترل‌کننده‌ی ذخیره‌سازی و آزادسازی آب در خاک اهمیت فراوان دارد. از میان این عوامل، ظرفیت نگهداری آب قابل دسترس^۳ (AWHC) یک ویژگی کلیدی برای کمی سازی مقدار آب قابل دسترس برای گیاهان است

که خاک توانایی نگهداری آن را دارد (بلسچک و همکاران ۲۰۱۹). اطلاع از ظرفیت ذخیره آب خاک اجازه می‌دهد تا مقدار آب مورد نیاز برای محصول تعیین و فاصله زمانی آبیاری مشخص شود (اولورائفی ۲۰۱۴). از سوی دیگر اغلب مدل‌های پیش بینی عملکرد به مدل‌های تعادلی رطوبت خاک برای تخمین آب قابل دسترس در سراسر فصل رشد نیاز دارند. ظرفیت نگهداری آب خاک یک ویژگی بسیار مهم خاک بوده که به شدت با بهره‌وری ذاتی خاک مرتبط است (سوبرت و همکاران ۱۹۸۴). مدیریت ویژه-مکان مقدار آب مورد نیاز محصولات کشاورزی می‌تواند منجر به بیشینه فایده اقتصادی، کاهش هزینه‌ها و به کمینه رسیدن آسیب-های احتمالی محیط شود (شناتو و همکاران ۲۰۱۷، بنسود و پندی ۲۰۱۳). یکی از مشکلات و موانع کشاورزی دقیق تقسیم مزرعه به نواحی همگون مدیریتی است که بر پایه ویژگی‌های فیزیکی، هیدرولیکی، شیمیایی، عناصرغذایی و محصول تعریف می‌شود (ساز و آلبرنوز ۲۰۱۶). بنابراین نقطه آغازین در کاربرد مدیریت ویژه-مکان، تعیین نواحی همگون درون منطقه مطالعه شده می‌باشد (مورال و همکاران ۲۰۱۰). استفاده از انواع لایه‌های داده که رفتار مشابهی دارند این اجازه را می‌دهد تا عوامل مختلف موثر بر محصول ادغام شده و در بهتر شدن تعیین نواحی مدیریتی مشارکت نماید (آلبرنوز و همکاران ۲۰۱۷). سیستم اطلاعات جغرافیایی^۴ (GIS) امکان جمع‌آوری و ادغام طیف وسیعی از اطلاعات منابع مختلف را فراهم می‌کند. داده‌های جغرافیایی معمولاً در یک پایگاه داده چند لایه گنجانده می‌شوند و یک سیستم مرجع مکانی را به اشتراک می‌گذارند (پاندو و همکاران ۲۰۲۲). نقشه جبری روشی برای سازماندهی و پردازش داده‌های کارتوگرافی دیجیتال در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) است.

3 . Available Water-Holding Capacity (AWHC)

4 . Geographic Information Systems

1. Water- Saving

2. Wet and Dry Irrigation Management

این ناحیه دارای خاک‌های آبرفتی، مسطح با طول جغرافیایی $41^{\circ} 20' - 41^{\circ} 33'$ و عرض جغرافیایی $38^{\circ} 40' - 40^{\circ} 14'$ قرار دارد و مساحت شالیزارهای آن نزدیک به ۱۲ هزار هکتار است (شکل ۱). میانگین بارندگی سالیانه منطقه، حدود ۱۳۵۹ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه $15/8$ درجه سلسیوس است. اقلیم آن بر پایه هر دو روش طبقه بندی دومارتن و آمبرژه، بسیار مرطوب است. همچنین طبق نقشه رژیم رطوبتی و حرارتی خاک‌های ایران (بنایی ۱۹۹۸)، خاک‌های منطقه دارای رژیم‌های رطوبتی یودیک (Udic) و رژیم حرارت مزیک (Mesic) است. بر اساس کلید رده‌بندی (سویل تاکسونومی ۲۰۰۳)، خاک‌های منطقه بیشتر در رده آلفی‌سول و این‌سپتی‌سول قرار دارند. آبیاری شالیزارهای برنج به روش غرقابی انجام می‌شود. آماده‌سازی زمین برای نشاکاری برنج هر سال بین یک هفته تا یک ماه پیش از نشاکاری در آغاز فصل بهار انجام می‌شود. ارقام کشت شده در منطقه، جمشیدی، صدری (دم‌سیاه و دم‌زرد)، طارم مولایی، علی کاظمی بوده، اما رقم غالب کشت شده هاشمی است. طول دوره رشد رقم هاشمی حدود ۱۱۰ تا ۱۲۰ روز (از تاریخ خزانة) است.

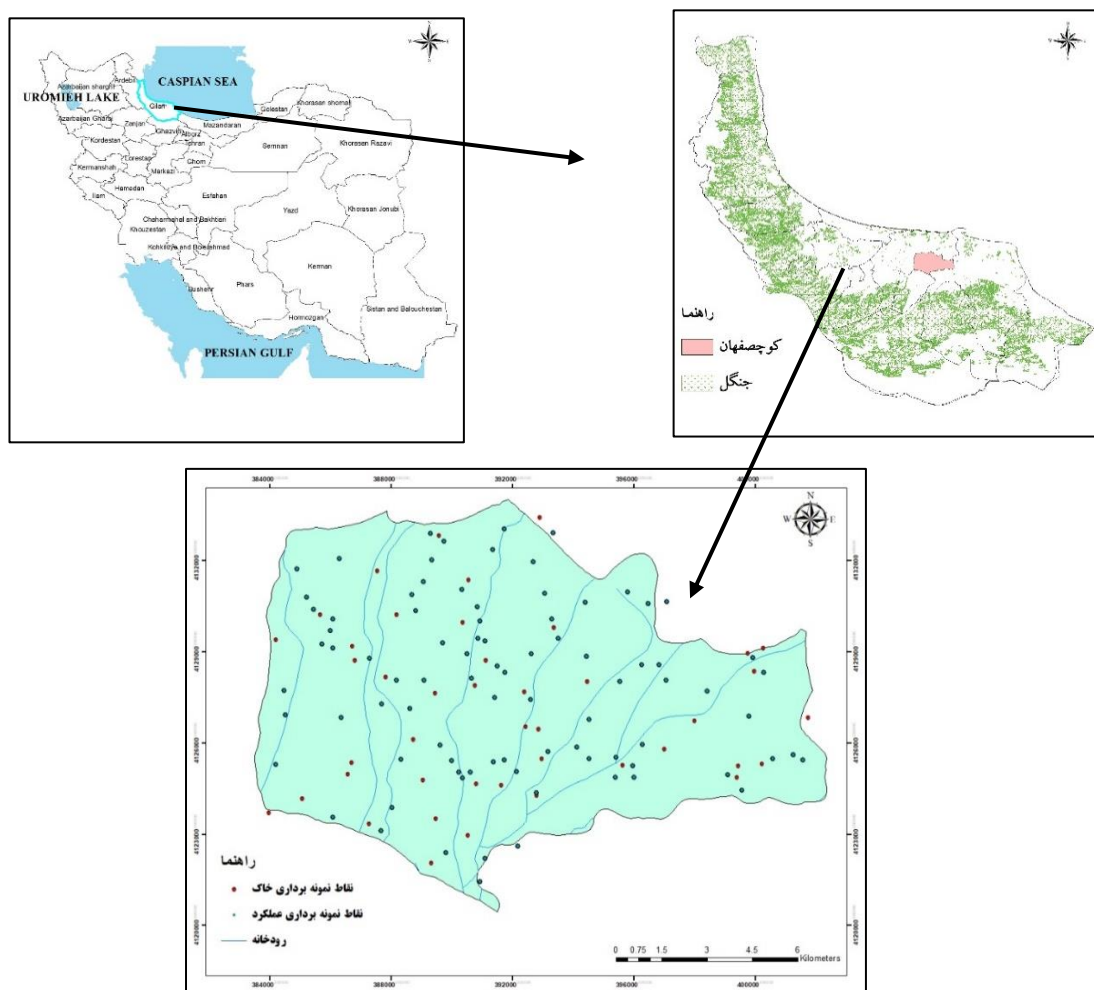
پس از تعیین محدوده اراضی شالیزاری با استفاده از گوگل ارث (Google Earth, Version Pro 4.2)، تعداد ۱۳۱ نمونه خاک دست‌خورده و دست‌نخورده خاک با توزیع جغرافیایی به نسبت یکنواخت از منطقه رشد ریشه برنج (عمق صفر تا ۲۵ سانتی‌متر) تهیه شد. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی همراه با نقاط نمونه‌برداری و نقشه شیب منطقه در شکل ۱ آمده است.

شالیزارهای استان گیلان واقع در شمال ایران با مساحتی حدود ۲۳۸۰۰۰ هکتار یکی از مهمترین مناطق کشت برنج است زیرا بیش از ۳۰ درصد برنج کشور در این منطقه تولید می‌شود. آبیاری در این منطقه به صورت غرقابی یکنواخت برای سهولت بیشتر در انتقال نشای برنج، نگهداری بهتر آب و کنترل علف‌های هرز انجام می‌شود. در سال‌های اخیر به دلیل خشکسالی، رشد جمعیت و افزایش تقاضای شهری و صنعتی برای آب و مدیریت ناکارآمد آبیاری غرقابی، سعی بر مدیریت آبیاری به صورت آبیاری تناوبی پیش رفته‌است. بنابراین تعیین نواحی همگون مدیریت ظرفیت نگهداری آب یک راه ممکن برای ارزیابی سهم خاک در ورودی بهینه آب آبیاری در مزارع شالیزاری است. زیرا با کمک آن می‌توان زمان مناسب خشک‌شدن و خیس‌شدن اراضی شالیزاری را در آبیاری متناوب مدیریت کرد. مدیریت منابع آب برای کاهش بی‌ثباتی بهره‌وری و اثرات منفی اجتماعی-اقتصادی در اولویت هستند. از این رو، این تحقیق با هدف (۱) تعیین شرایط فیزیکی-هیدرولیکی خاک‌های شالیزاری، (۲) تقسیم کل منطقه به نواحی با پتانسیل یکسان ظرفیت نگهداری آب و (۳) بررسی اثرات ظرفیت نگهداری آب بر عملکرد محصول برنج انجام شد.

مواد روشها

موقعیت منطقه‌ی مطالعه و روش نمونه‌برداری

این مطالعه در شالیزارهای بخش مرکزی استان گیلان (شهرستان کوچصفهان) واقع در شمال ایران انجام شد.



شکل ۱- شمای محدوده منطقه مطالعه شده اراضی شالیزاری شهرستان کوچصفهان همراه با نقاط نمونه برداری از خاک.

اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی-هیدرولیکی

برای بررسی وضعیت حاصلخیزی و شرایط فیزیکی خاکهای منطقه مطالعه‌شده برخی از ویژگی‌های شیمیایی (pH, EC) حاصلخیزی (نیترژن کل، فسفر و پتاسیم قابل استفاده و کربن آلی) و فیزیکی-هیدرولیکی (رس، ضریب انبساط خطی، هدایت هیدرولیکی اشباع، قطر میانه ذرات، آب قابل دسترس و انرژی انتگرالی^۱) انتخاب و اندازه‌گیری شد. به این منظور نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده تهیه گردید. از نمونه‌های دست‌نخورده برای

اندازه‌گیری جرم‌مخصوص ظاهری خشک (BD_{dry}) و جرم-مخصوص ظاهری تر (Bd_{wet})، هدایت هیدرولیکی اشباع استفاده شد. در نمونه خاک‌های دست‌خورده، ابتدا نمونه خاک کاملاً مخلوط، هواخشک و باقیمانده ریشه گیاهان خارج و خاک حاصله از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. ویژگی‌های انتخاب‌شده و روش اندازه‌گیری و محاسبه آنها در جدول ۱ نشان داده شد.

آمار توصیفی

ویژگی‌های مطالعه شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS (version 26.0) انجام شد. از آزمون کلوموگراف-اسمیرنوف ($p < 0.05$) برای بررسی نرمال بودن ویژگی‌ها استفاده شد.

آمار توصیفی (شامل حداقل، حداکثر، میانگین، میانه، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و ضریب تغییرات)

جدول ۱- روشهای اندازه گیری خصوصیات خاک در منطقه مورد مطالعه.

ویژگی	روش اندازه‌گیری	منبع
pH	گل اشباع	Page et al. (1982)
هدایت الکتریکی	عصاره اشباع	Page et al. (1982)
نیتروژن کل (TN)	کجلال	Page et al. (1982)
فسفر قابل استفاده (AP)	اولسن	Olsen et al. (1954)
پتاسیم قابل استفاده (AK)	عصاره استات آمونیوم	Chapman and Pratt, (1962)
کربن آلی (OC)	والکلی بلاک	Page et al. (1982)
توزیع اندازه ذرات	هیدرومتری	Klute (1986)
ضریب انبساط طولی (COLE)	بر اساس معادله	Parker et al. (1977)
هدایت هیدرولیکی اشباع (KS)	روش بار افتان	Booltink and Buma (2002)
رطوبت اشباع (θ_s)	آون خشک	Klute (1986)
رطوبت نقطه پژمردگی (θ_{pwp})	منحنی رطوبتی خاک	Dane and Hopmans (2002)
رطوبت قابل دسترس گیاه (PAW)	$PAW = \theta_{fc} - \theta_{pwp}$	Veihmeyer and Hendrickson (1931)
انرژی انتگرالی (EI)	بر اساس معادله	Minasny and McBratney (2003)
قطر میانه منافذ خاک (dmean)	بر اساس معادله	Reynolds et al. (2009)

$COLE = \left(\frac{BD_{dry}}{BD_{wet}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1$; BD_{dry} : dry bulk density, BD_{wet} : wet bulk density; $E_I[\theta_i - \theta_f] = \frac{1}{\theta_i - \theta_f} \int_{\theta_f}^{\theta_i} \psi(\theta) d(\theta)$; θ_i and θ_f denote the soil moisture in the upper and lower limits of PAW, $d_{median} = d_{0.5} = \frac{2980\alpha}{(0.5^{\frac{1}{m}} - 1)^{1/n}}$; $S_e = 0.5$, n و m : Dimensional parameters.

آمار مکانی

برای انتخاب بهترین مدل نظری (خطی، نمایی و کروی) بر نیم‌تغییرنمای تجربی از آماره‌های مجموع مربعات (سان و همکاران (R^2) و ضریب تبیین (RSS) باقیمانده استفاده شد. برای GS^+ (Version 5.1) (۲۰۰۳) در نرم‌افزار پهنه‌بندی ویژگی‌های خاک در مواردی که تغییرات نظام‌دار و همبستگی مکانی در بین نمونه‌ها وجود داشت از کریجینگ معمولی^۱ و در شرایط استقلال مکانی و غالب بودن تغییرات تصادفی در نمونه‌ها از روش وزن‌دهی عکس برای بازنمایی متغیرها و پهنه‌بندی از فاصله^۲ استفاده شد استفاده شد. ArcGIS 10.4 نرم‌افزار

مرحله‌ی نخست ارزیابی ساختار مکانی متغیرناحیه‌ای مدل‌سازی آن است. برای این منظور از نیم‌تغییرنما استفاده شد. در مرحله بعدی با استفاده از مولفه‌های مقدار متغیرها در نقاط نمونه‌برداری نشده برآورد شد (محمدی ۲۰۰۶). نیم‌تغییرنما ($\hat{\gamma}(h)$) میانگین مربع اختلاف بین جفت مقادیر $z(x)$ و $z(x+h)$ است که در فاصله h از یکدیگر قرار دارند (محمدی ۱۹۹۹):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad [1]$$

تعیین نواحی همگون ظرفیت نگهداری آب

-انتخاب ویژگی‌ها برای تعیین نواحی همگون

بر اساس منابع و تحقیقات انجام شده، از بین ویژگی‌های فیزیکی هیدرولیکی خاک، رس، کربن آلی (سیانفرانی و همکاران ۲۰۱۹)، ضریب انبساط خطی (رضایی و همکاران ۲۰۱۹)، هدایت هیدرولیکی اشباع (مسکینی و دواتگر ۲۰۱۹)، قطر میانه ذرات (رینولدز و همکاران ۲۰۰۹)، رطوبت قابل دسترس (بلسچک و همکاران ۲۰۱۹) و انرژی انتگرالی (میناسنی و مک برتنی ۲۰۰۳، شکوری و همکاران ۲۰۲۰) که می‌توانند بر ظرفیت نگهداری آب در خاک موثر باشند، انتخاب شد.

نرمالسازی داده‌ها

محققین متعددی روش Z-Score را برای استاندارد نمودن داده‌ها پیشنهاد نمودند (کیچن و همکاران ۲۰۰۵، شنااتو و همکاران ۲۰۱۷) با استفاده از این روش، داده‌هایی با میانگین صفر و واریانس یک به دست خواهد آمد. تبدیل داده‌ها با استفاده از رابطه زیر انجام شد:

$$Z (Z - Score) = \frac{(X - \bar{X})}{s} \quad [2]$$

که در آن X داده اصلی، $\bar{X}$ میانگین داده‌ها و s انحراف معیار است.

تعیین تعداد زون‌های همگن

از دو آماره شاخص کارایی فازی^۱ (FPI) و شاخص آنتروپی کلاس‌بندی اصلاح شده^۲ (MPE) برای تعیین تعداد بهینه ناحیه استفاده شد (آلبورنوز و همکاران ۲۰۱۷):

$$FPI = 1 - \frac{c}{(c-1)} \left[1 - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c (u_{ij})^2 / n \right] \quad [3]$$

$$MPE = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ij} \log(u_{ij}) / n}{\log c} \quad [4]$$

که در آن‌ها: c تعداد خوشه‌ها و N تعداد مجموع ویژگی‌های، u_{ij} درجه عضویت است.

FPI درجه فازی ایجاد شده بوسیله یک تعداد از خوشه‌ها را نشان می‌دهد. ارزش FPI در دامنه صفر تا یک قرار دارد. ارزش‌های نزدیک به صفر نشان‌دهنده کلاس‌هایی است که درجه اشتراک اعضاء در بین کلاس‌ها کم است؛ در حالی که ارزش‌های نزدیک به یک نشان‌دهنده کلاس‌های است که درجه اشتراک اعضاء در آنها زیاد است و در عمل مجزا از یکدیگر نیستند. شاخص MPE تخمینی از میزان ساختار گریزی ایجاد شده به وسیله یک تعداد کلاس مشخص است. تعداد بهینه خوشه‌ها برای هر یک از شاخص‌های IPF و MPE زمانی به دست می‌آید که ارزش این شاخص‌ها در حداقل باشند (فریدجن و همکاران ۲۰۰۴) که نشان‌دهنده کمترین میزان مشارکت اعضا بین کلاس‌ها و بیشترین ساختار در نتیجه فرایند خوشه‌بندی است.

ترکیب لایه‌های اطلاعاتی

با استفاده از نرم‌افزار ArcMap (version 10.4.1) و مفاهیم مربوط به نقشه جبری^۳ تلفیق لایه‌های اطلاعاتی انجام شد. نقشه جبری یک جبر ساده و قدرتمند است که با آن می‌توان تمام ابزارها، عملگرها و توابع آنالیزهای مکانی را برای انجام تحلیل جغرافیایی اجرا نمود (ESRI ۲۰۱۶)، به عبارت دیگر از طریق جبر نقشه، عملگرها و توابع ریاضی را می‌توان برای انواع مختلفی از داده‌های GIS، از جمله مجموعه داده‌های شطرنجی (مانند تصاویر ماهواره-ای)، مجموعه داده‌های برداری، جداول، ثابت‌ها یا اعداد اعمال کرد (جابر و همکاران ۲۰۱۱).

نتایج و بحث

آمار توصیفی

نیتروژن کل خاک‌ها در دامنه ۰/۰۷ تا ۰/۵۶ و میانگین ۰/۲۲ درصد قرار دارد. نیتروژن در تمامی عوامل موثر در

و در نهایت منجر به رفع نیاز گیاه برنج به ماده غذایی گردد (بابازاده و همکاران ۲۰۲۱).

کمترین کربن آلی در منطقه ۰/۷۴، بیشترین ۵/۷۲ و میانگین آن ۲/۲۵ درصد بود. کربن آلی ویژگی مهمی است که بر حاصلخیزی خاک (نقش کلیدی در نگهداری و آزادسازی عناصر غذایی) و خصوصیات فیزیکی خاک (بهبود ساختمان خاک، تخلخل، نگهداری آب) تأثیر انکار ناپذیر دارد.

میانگین مقدار رس در خاک‌های مطالعه شده ۴۴/۳ درصد بود. رس یک عامل تاثیرگذار بر بسیاری از ویژگی‌های شیمیایی، فیزیکی و هیدرولیکی خاک می‌باشد. با توجه به درصد بیشتر رس و نوع انبساط‌پذیر آن (اسمکتیت و ورمی کولیت) (دوات‌گر و همکاران ۲۰۰۶) جذب آب در شرایط اشباع افزایش می‌یابد. در خاک‌های مطالعه شده، ضریب انبساط خطی (COLE) بین ۰/۰۹ تا ۰/۲۴ متغیر بود. پتانسیل انقباض و انبساط تحت‌تأثیر مقدار و نوع رس است. زیاد بودن درصد رس (با میانگین ۴۴ درصد) و غالب بودن کانی‌های اسمکتیت با خاصیت انبساط‌پذیری زیاد می‌تواند از دلایل اصلی بالا بودن این ضریب باشد. تسیر و پدرو (۱۹۸۰) افزایش گنجایش انبساط و انقباض در خاک‌های غنی از اسمکتیت را به انباشت موازی ذرات رس نسبت به انباشت غیرموازی در خاک‌های غنی از کانی‌های غیر-انبساط‌پذیر می‌دانند. این در حالی است که دیاموند (۱۹۷۰) افزایش گنجایش انقباض در خاک‌های غنی از اسمکتیت را به وجود منافذ کوچک‌تر و تخلخل بیشتر نسبت می‌دهد.

عملکرد مانند تعداد خوشه، سطح برگ، دانه و پروتئین نقش بارزی دارد. میانگین فسفر قابل‌استفاده ۱۲/۶۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم و دامنه تغییرات آن بین ۲/۸ تا ۴۱/۷۰ میلی‌گرم در کیلوگرم بود (جدول ۲). تفاوت بین میانگین (۱۲/۶۷) و میانه (۹/۸) فسفر قابل استفاده نشان می‌دهد که برخی داده‌های کرانه‌ای منجر به افزایش میانگین داده‌ها شده در حالی که ۵۰ درصد داده‌ها کمتر از ۹/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم (میانه) بودند. وجود تنها ۱۴ نمونه خاک با فسفر قابل-استفاده بیشتر از ۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم سبب افزایش میانگین شده است. در واقع با حذف این نمونه‌های استثنایی وضعیت نامطلوب فسفر قابل استفاده و کمبود بیشتر معلوم می‌شود. دبرمن و فایرهاست (۲۰۰۰) غلظت بحرانی فسفر قابل‌استفاده را برای گیاه برنج ۱۲ میلی‌گرم بر کیلوگرم اعلام نمودند. با توجه به این نزدیک به ۶۵ درصد از نمونه-های خاک در محدوده‌ی کمبود فسفر قرار دارد. میانگین پتاسیم قابل‌استفاده ۲۵۸/۱ میلی‌گرم در کیلوگرم خاک بود. تنها حدود چهار درصد از نقاط نمونه‌برداری شده دارای پتاسیم کمتر از حد بحرانی، ۱۶۰ میلی‌گرم بر کیلوگرم (کاووسی و کلباسی ۱۳۷۸) بودند. مهمترین منبع آب آبیاری خاک‌های شالیزاری منطقه مطالعه شده، رودخانه سپیدرود بوده که دامنه غلظت پتاسیم در آب این رودخانه بین ۲/۷ تا ۴/۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد (دوات‌گر و همکاران ۱۹۹۹). با توجه به نیاز آبی برنج در استان گیلان (۹۳۸۵ متر مکعب در لیتر (یزدانی و همکاران ۲۰۲۰) انتظار می‌رود در طول فصل رشد حدود ۳۶ کیلوگرم پتاسیم در هکتار از طریق آب آبیاری به شالیزارهای منطقه وارد شده

جدول ۲- آمار توصیفی برخی ویژگیهای شیمیایی، حاصلخیزی، فیزیکی و هیدرولیکی خاکهای مطالعه شده.

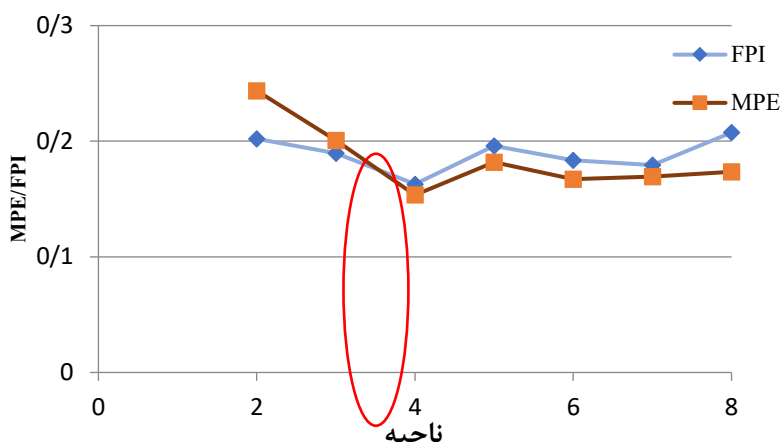
ویژگیهای مورد بررسی	واحد	میانگین	میان	انحراف معیار	چولگی	کشیدگی	کمترین	بیشترین	CV	K-S	نوع توزیع
هدایت الکتریکی	dS m^{-1}	۱/۴۲	۱/۳۵	۰/۷۶	۰/۸۷	۱/۰۴	۰/۶۱	۲/۷۷	۳۰	۰/۳۰۲	نرمال
pH	-	۷/۱۹	۷/۲۰	۰/۱۹	-۱/۰۱	۳/۵۸	۶/۳۳	۷/۶۰	۳	۰/۱۲	نرمال
نیترژن	%	۰/۲۲	۰/۲۰	۰/۰۹	۱/۱	۱/۳۲	۰/۰۷	۰/۵۶	۳۹	۰/۱۲	نرمال
فسفر قابل استفاده	mg kg^{-1}	۱۲/۶۷	۹/۸	۸/۵۲	۱/۷	۲/۶۱	۲/۸۰	۴۱/۷۰	۶۷	۱/۴**	غیر نرمال
پتاسیم قابل استفاده	mg kg^{-1}	۲۵۸/۱	۲۵۸	۳۰۱/۴	-۰/۲۲	-۰/۰۲۴	۹۴/۸۰	۳۹۰/۰	۲۱	۰/۷۶	نرمال
کربن آلی	%	۲/۲۵	۲/۱	۰/۹۱	۱/۱۰	۱/۲۹	۰/۷۴	۵/۷۲	۳۹	۰/۹۴**	غیر نرمال
Clay	%	۴۴/۳	۴۵/۰	۸/۳	-۰/۵۷	-۰/۱۱	۲۰/۰	۶۰/۰	۱۸/۶	۰/۹۵	نرمال
θ_s	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	-۰/۶۲	۰/۶۱	۵/۲	-۱/۰	۱/۷	۰/۵۰	۰/۸۱	۸/۴	۲/۸**	غیر نرمال
θ_{pwp}	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	-۰/۲۶	۰/۲۶	۲/۵	-۰/۰۸	۲/۹	۰/۱۸	۰/۳۷	۹/۴	۰/۸	نرمال
PAW	$\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$	۳۵/۱	۳۴/۳	۴/۴	۱/۵	۲/۶	۲۷/۵	۵۱/۹	۱۲/۵	۱/۸**	غیر نرمال
K_s	cm day^{-1}	-۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۵۱	۵/۷	۳۶/۵	۰/۰۶	۳/۹۱	۱۸۲/۱	۳/۷**	غیر نرمال
E_i	J kg^{-1}	۱۳۵/۱	۱۳۲/۷	۲۰/۸	۵/۷	۳۶/۹	۱۱۶/۴	۲۷۹/۲	۱۵/۴	۳/۵**	غیر نرمال
COLE	-	-۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۰۲	-۰/۲۲	۲/۴	۰/۰۹	۰/۲۴	۱۱/۸	۱/۱	نرمال
d_{median}	μm	۴/۴۱	۴/۴۷	۰/۶۴	-۲/۲۴	۸/۸۰	۱/۲۹	۵/۵۱	۱۴/۵	۶/۰۶**	غیر نرمال

برای گیاه در محدوده رطوبت قابل استفاده خاک را نشان می‌دهد (میناسنی و مک برتنی ۲۰۰۳).

تعیین تعداد بهینه نواحی همگون مدیریتی

شکل ۲ دو تابع FPI و MPE در هر ناحیه را نشان می‌دهد. تعداد بهینه نواحی همگون زمانی که دو تابع FPI و MPE به حداقل مقدار خود رسیدند، به دست می‌آید (فریجن و همکاران ۲۰۰۴). در مطالعه حاضر، هر دو تابع FPI و MPE با چهار ناحیه در کمترین مقدار خود قرار دارند. بنابراین منطقه مطالعه شده به چهار ناحیه همگون مدیریتی تقسیم شد. راب و همکاران (۲۰۰۹) نیز بیان نمودند می‌توان مناطق را به تعداد زیادی نواحی همگون تقسیم نمود، اما تعداد نواحی همگون برای تامین نیازهای عملی برای یک زراعت کارآمد به سه یا چهار ناحیه محدود شد.

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از مهمترین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های شالیزاری است که در تعیین سرعت نفوذ، مقدار نفوذ عمقی، طراحی زهکش‌ها و دیگر فرآیندهای هیدرولوژیکی مؤثر است (مسکینی و همکاران ۲۰۱۰). حدود تغییرات هدایت هیدرولیکی در خاک‌های مطالعه شده بین ۰/۰۶ تا ۳/۹۱ سانتی‌متر در روز متغیر بود. این تغییرات می‌تواند تحت‌تاثیر عوامل مختلفی مانند مواد آلی (نمس و همکاران ۲۰۰۲)، تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ و هندسه منافذ، رطوبت ظرفیت مزرعه و میانگین هندسی قطر ذرات (مسکینی و همکاران ۲۰۱۰) باشد. میانگین انرژی انتگرالی در نمونه‌های مطالعه شده ۱۳۵/۱ ژول بر کیلوگرم بود. کمترین انرژی لازم برای جذب یک کیلوگرم آب مصرفی در طول رشد برنج ۱۱۶/۴ و بیشترین آن ۲۸۰ ژول بر کیلوگرم بود. انرژی انتگرالی چگونگی سهولت آسانی آب خاک



شکل ۲- نمودارهای شاخص کارایی فازی (FPI) و شاخص آنتروپی کلاس بندی اصلاح شده (MPE) در برابر تعداد خوشه.

کربن آلی، COLE، انرژی انتگرالی و هدایت هیدرولیکی در چهار ناحیه مدیریتی دیده شد اما در مقدار رس و میانگین قطر میانه منافذ اختلاف معنی دار دیده نشد. در ناحیه یک آب قابل دسترس، کربن آلی، ضریب انبساط، میانگین منافذ و هدایت هیدرولیکی کمترین مقدار را نشان داد، اما در ناحیه چهارم تمامی این ویژگی ها رفتار عکس دارند. این نتایج نشان می دهد که ناحیه یک، حداقل ظرفیت نگهداشت و ناحیه چهار حداکثر ظرفیت نگهداشت آب را دارد.

با استفاده از مفاهیم نقشه جبری تلفیق لایه های اطلاعاتی شامل رس، کربن آلی، ضریب انبساط خطی، هدایت هیدرولیکی اشباع، قطر میانه ذرات، آب قابل دسترس و انرژی انتگرالی انجام شد. برای هر ویژگی شاخص وزن نیاز است که از ضریب تغییرات ویژگی ها استفاده گردید. نتایج جدول ۳ میانگین ویژگی های خاک در چهار ناحیه مدیریتی ظرفیت نگهداری آب را نشان می دهد. کمترین و بیشترین مقدار میانگین عملکرد به ترتیب در ناحیه یک و چهار به دست آمد. اختلاف معنی دار بین آب قابل دسترس،

جدول ۳- میانگین برخی ویژگی های خاک و عملکرد در چهار ناحیه مدیریتی.

ناحیه مدیریتی	عملکرد (ton ha ⁻¹)	رس (%)	کربن آلی (%)	آب قابل استفاده (cm ³ cm ⁻³)	ضریب انبساط خطی -	انرژی انتگرالی (J kg ⁻¹)	میانه قطر منافذ (μm)	هدایت هیدرولیکی اشباع cm day ⁻¹
ناحیه ۱	۳۹۷۱ ^a	۴۴/۴۹ ^a	۱/۷۵ ^a	۳۳/۰ ^a	۰/۱۵ ^a	۱۳۴/۲۳ ^a	۴/۳۴ ^a	۰/۱۴ ^a
ناحیه ۲	۴۲۳۱/۲ ^{ab}	۴۴/۱۰ ^a	۲/۴۲ ^b	۳۴/۷۸ ^b	۰/۱۷ ^b	۱۳۱/۶۴ ^{ab}	۴/۴۰ ^a	۰/۱۸ ^b
ناحیه ۳	۴۲۲۰/۶۳ ^b	۴۳/۴۳ ^a	۳/۰۱ ^c	۳۷/۲۰ ^c	۰/۱۸ ^c	۱۳۰/۴۲ ^{ab}	۴/۵۹ ^a	۰/۱۹ ^b
ناحیه ۴	۴۳۱۲/۴۲ ^b	۴۲/۸۸ ^a	۳/۵۵ ^c	۴۴/۳۱ ^d	۰/۲۰ ^d	۱۲۸/۲۸ ^b	۴/۶۶ ^a	۰/۷۴ ^c

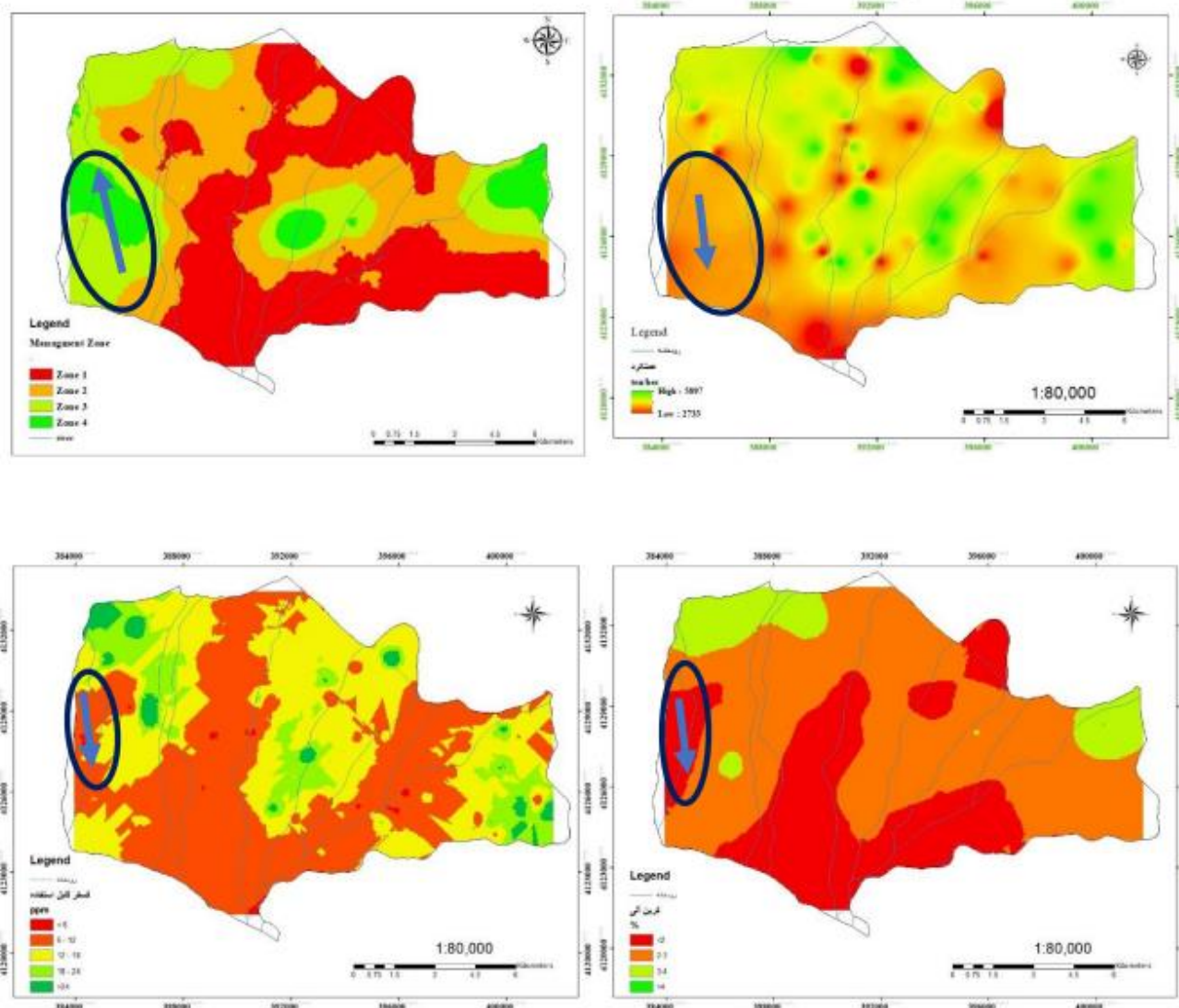
درصد به ۴۴ درصد حجمی می رسد. از این رو در کنار رس زیاد، افزایش کربن آلی با سطح ویژه زیاد می تواند در حفظ و نگهداری رطوبت کمک نماید. مواد آلی نیز به دلیل سطح ویژه بالا توانایی به جذب آب در خاک را دارد (بوردولویی

کل خاک های مطالعه شده دارای مقدار رس بیشتری بودند (میانگین ۴۴ درصد) و در چهار ناحیه همگون مدیریتی اختلاف معنی دار ندارد، از ناحیه یک مدیریتی به سمت ناحیه چهار، با افزایش مواد آلی رطوبت قابل دسترس از ۳۳

و همکاران ۲۰۱۸). موریس (۲۰۰۴) گزارش نمود که افزایش یک درصد هوموس منجر به افزایش چهار درصد در ذخیره‌ی آب خاک می‌شود. از این رو تجمع بیشتر مواد آلی در خاک ظرفیت نگهداری آب را نیز افزایش می‌دهد. ضریب انبساط طولی به عنوان معیاری از پتانسیل انبساط خاک در ناحیه چهارم به بیشترین مقدار خود رسیده است. رس ریز به دلیل آبرفتی بودن خاک‌های شالیزاری استان گیلان بسیار زیاد است (ترابی گلسفیدی ۲۰۰۱) و غالب بودن رس‌های اسمکیتی با ظرفیت کاتیونی و سطح ویژه بالا (دواتگر و همکاران ۲۰۰۵) منجر به انبساط خاک در هنگام جذب رطوبت شده و در نهایت ظرفیت بالایی برای انبساط در آنها دیده می‌شود (رضایی و همکاران ۲۰۱۹). هر چه مقدار ضریب انبساط خطی بیشتر باشد، ظرفیت خاک برای منبسط شدن نیز بیشتر است، و رطوبت بیشتری جذب می‌گیرد. در نتیجه گیاه رطوبت بیشتری در اختیار خواهد داشت. بنابراین ناحیه یک نسبت به ناحیه چهار به علت کمتر

بودن مواد آلی، رطوبت قابل استفاده، میانه قطر منافذ، ضریب انبساط خطی و هدایت هیدرولیکی اشباع، دارای توانایی نگهداری آب کمتر بوده و انرژی لازم برای دستیابی به آب توسط گیاه افزایش می‌یابد. در هنگام بروز خشکسالی و کمبود رطوبت قابل دسترس در طول فصل رشد ناحیه یک و دو دارای حساسیت ویژه‌ای خواهد بود. در این نواحی لازم است دور آبیاری (فاصله زمانی آبیاری) نسبت به دو ناحیه دیگر کوتاه تر باشد، تا از وقوع تنش خشکی اجتناب شود.

خاک‌های ناحیه مطالعه شده از نظر نگهداری آب غیریکنواخت بودند. این نتایج نشان داد مدیریت یکنواخت (ثابت) مصرف نهاده‌های آب، علاوه بر افزایش هزینه‌ها می‌تواند منجر به هدررفت مقدار زیادی آب نیز گردد. در این شرایط مدیریت آبیاری ویژه مکان می‌تواند در تولید پایدار اقتصادی کارآمدتر باشند.



شکل ۳- نقشه توزیع مکانی نواحی مدیریتی ظرفیت نگهداری آب در منطقه بررسی شده.

نتیجه گیری کلی

نقشه توزیع مکانی نواحی مدیریتی ظرفیت نگهداری آب و عملکرد محصول برنج در شکل ۳ نشان داده شد. مقایسه نقشه تخمین مناطق همگون ظرفیت نگهداری آب و عملکرد نشان از مطابقت آنها در برخی مناطق می‌دهد. البته در برخی مناطق نیز با وجود مناسب بودن شرایط خاک از نظر شرایط رطوبتی، عملکرد در شرایط بهینه قرار ندارد (غرب و جنوب غربی). تنها وجود آب در دسترس کافی نیست.

بررسی نقشه‌های تخمین فسفر و کربن آلی به عنوان دو فاکتور مهم حاصلخیزی نشان می‌دهد، با وجود شرایط مناسب ویژگی‌های فیزیکی-هیدرولیکی خاک، دستیابی به عملکرد بالا امکان‌پذیر نمی‌باشد. به نظر می‌رسد تا زمانی که وضعیت حاصلخیزی و موادغذایی کافی در اختیار گیاه نباشد، شرایط فیزیکی نمی‌تواند اثرات خود را در عملکرد به خوبی نشان دهد. رضائی و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی

کیفیت خاکهای شالیزاری در دشت فومنات نیز نتایج مشابهی را گزارش نمودند.

کاهش آب ورودی به خاکهای شالیزاری بدون اثرات منفی بر عملکرد برنج بسیار مهم است. استراتژی‌های متعددی برای صرفه‌جویی آب در حال توسعه است و شناخت عوامل کنترل‌کننده‌ی ذخیره‌سازی و آزادسازی آب در خاک اهمیت فراوان دارد. در این میان آگاهی از ظرفیت نگهداری آب قابل دسترس نقش مهمی دارد و تعیین نواحی همگون مدیریت ظرفیت نگهداری آب یک راه ممکن برای ارزیابی سهم خاک در ورودی بهینه آب آبیاری در مزارع شالیزاری است. زیرا با کمک آن می‌توان زمان مناسب خشک‌شدن و خیس‌شدن اراضی شالیزاری را در آبیاری متناوب مدیریت کرد. خاک‌های ناحیه مطالعه شده از نظر نگهداری آب غیریکنواخت بودند. با استفاده از مفاهیم مدیریت همگون منطقه بررسی‌شده به چهار ناحیه از نظر

منابع مورد استفاده

- Albornoz EM, Kemmerer AC, Galarza R, Mastaglia N, Melchiori R and Martinez CE, 2017. Development and evaluation of an automatic software for management zone delineation. Precision Agriculture DOI 10.1007/s11119-017-9530-9.
- Anning DK, Ofori J and Narh S, 2018. Effect of irrigation management methods on growth, grain yield and water productivity of three lowland rice (*Oryza sativa* L.) varieties. West African Journal of Applied Ecology 26 (2): 93–104
- Babazadeh Jafari S, Faizian M and Davatgar N, 2021. Grading of soil fertility quality profile based on rice yield in paddy fields of Kouchesfahan district of Guilan province. Scientific Journal of Soil Research. 35(3):253-269(In Persian with English abstract)
- Bansod BS and Pandey OP, 2013. An application of PCA and fuzzy C-Means to delineate management zones and variability analysis of soil. Eurasian Soil Science 46: 556-564.
- Blaschek M, Roudier P, Poggio M and Hedley C, 2019. Prediction of soil available water holding capacity from visible near infrared reflectance spectra. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49226-6>.
- Booltink HWG and Buma J, 2002. Steady flow soil column method. Pp. 812- 814. In Dane JH and Clake GC (Eds.), Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods, Soil Science Society of America Book Series, Madison, Wisconsin, USA.
- Chapman HD and Pratt PF, 1962. Methods of analysis for soils, plants and waters. Soil Science 93: 68.
- Chiang S, 2005. Water Management for Paddy Rice Production and the Environment. Pp. 110-118.
- Davatgar N, Kavossi M, Yazdani MR, Rezaei M, Shakouri Katigari M, Rezaei L, Roudpeima M, Peykan M, Ahmadzadeh S, Kashtkar F and Attar A, 2015. Identification and evaluation of pollutant sources and water quality in the first phase of the central plain of Guilan). Final report of the project. surface GIS of Guilan plain agriculture using the research system. National Rice Research Institute. (In Persian)

ظرفیت نگهداری آب تفکیک شد. این نتایج نشان داد مدیریت یکنواخت (ثابت) مصرف نهاده‌های آب، علاوه بر افزایش هزینه‌ها می‌تواند منجر به هدررفت مقدار زیادی آب نیز گردد. ناحیه یک و دو دارای حساسیت ویژه‌ای (در هنگام بروز کمبود رطوبت قابل‌دسترس) در طول فصل رشد داشته و در این نواحی لازم است فاصله زمانی آبیاری نسبت به دو ناحیه دیگر کوتاه‌تر باشد، تا از وقوع تنش خشکی اجتناب شود. مقایسه نقشه تخمین مناطق همگون ظرفیت نگهداری آب و عملکرد نشان می‌دهد که تنها وجود آب در دسترس کافی به عملکرد قابل قبول منتهی نمی‌شود. با توجه به نقشه‌های ویژگی‌های حاصلخیزی به نظر می‌رسد تا زمانی که وضعیت حاصلخیزی و موادغذایی مناسب نباشد، شرایط فیزیکی نمی‌تواند اثرات خود را در عملکرد به خوبی نشان دهد.

- Davatgar N, Kavossi M, Alinia MH and Paykan M, 2005. Study of potassium status and physical and chemical properties of soil in paddy field of Guilan province. *Journal of Agricultural Science and Technology* 40: 71-89.
- Diamond S, 1970. Pore size distribution in clays. *Clays Clay Minerals* 18:7-23.
- Ditzler CA and Tuggle AJ, 2002. Soil quality field tools of USDANRCS soil quality institute. *Agronomy Journal* 94: 33-38.
- Doberman A and Fairhurst TH, 2000. Rice: Nutrient disorders and nutrient management. *International Rice Research Institute Philippines* 436p.
- ESRI, 2016. ArcGIS Desktop Help (Redlands, CA: ESRI, Inc.).
- Fridgen JI, Kitchen NR, Sudduth KA, Drummond ST, Wiebold WJ and Fraisse CW, 2004. Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal* 46:100-108.
- Kitchen NR, Drummond ST, Lund ED, Sudduth K and Buchleiter KA, 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal* 95:483-495.
- Kitchen NR, Sudduth KA, Myers DB, Drummond ST and Hong SY, 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 285-308.
- Liu L, Chen T, Wang Z, Zhang H, Yang J and Zhang J, 2013. Field Crops Research Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice. *Field Crops Research* 154: 226-235.
- Meskini F, Shabanpour M and Davatgar N, 2011. Path analysis of effective soil properties on paddy soil saturated hydraulic conductivity. *Journal Water and Soil* 24:1246-1253.(In Persian with English abstract)
- Minasny B and McBratney AB, 2003. Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil* 249: 253-262.
- Mohammadi J, 2007. *Pedometry (Theory of Fuzzy Systems - Volume IV)*. Palak Publications. 432p. (In Persian)
- Moral FJ, Tern JM and Marques DaSilva JR, 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Tillage Research* 106:335-343.
- Olorunfemi IE, 2014. Occurrence, causes, and impacts of hydrophobicity on soils of different land uses in Ekiti State. (M.Sc. Thesis). Federal University of Technology, Akure, Nigeria.
- Olsen SR, Cole CV, Watanabe FS and Dean LA, 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Circular (US Department of Agriculture), United States: Washington, D.C.
- Page AL, Miller RH and Keeney DR, 1982. *Methods of Soil Analysis. Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin, USA.
- Reynolds WD, Drury CF, Tan CS, Fox CA and Yang XM, 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152:252-263.
- Rezaee L, Moosavi AA, Davatgar N and Sepaskhah AR, 2019. Shrinkage/swelling characteristics and plasticity indices of paddy soils: spatial variability and their influential parameters. *Archives of Agronomy and Soil Science*. <https://doi.org/10.1080/03650340.2019.1706169>.
- Rezaee L, Davatgar N, Moosavi AA and Sepaskhah AR, 2020. Soil quality indices of paddy soils in Guilan province of northern Iran: Spatial variability and their influential parameters. *Ecological Indicators* 117: 106566.
- Saez J and Alborno VM, 2016. Delineation of rectangular management zones under uncertainty conditions. *ICORES 2016 Pp. 271-278*.-5th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems.
- Salahuddin MJ, Christopher L, Mohammed I and Al-Qinna B, 2011. Estimating spatial variations in soil organic carbon using satellite hyperspectral data and map algebra. *International Journal of Remote Sensing* 32(18): 5077-5103.
- Shahrokhnia MA, Eslami A and Baghani J, 2022. Investigation of applied water and water productivity of wheat fields in Fars province. *Water Resources Engineering Journal* 15(52): 114-128.

- Schenatto K, Godoy D, Souza E, Bazzi CL and Gavioli A, 2017. Normalization of data for delineating management zones. *Computers and Electronics in Agriculture* 143:238-248.
- Shakouri M, Shabanpour M, Davatgar N and Vazifiedoust M, 2022. Evaluation of spatial variability of the integral energy of plant available water and its influential properties in paddy soil. *Paddy Water Environ* 20: 265–276.
- Sun Y, Ma J, Sun Y, Xu H, Yang Z, ... and Zheng H, 2012. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China. *Field Crops Research* 127: 85- 98.
- Tessier D and Pedro G, 1980. Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. (In French) *CR Academic Science* 291: 461-467.
- Torabi Golsefidi H, 2001. Genesis, classification and land suitability evaluation of wetland soils for irrigated rice in eastern Guilan province (Doctoral dissertation, Isfahan Technology University, Isfahan, Iran).
- Tuong TP, Bouman BAM and Mortimer M, 2005. More rice, less water integrated approaches for increasing water productivity in irrigated rice-based systems in Asia. *Plant Production Science* 8:231–24
- Yazdani MR, Asadi R and Arab Zadeh B, 2019. Determining the water consumption of rice in Guilan and Mazandaran provinces. Final report of the research project. National Rice Research Institute. (In Persian)
- Zabihpour MR, Bagheri A, Asadi R, Akbari D and Shirdel Shahmiri F, 2023. Growth, grain yield, and water productivity of different rice varieties in response to irrigation management techniques. *Water Supply* 23 (3): 1208–1219.