بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان البرز

رسول میرخانی[1*]، لیلا اسماعیل‌نژاد[1]، حامد رضایی[1]

۱- موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

*مسئول مکاتبه، رایانامه: Rasoul_mirkhani@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸

DOI: 10.30470/jsp.2026.2095695.1038

چکیده

آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی کیفیت خاک در کشاورزی برای مدیریت بهینه اراضی و دستیابی به بیشترین بهره‌وری اقتصادی ضروری است. در این مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) در ۲۳ مزرعه در کشتزارهای استان البرز در دو بازه زمانی ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ تعیین شد و ضمن آگاهی از وضعیت کیفیت خاک منطقه، تغییرات آن در بازه زمانی ۱۳ ساله ارزیابی شد. تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای انتخاب داده‌های مؤثر بر کیفیت خاک مورد استفاده قرار گرفت و شاخص کیفیت تجمعی وزنی (IQI_w) و ساده (IQI_a) و نیز شاخص کیفیت نمورو (NQI) با استفاده از کل ویژگی‌های خاک و حداقل ویژگی‌های انتخاب شده تعیین شدند. برای پهنه‌بندی توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک از روش کریجینگ معمولی استفاده شد. نتایج نشان داد که بین مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک (بین IQI_w ، IQI_a و NQI) که بر مبنای حداقل ویژگی‌ها و یا کل ویژگی‌های خاک به‌دست آمده‌اند، همبستگی معنی‌دار ($p<۰/۰۱$) بود. با توجه به نتایج میانگین کیفیت خاک در کل استان البرز اختلاف معنی‌داری نداشت، ولی مقایسه منطقه‌ای نشان داد که تغییرات کیفیت خاک در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال ۱۳۹۰ در برخی نقاط افزایشی و در برخی نقاط کاهشی بود. مقایسه مکانی نقشه‌های شاخص کیفیت خاک در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ نشان داد که روند تغیرات کیفیت خاک از شرق به غرب روند کاهشی داشت و عمدتاً در بخش‌های شمال‌غربی و بخش‌هایی از نواحی مرکزی کیفیت خاک روند افزایشی داشت، در حالی که غرب و جنوب‌غربی استان (جنوب نظر آباد و اشتهارد) کاهش محسوس کیفیت خاک را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پایش زمانی، شاخص کیفیت خاک، نمورو

Study of spatial and temporal changes in soil quality in agricultural lands of Alborz province

R. Mirkhani[1*], L. Esmaeelnejad[1], H. Rezaei[1]

1. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Alborz, Iran.
*Corresponding Author, Email: Rasoul_mirkhani@yahoo.com
Received: Julay 2025 Accepted: August 2026
DOI: 10.30470/jsp.2026.2095695.1038

Extended Abstract

Aim
Soil quality represents the capacity of soil to function within managed ecosystems to sustain plant productivity, maintain environmental quality, and support human health. As defined by foundational researchers, continuous monitoring is an absolute prerequisite for implementing sustainable land management and achieving optimal economic productivity without degrading natural resources. Various mathematical frameworks quantify soil quality by converting complex physico-chemical properties into integrated composite indices, notably the Nemoro Quality Index (NQI), Simple Additive Quality Index (IQIa), and Weighted Additive Quality Index (IQIw). Assessing soil quality traditionally requires a comprehensive Total Data Set (TDS), which demands extensive laboratory labor, significant financial resources, and often yields redundant data. To address this, the Minimum Data Set (MDS) approach utilizes Principal Component Analysis (PCA) to extract a highly representative, cost-effective subset of soil properties.Despite extensive literature on the spatial distribution of soil quality globally, comprehensive studies investigating temporal dynamics over long-term agricultural cycles remain critically scarce in the arid and semi-arid regions of Iran. Spatiotemporal monitoring is indispensable for identifying emerging hotspots of soil degradation such as salinization, sodification, and structural decline before they induce irreversible agronomic losses. Consequently, this study aimed to meticulously evaluate the spatial and temporal evolution of soil quality across agricultural lands in Alborz Province over a 13-year period (2011 to 2024), employing both TDS and MDS methodologies to map changes and identify primary drivers of degradation.

Materials and Methods
The research was conducted within the agricultural landscapes of Alborz Province, located in the central agroecological zone of Iran. The study area features an arid and semi-arid climate with a mean annual precipitation of 238 mm and an average temperature of 14.2 °C. To capture spatial heterogeneity and temporal evolution, topsoil samples (0–30 cm depth) were collected from 23 long-standing farms during two sampling epochs: 2011 and 2024. A robust array of 15 physical and chemical properties was analyzed. Physical analyses encompassed particle size distribution (sand, silt, and clay percentages) and bulk density (Bd). Chemical characterizations included electrical conductivity (EC), soil reaction (pH), soil organic carbon (OC), calcium carbonate equivalent (TNV), available phosphorus (P), available potassium (K), Sodium Adsorption Ratio (SAR), and available micronutrients (Fe, Cu, Mn, Zn, B).To construct the MDS, PCA was executed using statistical software. The Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) measure and Bartlett's test confirmed dataset validity for factor analysis. Principal components (PCs) exhibiting eigenvalues greater than 1.0 were retained. Within these PCs, the indicator with the highest absolute loading factor, alongside indicators within 10% of this maximum, were selected to constitute the final MDS. Selected properties were standardized into dimensionless utility scores (ranging from 0 to 1) employing non-linear fuzzy membership logic. Three functions were utilized: "More is better" for properties beneficial to growth (OC, P, K, Fe, Mn, Cu, Zn); "Less is better" for detrimental properties (Bd, EC, TNV, SAR, B); and "Optimum range" for balanced parameters (pH, sand, silt, clay). Communality values generated by PCA were transformed into proportional weighting factors. Ultimately, integrated soil quality was quantified using IQIw, IQIa, and NQI models computed for both MDS and TDS. Geospatial distribution and temporal flux of these indices were mapped utilizing Ordinary Kriging interpolation within a Geographic Information System (GIS) environment.

Results
Descriptive statistics revealed that the agricultural soils predominantly featured loam and clay-loam textures, averaging 25% clay, 39% silt, and 36% sand. The chemical environment was slightly alkaline, with a mean pH around 8.36. Regional soils did not exhibit critical restrictions concerning extreme salinity, severe sodicity, or micronutrient deficiencies that

would hinder dominant crops like wheat and corn. Nevertheless, the region is constrained by inferior structural stability stemming from a severe organic carbon deficiency, averaging merely 0.67% in 2011 and 0.77% in 2024. Temporal variance analysis demonstrated that most soil properties remained statistically stable over the 13-year interval, with the exclusive exceptions of pH, available zinc, and copper, which showed significant alterations.PCA dimensionality reduction was highly effective (KMO = 0.763, Bartlett's test $p < 0.001$). Three principal components possessed eigenvalues greater than unity (2.868, 1.288, and 1.02), explaining 73.96% of the cumulative variance. In the primary component, OC exhibited the highest loading factor (0.842), followed by available K (0.820) and P (0.774). Bulk density dominated the second component (loading 0.831), and EC dictated the third component (loading 0.901). Thus, OC, K, P, Bd, and EC were isolated as definitive MDS variables. Weighting scores highlighted that physical soil properties universally received lower relative weights compared to chemical properties, underscoring primary physical limitations within the region.Calculations of the comprehensive indices demonstrated wide spatial heterogeneity. Median scores of the IQIw, IQIa, and NQI algorithms placed over 50% of the sampled territory into the "Very High" (Grade I) classification. Statistical comparisons of the grand mean soil quality index for Alborz Province revealed no significant overarching change from 2011 to 2024. Furthermore, exceptional positive correlations ($p < 0.01$) between TDS and MDS indices proved that the simplified dataset is a reliable, robust surrogate for regional soil quality estimations.

Conclusion

Although the aggregate mean soil quality for Alborz Province appeared statistically static across the 13-year timeline, spatially explicit geostatistical mapping uncovered profound, localized temporal transformations. Chronological comparison of kriged index maps from 2011 and 2024 demonstrated that spatial evolution was highly non-uniform. A generally positive trajectory, indicating relative enhancement, was detected across the western, northwestern, and select central sectors of the province.Conversely, spatial interpolation models exposed a continuous corridor of soil degradation extending toward the western and southwestern peripheries. The southwestern agricultural belt—specifically the regions south of Nazarabad and Eshtehard—was conclusively identified as a highly vulnerable focal point of deterioration. This localized drop in soil quality metrics is inextricably tied to intrinsic clay and clay-loam textures, exacerbated by a progressive intensification of electrical conductivity and sodium accumulation observed between 2011 and 2024. This spatial degradation aligns with previous studies indicating severe structural risks along the Qazvin and southwestern Alborz borders. Furthermore, agricultural zones in the eastern and northeastern quadrants demonstrated rigid stagnation, persistently lingering in moderate quality classes with no discernible improvement.These outcomes firmly underscore that prevailing barriers to maximum agricultural yield in Alborz Province remain fundamentally physical, delineated by the paramount influence of bulk density and severe organic carbon deficiency within the PCA framework. Addressing these ingrained physical constraints is paramount. To effectively halt creeping degradation in endangered southwestern corridors and elevate baseline quality thresholds in stagnant eastern regions, strategic shifts in soil management are urgently necessitated. The extensive incorporation of organic soil amendments, rigorous application of conservation tillage regimens, and systematic retention of crop residues represent critical interventions required to rehabilitate structural integrity, augment organic carbon reservoirs, and combat compounding threats of salinization.

Keywords: Soil Quality Index, Nemero and Temporal Monitoring

مقدمه

با توجه به وظایف و کارکردهای مختلف خاک می‌توان کیفیت خاک را مورد توجه قرار داد. در خصوص کیفیت خاک تعاریف زیادی ارائه شده است (Doran and Parkin, 1997). برای مثال کارلن و همکاران (Karlen et al., 1999) و دی پاول اوبید و لل (de Paul Obade and Lal, 2016) کیفیت خاک را توانایی دائم یک خاک در انجام وظایف خود به‌عنوان یک سیستم حیاتی زنده در داخل اکوسیستم و تحت بهره‌برداری‌های متفاوت تعریف نمودند، به‌گونه‌ای که علاوه بر حفظ حاصلخیزی بیولوژیکی توانایی بهبود کیفیت آب و هوا و همچنین تأمین‌کننده سلامت انسان، حیوان و گیاه را دارا باشد. از دیدگاه کشاورزی، کیفیت خاک توانایی تولید محصول یا باروری خاک است. آگاهی از وضعیت کیفیت خاک در کشاورزی و منابع طبیعی برای مدیریت بهینه اراضی کشاورزی و رسیدن به حداکثر بهره‌وری اقتصادی با حفظ منابع خاک ضروری است.

از شاخص‌های کیفیت خاک مختلفی برای ارزیابی کیفیت خاک استفاده می‌شود. از جمله این شاخص‌ها می‌توان به شاخص کیفیت نرمال‌شده (QI_N)، شاخص کیفیت نمورو[1] (NQI)، شاخص کیفیت خاک تجمعی ساده[2] (IQI_A) و وزنی[3] (IQI_W)، شاخص کیفیت خاک نسبی[4] (RSQI) و چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF) اشاره کرد. در این شاخص‌ها ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در قالب یک معادله ریاضی با هم ترکیب و به صورت کمی ارائه می‌گردد. برای ارزیابی کیفیت خاک، باید مجموعه‌ای از ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی، زیستی مؤثر بر کیفیت خاک و یا ترکیبی از آن‌ها استفاده شود. با توجه به آن‌که نمی‌توان همه ویژگی‌ها را اندازه‌گیری نمود، لذا از مهم‌ترین ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک به‌عنوان حداقل مجموعه داده‌ها[5] (MDS) استفاده می‌شود.

در خصوص ارزیابی کیفیت خاک پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است برای مثال سانچز ناوارو و همکاران (Sánchez-Navarro,et al., 2015) در استان مورکیا[6] در جنوب غرب اسپانیا به روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) حداقل داده‌های لازم (MDS) انتخاب و کیفیت خاک با استفاده از شاخص کیفیت نرمال‌شده (QI_N) بررسی شد. نتایج نشان داد که ۱۲، ۳۲، ۱۵، ۱۹ و ۲۲ درصد از منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب دارای کیفیت بسیار بالا، بالا، متوسط، پایین و خیلی پایین بود.

بازاک و همکاران (Basak et al., 2022) با بررسی کیفیت خاک در سیستم کشت برنج (*Oryza sativa* L.) و گندم (*Triticum aestivam* L.) با استفاده از مدل اصلاح شده چارچوب ارزیابی مدیریت خاک (SMAF)، شاخص‌های فیزیکی، شیمیایی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک برای استراتژی‌های مدیریت مواد مغذی مختلف، یعنی کود معدنی (NPK)، NPK + ۷/۵ تن در هکتار کود دامی(NPKF)، NPK + ۱۰ تن در هکتار کاه شلتوک(NPKP) و NPK + ۸ تن در هکتار کود سبز (NPKG) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که استراتژی های مدیریت عناصر غذایی به طور قابل توجهی بر شاخص های کیفیت خاک تأثیر داشت و تیمار NPKF بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت فیزیکی، تغذیه‌ای و بیولوژیکی خاک و تیمار NPKP بالاترین امتیاز کیفیت خاک را برای شاخص کیفیت شیمیایی داشت.

ایسونگ و همکاران (Isong et al., 2022) با استفاده از ۱۱۰ نمونه خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی متر) در فواصل ۵-۲ کیلومتری در ایالت کراس ریور، نیجریه جمع آوری کردند و ۱۱ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را تعیین شد.

[1] Nemero quality index
[2] Additive soil quality index
[3] Weighted additive soil quality index
[4] Relative soil quality index
[5] Minimum data set
[6] Murcia

سپس کیفیت خاک را با استفاده از مجموعه کل ویژگی‌ها (TDS) و مجموعه حداقل ویژگی ها (پایداری ساختمان خاک، درصد شن، مقدار کربن آلی خاک و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها) محاسبه کردند و از دو تابع امتیازدهی خطی (L) و غیرخطی (NL) برای امتیاز دهی استفاده کردند، نتایج نشان داد که کیفیت خاک در منطقه جنوبی بالا و در منطقه شمالی پایین بود. کلاس با کیفیت خاک بالا (>٤٩٪) و کلاس کیفیت خاک متوسط (>١٤٪) در همه مدل های پیش‌بینی استفاده شده بر منطقه مورد مطالعه غالب بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2020) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی نظرآباد استان البرز را بررسی کردند. برای این منظور ۹۵ نمونه خاک سطحی (صفر تا ۳۰ سانتیمتر) را به صورت شبکه‌بندی (١٦٥٠×١٦٥٠ متر) نمونه‌برداری و ۲۰ ویژگی فیزیکی و شیمیایی خاک را اندازه‌گیری کردند و کمترین ویژگی‌ها (MDS) شامل شن، جرم مخصوص ظاهری، کربنات کلسیم معادل، فسفر، نسبت جذب سدیم و بر با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب شدند و شاخص‌های کیفیت نمورو (NQI) و تجمعی ساده (IQI_a) و وزنی (IQI_w) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بین عملکرد گندم آبی و شاخص‌های IQI_w (r =٠/٦٨)، IQI_a (r =٠/٦٧) و NQI (r =٠/٦٢) که با استفاده از حداقل ویژگی‌های خاک تعیین شده بود، همبستگی معنی‌دار (p<٠/٠١) بود، همچنین با توجه به نتایج، شاخص IQI_w بر مبنای حداقل ویژگی‌های خاک، حدود ۸۲ درصد منطقه نظرآباد دارای کیفیت خاک خیلی خوب و خوب بود و حدود ۱۱ درصد کیفیت متوسط و حدود ۷ درصد کیفیت پایین و خیلی پایین بود.

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2021) در پژوهشی کیفیت خاک اراضی کشاورزی ساوجبلاغ استان البرز را بررسی کردند. در این مطالعه نمونه‌های خاک سطحی (٠-٣٠ سانتی‌متر) از ۵۰ مزرعه در منطقه ساوجبلاغ استان البرز نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک اندازه‌گیری کردند. کل متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را استخراج و کمترین متغیرهای مؤثر بر کیفیت خاک را با استفاده از روش تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) انتخاب کردند و شاخص‌های کیفیت خاک شامل کیفیت تجمعی وزنی (SQI_w) و تجمعی ساده (SQI_a) و شاخص کیفیت نمورو (NQI) تعیین کردند. همچنین تغییرات مکانی شاخص‌های کیفیت را با استفاده از روش زمین‌آمار تحلیل و توزیع مکانی آنها را با استفاده از روش کریجینگ معمولی تعیین کردند. نتایج نشان داد که شاخص NQI با استفاده از کل ویژگی‌ها دقت بالاتری بر اساس آماره‌های R^2 برابر با ٠/٨٥ و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE=٠/٠١) برای تهیه نقشه کیفیت خاک داشت و قسمت وسیعی از منطقه کیفیت بالا داشت (کلاس II).

میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2024) در پژوهش در ٢٠٦ گندم‌زار استان آذربایجان شرقی (دشت تبریز)، شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (SQI_A) و تجمعی وزنی (SQI_W) و نمورو (NQI) خاک سطحی (٣٠-٠ سانتی‌متری) و عملکرد گندم را بررسی کردند. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری در سطح یک درصد (p<٠/٠١) بین عملکرد گندم و شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از حداقل ویژگی‌ها (r =٠/٦٠-٠/٦٣) و کل ویژگی‌ها (r =٠/٠-٥٦/٦٠) و همچنین بین استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌ها در NQI (r =٠/٨١)، SQI_w (r =٠/٨٤) و SQI_a (r =٠/٨٨) وجود داشت. لذا هر سه شاخص مورد بررسی برای منطقه مورد مطالعه مناسب بوده و استفاده از حداقل ویژگی‌ها به‌دلیل همبستگی نسبتاً بالاتر و تعداد ویژگی‌ها و هزینه کمتر، مناسب‌تر از روش استفاده از کل ویژگی‌ها بود.

گااو و همکاران (Gao et al., 2025) با ارزیابی کیفیت خاک زمین‌های کشاورزی شور و سدیمی شهر دان، استان جیلین، با مساحت ٤٨٧٩ کیلومتر مربع نشان دادند که ١٣/٧٣ درصد از زمین‌های کشت‌شده در شهر دان

کیفیت بالا (درجه ۱)، ۸۰/٦۳ درصد کیفیت متوسط (درجه ۳-۲) و ٥/٦٥ درصد کیفیت پایین (درجه ٤) داشتند.

همتی و همکاران (Hemmati et al., 2025) برای ارزیابی تأثیر تبدیل زمین‌های بایر با پوشش گیاهی طبیعی نیمه‌خشک به باغ‌های زیتون بر کیفیت خاک در منطقه لوشان، استان گیلان، ۷٦ نمونه خاک از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متری تحت دو کاربری زمین (زمین بایر و باغ زیتون) جمع‌آوری و ۲٤ ویژگی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی اندازه‌گیری و شاخص کیفیت خاک (SQI) با استفاده از دو رویکرد محاسبه شد: شاخص تجمعی ساده (SQIA) و شاخص تجمعی وزنی (SQIW)، بر اساس مجموعه کل داده‌ها (TDS) و حداقل مجموعه داده‌ها (MDS) تعیین کردند و نشان داد که کیفیت خاک در باغ‌های زیتون در مقایسه با زمین‌های بایر به‌طور قابل توجهی بالاتر بود. مقادیر SQI در باغ‌های زیتون از ۰/۷۵ تا ۰/۷۹ متغیر بود، در حالی که در زمین‌های بایر بین ۰/٤۱ تا ۰/٤۸ متغیر بود. همچنین MDS عملکرد قابل اعتمادی را با متغیرهای کمتر در مقایسه با TDS ارائه داد و شاخص‌های وزنی با در نظر گرفتن اهمیت نسبی شاخص‌ها، ارزیابی‌های دقیق‌تری ارائه دادند.

لیو و همکاران (Liu et al., 2024) با بررسی کیفیت خاک مناطق کاشت تنباکو در استان گوئیژو، ٥۱ نقطه نمونه‌برداری خاک به‌عنوان نمونه انتخاب و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک سطحی (۰ تا ۱۰ سانتی‌متر) و خاک زیرسطحی (۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری و کیفیت خاک را تعیین کردند تا تأثیر مدت زمان‌های مختلف کشت تنباکو (صفر تا ۱۰ سال، ۱۰ تا ۲۰ سال و بیشتر از ۲۰ سال) بر شاخص کیفیت خاک (SQI) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بین میانگین کیفیت خاک با استفاده از حداقل داده‌ها (۰/٥۸۹) و کل داده‌ها (۰/٥۸۱) همبستگی معنی‌دار بالایی داشت ($P<0.01$ ،$R^2=0.99$)، همچنین تفاوت معنی‌داری در کیفیت خاک بین لایه‌های مختلف خاک (۰-۱۰ سانتی‌متر و ۱۰-۲۰ سانتی‌متر) وجود نداشت، و تفاوت معنی‌داری بین مقادیر کیفیت خاک در سال اول با سال سوم وجود داشت ($P<0.05$). در نتیجه، کشت مداوم و طولانی مدت تنباکو منجر به کاهش کیفیت خاک شده است.

نیک‌پی و همکاران (Nikpey et al., 2024) با ارزیابی شاخص کیفیت خاک تجمعی (IQI) و شاخص کیفیت نمورو (NQI)، با استفاده از مجموعه کل داده‌ها (TDS) و مجموعه حداقل داده‌ها (MDS)، در ۸۹ مزرعه کشاورزی استان گلستان، نشان دادند که شاخص IQI در تخمین کیفیت خاک نسبت به شاخص NQI عملکرد بهتری داشت و روش شاخص کیفیت خاک تجمعی با استفاده از مجموعه حداقل داده‌ها را در ارزیابی کیفیت را پیشنهاد دادند.

هاشمی و همکاران (Hashemy et al., 2024) برای ارزیابی اثرات بلندمدت کشت نیشکر بر کیفیت خاک انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مزارع نیشکر (SC) سایت میرزا کوچک‌خان و زمین‌های اطراف با کاربری‌های مختلف مانند تناوب گندم-برنج (WR) و مراتع بیابانی (DP) از عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری و با استفاده از مجموعه داده‌های کل (TDS) و مجموعه داده‌های حداقل (MDS) شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی و نمورو (NQI) را تعیین کردند. نتایج نشان داد که هر دو شاخص انتخاب شده قادر به کمی‌سازی تغییرات کیفیت خاک بین کاربری‌های مختلف زمین بودند. علاوه بر این، همبستگی مثبت و قوی ($R^2 \geq 0.80$-0.92) بین SQI به‌دست‌آمده از TDS و MDS وجود داشت صرف نظر از نوع مجموعه داده‌ها و نوع شاخص، کیفیت خاک مزارع نیشکر به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از سایرین بود.

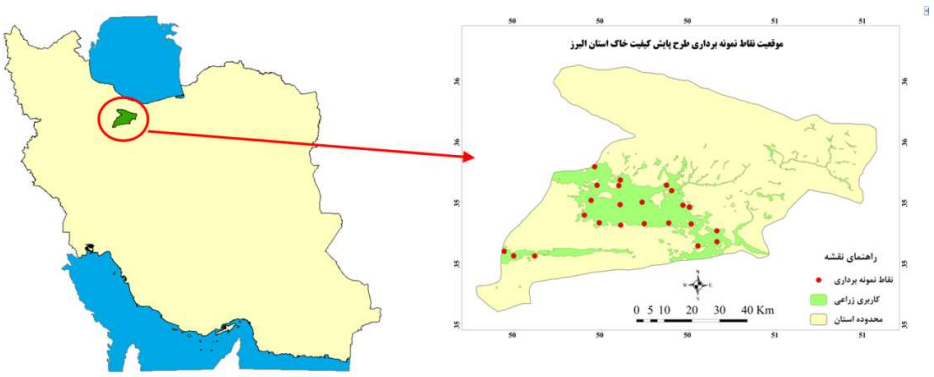
با توجه به عملیات کشاورزی مرسوم و عدم استفاده از کود و یا کود دهی بدون در نظر گرفتن آزمون خاک و کاهش کیفیت آبهای زیرزمینی به‌دلیل افزایش بی‌رویه از چاه‌های و افزایش عمق آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در غرب و جنوب غرب استان احتمال کاهش کیفیت خاک وجود دارد. همچنین در خصوص تغییرات زمانی کیفیت خاک مطالعه‌ای انجام نشده است و هیچ اطلاعاتی از روند

تغییرات کیفیت خاک استان در طول زمان وجود ندارد. لذا بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت خاک ضروری می‌باشد. در این پژوهش با بررسی کیفیت خاک و تهیه نقشه پهنه‌بندی کیفیت خاک استان البرز در دو بازه زمانی ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳، تغییرات مکانی و زمانی کیفیت خاک در یک بازه زمانی ۱۳ ساله انجام شد و تغییرات آن مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در زون آگرواکولوژیک مرکزی ایران و در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز قرار دارد. این منطقه با میانگین بارندگی سالیانه ۲۳۸ میلی‌متر، میانگین دمای ۱۴/۲ درجه سانتی‌گراد و رژیم رطوبتی زریک و رژیم حرارتی مزیک در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد.



شکل۱ – نقشه منطقه مورد مطالعه و موقعیت محل نقاط نمونه‌برداری خاک در استان البرز

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

در این مطالعه از خاک سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر) ۲۳ مزرعه در کشتزارهای استان البرز در دو بازه زمانی ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ نمونه‌برداری و ویژگی‌های فیزیکی شامل اندازه‌گیری شن، سیلت، رس به روش هیدرومتری (Aria et al., 2005)، جرم مخصوص ظاهری به روش سیلندر (Aria et al., 2005) و ویژگی‌های شیمیایی شامل شوری عصاره اشباع به وسیله هدایت سنج، واکنش گل اشباع به وسیله pH سنج، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک (Walkley and black, 1934)، عناصر کم مصرف (آهن، مس، روی، منگنز و بر قابل استفاده) با استفاده از دستگاه جذب اتمی، کربنات کلسیم معادل به روش خنثی سازی با اسید کلریدریک (Page et al., 1982)، فسفر قابل استفاده به روش اولسن (Olsen et al., 1954) و پتاسیم قابل استفاده به روش استخراج با استات آمونیوم یک نرمال، سدیم محلول خاک به وسیله دستگاه فلیم فتومتر و مقدار کلسیم و منیزیم محلول با استفاده از عصاره اشباع خاک توسط روش کمپلکسومتری و از طریق تیتراسیون باEDTA در حضور معرف‌های اریوکروم بلاکتی و موروکساید (Page et al., 1982)، اندازه‌گیری و نسبت سدیم قابل جذب (SAR) محاسبه شد (Page et al., 1982).

تعیین شاخص‌های کیفیت خاک

برای انتخاب حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک، در نرم افزار SPSS ۲۴ با استفاده از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی (PCA)، مؤلفه‌های اصلی (PC) و ارزش ویژه (EV) تعیین شد. سپس در مؤلفه‌هایی با ارزش ویژه بالای یک، در هر مؤلفه، ویژگی با بالاترین ضریب بارگذاری انتخاب و ویژگی‌هایی با اختلاف ده درصد از بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. جیوهوز و همکارن (Juhos et al., 2015) در پژوهشی در شرق مجارستان نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با

ارزش ویژه بیشتر از یک می‌تواند ۸۵ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند و رگرسیون خطی چندگانه به روش گام به گام با استفاده از مؤلفه اصلی همبستگی معنی‌داری ($p<0/01$) با میانگین عملکرد نسبی گندم دارد. برای تعیین مناسب بودن داده‌ها برای PCA از ضریب KMO [1] استفاده شد. با توجه به این‌که ویژگی‌های مورد بررسی دارای واحدهای متفاوتی بودند، با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون واحد صفر (کمترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تا یک (بیشترین مطلوبیت برای کیفیت خاک) تبدیل شدند (Qi et al., 2009).

برای تبدیل مقادیر به امتیاز از منحنی‌های نمره‌دهی "More is better" (رابطه ۱) و "Less is better" (رابطه ۲) و منحنی "Optimum range" (تلفیق روابط ۱ و ۲) استفاده شد (MATLAB R2015b, 2015).

رابطه ۱

$$f(x,a,b)=\begin{cases}0 & x\le a\\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le\frac{a+b}{2}\\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2}\le x\le b\\ 1 & x\ge b\end{cases}$$

رابطه ۲

$$f(x,a,b)=\begin{cases}1 & x\le a\\ 1-2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2 & a\le x\le\frac{a+b}{2}\\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2}\le x\le b\\ 0 & x\ge b\end{cases}$$

در این روابط f(x) امتیاز ویژگی، x مقدار ویژگی، α مقدار آستانه پایین ویژگی و b مقدار آستانه بالای ویژگی هستند.

در ادامه در نرم‌افزار SPSS ۲٤، سهم اشتراک‌پذیری [2] هر ویژگی با استفاده از تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بدست آمد، سپس وزن هر ویژگی برای محاسبه شاخص کیفیت خاک تجمعی وزنی با تقسیم مقدار سهم اشتراک‌پذیری هر ویژگی به مجموع مقادیر سهم اشتراک‌پذیری کل ویژگی‌ها در هر مجموعه، محاسبه شد و از رابطه ۳ شاخص‌های کیفیت خاک تجمعی وزنی (IQI_A)، از رابطه ٤ تجمعی ساده (IQI_W) و از رابطه ٥ کیفیت نمورو (NQI) محاسبه شدند.

رابطه ۳

$$IQI_W=\sum_{i=1}^{n}S_iW_i$$

رابطه ۴

$$IQI_A=\sum_{i=1}^{n}\frac{S_i}{n}$$

رابطه ۵

$$NQI=\sqrt{\frac{P_{ava}{}^2+P_{\min}{}^2}{2}}\times\frac{n-1}{n}$$

در این روابط: S_i مقدار هر ویژگی خاک (امتیاز ویژگی)، W_i وزن هر ویژگی خاک، P_{ave} میانگین مقادیر ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر نمونه خاک، P_{min} کمترین مقدار در بین ویژگی‌های انتخاب‌شده برای هر

[1] Kaiser-Meyer-Olkin

[2] Communality

نمونه و n تعداد ویژگی‌های مورد نظر برای محاسبه هر شاخص است.

برای طبقه‌بندی کلاس شاخص‌های کیفیت خاک، از جدول ۱ استفاده شد.

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص‌های کیفیت خاک (Mirkhani, 2020)

شاخص	روش انتخاب ویژگی	کلاس کیفیت خاک				
		خیلی خوب (I)	خوب (II)	متوسط (III)	پایین (IV)	خیلی پایین (V)
NQI	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> ۰/٤۱۷	۰/۳٦٥- ۰/٤۱۷	۰/۳۱٤- ۰/۳٦٥	۰/۲٦۳- ۰/۳۱٤	< ۰/۲٦۳
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> ۰/٤۳٥	۰/٤۱۱- ۰/٤۳٥	۰/۳۷۷- ۰/٤۱۱	۰/۳۱۹- ۰/۳۷۷	< ۰/۳۱۹
SQI_a	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> ۰/٦٤۹	۰/٥۸۰- ۰/٦٤۹	۰/٥۱۲- ۰/٥۸۰	۰/٤٤٤- ۰/٥۱۲	< ۰/٤٤٤
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> ۰/٦٥٥	۰/٦۱۹- ۰/٦٥٥	۰/٥٦۹- ۰/٦۱۹	۰/٤۸۲- ۰/٥٦۹	< ۰/٤۸۲
SQI_w	حداقل ویژگی‌ها (MDS)	> ۰/٦٦۳	۰/٦۰۰- ۰/٦٦۳	۰/٥۲۱- ۰/٦۰۰	۰/٤۱۰- ۰/٥۲۱	< ۰/٤۱۰
	کل ویژگی‌ها (TDS)	> ۰/٦٦٥	۰/٦۲٤- ۰/٦٦٥	۰/٥٦٦- ۰/٦۲٤	۰/٤٦۷- ۰/٥٦٦	< ۰/٤٦۷

توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک

به‌منظور مدل‌سازی و ارزیابی توزیع مکانی شاخص‌های کیفیت خاک در دو مقطع زمانی ۱۳۹۰ و ۱٤۰۳، از تکنیک‌های پیشرفته زمین‌آمار و الگوریتم درون‌یابی "کریجینگ معمولی[1]" در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره‌گیری شد. الگوریتم کریجینگ به‌عنوان یک برآوردگر خطی نااریب و بهینه، با اتکا بر تحلیل خودهمبستگی مکانی[2] و برازش مناسب‌ترین مدل نظری بر نیم‌تغییرنمای تجربی[3]، خطای واریانس تخمین را در نقاط نمونه‌برداری‌نشده به حداقل می‌رساند. در این راستا، پارامترهای کلیدی مدل‌های زمین‌آماری شامل اثر قطعه‌ای[4]، آستانه[5] و شعاع تأثیر[6] به‌دقت استخراج شدند تا ضمن تعیین نسبت وابستگی مکانی متغیرها، ساختار فضایی آن‌ها به‌درستی ارزیابی شود. در ادامه، پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها و اعتبارسنجی متقاطع[7] مدل‌ها، نقشه‌های رستری پیوسته‌ای از شاخص‌های کیفیت خاک تولید گردید. تحلیل و مقایسه این نقشه‌ها، امکان پایش دقیق دینامیک مکانی-زمانی و شناسایی صریح زون‌های آسیب‌پذیر و در معرض تخریب (به‌ویژه افت کیفیت در نوار جنوب‌غربی منطقه مورد مطالعه) را در یک دوره ۱۳ ساله با ضریب اطمینان بالا فراهم نمود.

نتایج و بحث

ویژگی‌های خاک کشتزارها

جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک را در نمونه‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. با توجه به میانگین رس (۲۵ درصد)، سیلت (۳۹ درصد) و شن (۳٦ درصد)، بیشتر نمونه‌ها دارای بافت لوم و لوم رسی بودند. pH خاک‌های منطقه دارای محدوده ۸/۸٤- ۸/۱ و میانگین آن حدود ۸/۳٦ بود. منطقه مورد مطالعه از نظر مقدار آهن، روی، منگنز، بر، مس، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، شوری و سدیمی بودن محدودیتی برای رشد محصولات زراعی غالب منطقه (گندم و ذرت) نداشت. به‌دلیل ماده آلی پایین، منطقه مورد مطالعه از نظر پایداری ساختمان ضعیف و دارای محدودیت بود. نتایج نشان داد که بجز pH ، روی و مس بین سایر ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱٤۰۳ اختلاف معنی‌داری وجود نداشت. اسماعیل‌نژاد و همکاران (Esmaeelnejad and Saadat, 2025) با بررسی خطر منیزیمی شدن خاک‌های کشاورزی استان البرز در اثر

[1] Ordinary Kriging
[2] Spatial Autocorrelation
[3] Experimental Semivariogram
[4] Nugget effect
[5] Sill
[6] Range of influence
[7] Cross-validation

استفاده بلندمدت از آب‌های زیرزمینی. با استفاده از داده‌های کیفیت آب ۹۵۰ چاه کشاورزی در بازه زمانی۱۳۸۲ تا ۱۴۰۰، شاخص خطر منیزمی شدن (MH)، محاسبه کردند و نشان دادند که در بسیاری از سال‌ها، مقدار خطر منیزمی شدن از آستانه خطر عبور کرده و در بیش از ۳۶ درصد نمونه‌ها، سطح خطر بالا مشاهده شد. همچنین بررسی مکانی چاه‌های کشاورزی نشان دادند که نواحی جنوبی و جنوب غربی استان در معرض بیشترین خطر منیزمی شدن بودند.

جدول ۲- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ (n=۲۳)

ویژگی‌های خاک	کمینه		بیشینه		میانگین		انحراف معیار		کشیدگی		چولگی		معنی‌داری
	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	
(%) Sand	۲	۲	۸۰	۸۰	۳۵/۷	۳۵/۰	۲۰/۲۲	۱۸/۹۹	۰/۲۶٤	۰/۸٦٥	۰/۷۳٦	۰/۹۰۸	۰/۹۵۸^{ns}
(%) Silt	۱۰	۱۱	٥٤	٦٤	۳۸/۸۳	۳۹/۲٦	۱٥/۱۷	۱۱/۱۲	-۰/۳۷۱	۱/۱۳	-۰/۳٦۷	-۱/۱۹	۰/۸۹۳^{ns}
(%) Clay	۱۰	۸	٤٥	٥۲	۲٥/٤۸	۲٥/۲٦	۹/٦۸	۹/٤۲	-۰/۲۹٤	۱/٤۰	۰/٥۷۳	-۰/۰٤۳	۰/۹۰٦^{ns}
(g.cm^{-3}) BD	۱/۲۰	۱/٤٦	۱/۸٥	۱/۸۳	۱/٦۲	۱/٥۷	۰/۱٦۳	۰/۱۰٤	۰/۸۷٥	-۰/٤۲۳	-۰/٦۸۹	۰/٦٦۱	۰/۱۸۲^{ns}
pH	۷/٤۰	۷/۷۷	۸/۱۰	۸/۸٤	۷/۷٦	۸/۳٦	۰/۲۰۲	۰/۲۹٤	-۰/٦۹٤	-۰/۱٥۷	۰/۲٦۸	-۰/۷۳٦	۰/٤۳۰*
(dS/m) EC	۰/۸٦	۰/۳۱	٦/۸۱	۱٤/۳٥	۲/٦٠	۲/٦٦	۱/۳۹۷	۳/۲٥۷	۲/۳٥	۷/۳٦	۱/۳۸۳	۲/٦٥	۰/۹۲٥^{ns}
(%) OC	۰/۲۰	۰/۳۰	۲/٦۷	۲/۷۷	۰/۹۲	۱/۱٤	۰/٦۳۱	۰/٦۲۲	۲/۲۹	۱/۸۸	۱/٥٥	۱/٤٥	۰/۱۳٦^{ns}
(%) TNV	٥/۷٥	۹/٥	۲٥/۲	۳۳/۰۰	۱٥/۱۸	۱٦/٤٤	٦/٥٥۸	٤/۲٥	۱/٥٦	-۰/۰٤۹	۱/۳	۰/٤۹	۰/۲٦٤^{ns}
SAR	۰/٦۰	۰/۲۹	۱۱/٥۰	۱۱/۳۸	۳/٦٦	۳/۰٥	۳/۰۱	۲/۹٦	۰/۷۸	۲۲/۰۸	۱/۲۳	۱/٥٤	۰/٤۰۳^{ns}
(mg.kg^{-1}) P_{ava}	۲/٦۰	۲/۸۰	۲۰۹	۱۹٦	۳٤/۳۱	۳۷/۷۰	٤٤/٦۹	٤۹/٥۲	۱۰/۷۰	٤/۱۱	۲/۹۷	۲/۰۲	۰/٤۸۳^{ns}
(mg.kg^{-1}) K_{ava}	۱۱۳	۱۷۰	۱۰٥٦	۸۹۳	۳۹٥/۷۰	۳۹٥/۲٦	۲۳۷/٤٥	۲۰۸/۲۲	۱/٦٦	۰/۸٥۲	۱/۲٥	۱/۳٤۷	۰/۹۹٥^{ns}
(mg.kg^{-1}) Fe_{ava}	۳/٦۸	۳/۹٦	٤۲/٦۰	۱۸/۱۲	۷/۹۸	۷/۸۷	۷/۹۸	۳/۸۰	۱۷/۷۷	۱/٤٦	٤/۰٥٤	۱/۲۷	۰/۹٤٤^{ns}
(mg.kg^{-1}) Cu_{ava}	۰/٥۰	۰/٦۲	٤/۰۲	۷/۳۲	۱/۷۲	۲/٤٤	۰/۸٦	۱/٦٤	۰/٦٦٥	۲/۳۸	۱/۲۰۹	۱/٥۷	۰/۰۳۹*
(mg.kg^{-1}) Mn_{ava}	۷/۲۰	۷/٥٦	۲۸/۹۰	۳۹/٦۰	۱٤/۳۱	۱٤/۹۲	٥/٥۷	٦/۹۲	۰/۳۲۳	٦/٦۸	۰/۷٦۲	۲/۱٤۲	۰/۷٤٦^{ns}
(mg.kg^{-1}) B_{ava}	۰/٤۲	۰/۰٥	۸/٤۰	۲/٦۳	۱/۲۹	۱/۰٥	۱/٦۰٤	۰/٦۸٥	۱۹/٥۱	۰/٤۷	٤/۲۸	۰/۹٦	۰/٤۰۳^{ns}
(mg.kg^{-1}) Zn_{ava}	۰/۲۰	۰/٥۲	۳/۲٦	۹/۸۰	۱/۱٤	۲/۹٤	۰/۷٤	۲/٤۸	۱/٥۷	۱/۸٥	۱/۲۷	۱/٥۱	۰/۰۰۱**

جدول ۳ نتایج آزمون بارتلت و KMO را نشان داد. با توجه به نتایج، مقادیر KMO بالاتر از ۰/۷ است (۰/۷٦۳) و آزمون بارتلت در سطح ۰/۱ درصد معنی‌دار بود و نشان داد که داده‌ها برای تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و انتخاب حداقل ویژگی‌ها مناسب بودند. جیوهوز و همکاران (Juhos et al., 2015) نشان دادند که استفاده از مؤلفه‌های اصلی با ارزش ویژه بیشتر از یک توانست ۷٦ درصد از تغییرات ویژگی‌های خاک را بیان کند.

جدول ۳- تست بارتلت و KMO

Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)		۰/۷٦۳
آزمون کرویت بارتلت	آماره کای اسکوار[1]	۷۲/٥۳٤
	درجه آزادی	۲۱
	معنی‌داری	۰/۰۰۰

[1] Approx. Chi-Square

انتخاب مؤلفه‌های اصلی کیفیت خاک

جدول ٤ مقادیر ارزش ویژه (EV)، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده را در مؤلفه‌های انتخاب شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، سه مؤلفه دارای مقدار ارزش ویژه (EV) بزرگ‌تر از یک بودند. در مؤلفه اول با ارزش ویژه ۲/۸٦۸، کربن آلی با بالاترین ضریب بارگذاری ۰/۸٤۲، در مؤلفه دوم با ارزش ویژه ۱/۲۸۸، جرم مخصوص ظاهری با ضریب بارگذاری ۰/۸۳۱ و در مؤلفه سوم با ارزش ویژه ۱/۰۲، هدایت الکتریکی با ضریب بارگذاری ۰/۹۰۱ با بالاترین ضریب بارگذاری در هر مؤلفه به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند. همچنین پتاسیم و فسفر قابل استفاده به‌ترتیب با ضریب بارگذاری ۰/۸۲۰ و ۰/۷۷٤ در مؤلفه اول با ضریب بارگذاری بالا تا ۱۰ درصد کمتر از بالاترین ضریب بارگذاری مؤلفه اول مربوط نیز به‌عنوان حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک انتخاب شدند.

جدول ۴ – مقادیر ارزش ویژه، درصد تجمعی واریانس و ضریب بارگذاری ویژگی‌های انتخاب شده در مؤلفه‌ها

	مؤلفه‌ها (component)		
	۱	۲	۳
ارزش ویژه (Eigenvalue)	۲/۸٦۸	۱/۲۸۸	۱/۰۲
درصد تجمعی واریانس (Cumulative percent)	٤۰/۹۸	٥۹/۳۷	۷۳/۹٦
P_{ava}	۰/۷۷٤	–	–
K_{ava}	۰/۸۲۰	–	–
BD	–	۰/۸۳۱	–
EC	–	–	۰/۹۰۱
OC	۰/۸٤۲	-	-

جدول ٥ منحنی نمره‌دهی، حد بهینه، حد کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد محصول گندم آبی را نشان می‌دهد. با استفاده از توابع عضویت فازی، ویژگی‌های انتخاب شده برای هر نمونه خاک به امتیازات بدون بعد صفر تا یک تبدیل شدند. برای این منظور برای ویژگی‌های کربن آلی، فسفر و پتاسیم قابل استفاده، آهن، منگنز، مس، روی از منحنی "More is better"، برای ویژگی‌های نسبت جذب سدیم، جرم مخصوص ظاهری، هدایت الکتریکی، کربنات کلسیم معادل و بر قابل استفاده از منحنی"Less is better" و برای ویژگی‌های مانند اسیدیته، شن، سیلت و رس از منحنی "Optimum range" استفاده شد (Cherubin et al., 2016).

وزن‌دهی ویژگی‌های اندازه‌گیری شده

جدول ٦ مقادیر اشتراک‌پذیری و وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در دو روش (استفاده از کل ویژگی‌ها و استفاده از حداقل ویژگی‌های انتخاب شده) را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، در هر دو سری (کل و حداقل ویژگی‌ها)، ویژگی‌های فیزیکی وزن کمتری نسبت به ویژگی‌های شیمیایی خاک داشتند. بنابراین منطقه مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های فیزیکی دارای محدودیت بیشتری نسبت به ویژگی‌های شیمیایی خاک بود. لذا با استفاده از کودهای دامی و عملیات خاکورزی مناسب و بهبود ویژگی‌های فیزیکی خاک می‌توان کیفیت خاک منطقه را بهبود بخشید.

جدول ۵- تابع نمره‌دهی، حد بهینه، کمینه و بیشینه محدود کننده ویژگی‌های اندازه‌گیری شده برای رشد گندم

ویژگی‌های خاک		تابع نمره‌دهی	حد کمینه محدود کننده	حد بهینه محدود کننده	حد بیشینه محدود کننده
(٪) Sand		Optimum renge	۱۰	٤۰	۸۵
(٪) Silt		Optimum renge	۲۰	٤۰	٦۰
(٪) Clay		Optimum renge	۱۰	۲۰	٦۰
$(g.cm^{-3})$ BD	شنی و شن لومی	Less is better	۱/۵		۱/۸
	لوم شنی		۱/٤۵		۱/۷۵
	لوم و لوم رسی شنی		۱/٤		۱/۷
	لومی رسی		۱/۳		۱/٦۵
	لومی رسی سیلتی		۱/۲۷		۱/۵
	رسی		۱/۱		۱/٤
pH		Optimum renge	۵	۷	۸/٤
(dS/m) EC		Less is better	٤		۱٦
(٪) OC		More is better	۰		۱/۱٦
(٪) TNV		Less is better	۱۵		۵۰
$(mg.kg^{-1})$ P_{ava}		More is better	۵		۱۵
$(mg.kg^{-1})$ K_{ava}		More is better	۱۰۰		۲۰۰
$(mg.kg^{-1})$ Fe_{ava}		More is better	۲/۵		۷/۵
$(mg.kg^{-1})$ Cu_{ava}		More is better	۰		۰/۵
$(mg.kg^{-1})$ Mn_{ava}		More is better	۳		۱۰
$(mg.kg^{-1})$ B_{ava}		Less is better	۱		۳
$(mg.kg^{-1})$ Zn_{ava}		More is better	۰/۲۵		۱

جدول ۶- مقادیر وزن ویژگی‌های اندازه‌گیری شده در روش استفاده از کل ویژگی‌ها (TDS) و حداقل ویژگی‌های (MDS)

ویژگی‌های خاک	کل داده‌ها (TDS)		حداقل داده‌ها (MDS)	
	اشتراک‌پذیری	وزن	اشتراک‌پذیری	وزن
(%) Silt	۰/٦۰۹	۰/۰۷۳		
(%) Clay	۰/٤۸۷	۰/۰۵۸		
$(g.cm^{-3})$ Bd	۰/٤۳۰	۰/۰۵۱	۰/۳۵۹	۰/۱۰۷
pH	۰/٦۵۹	۰/۰۷۹		
(dS/m) EC	۰/۷۸٦	۰/۰۹٤	۰/۷۹۱	۰/۲۳۷
(%) OC	۰/۷۹۷	۰/۰۹۵	۰/۷۷۳	۰/۲۳۱
(%) TNV	۰/٦۷۹	۰/۰۸۱		
$(mg.kg^{-1})$ P_{ava}	۰/٦۷۹	۰/۰۸۱	۰/۷٤۵	۰/۲۲۳
$(mg.kg^{-1})$ K_{ava}	۰/۵۹۷	۰/۰۷۱	۰/٦۷٦	۰/۲۰۲
$(mg.kg^{-1})$ Fe_{ava}	۰/۷۰۹	۰/۰۸۵		
$(mg.kg^{-1})$ Cu_{ava}	۰/۷۳۸	۰/۰۸۸		
$(mg.kg^{-1})$ Mn_{ava}	۰/۵٦٤	۰/۰٦۷		
$(mg.kg^{-1})$ B_{ava}	۰/٦۳۲	۰/۰۷٦		

وضعیت کیفیت خاک منطقه

جدول ۷ وضعیت کیفیت خاک در اراضی کشاورزی منطقه مورد مطالعه را با استفاده از شاخص‌های کیفیت تجمعی ساده (IQI_a)، تجمعی وزنی (IQI_w) و نمورو (NQI) در حداقل ویژگی‌ها و کل ویژگی‌های انتخاب شده نشان می‌دهد. با توجه به نتایج، اراضی کشاورزی استان البرز دارای محدوده وسیعی از نظر مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک بود ولی با توجه به میانگین و میانه شاخص‌های کیفیت (جدول ۷) بیش از ۵۰ درصد نقاط مورد مطالعه دارای کلاس خیلی خوب بود. همچنین بین میانگین کیفیت خاک در سالهای ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ در همه شاخص‌های مورد مطالعه اختلاف معنی‌دار نبود.

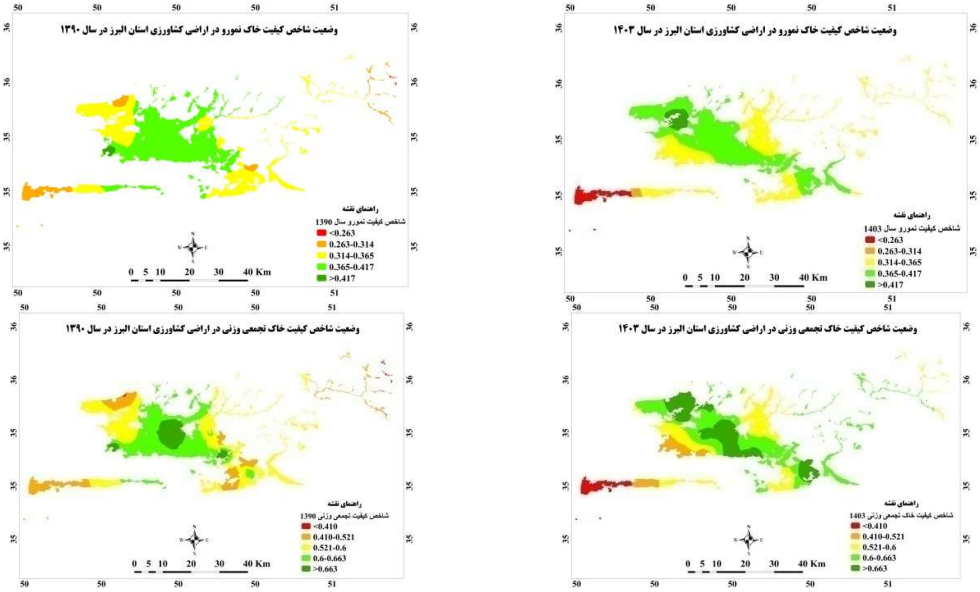
جدول ۷- وضعیت کیفیت خاک در زمین‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه در سال ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳

شاخص	روش انتخاب ویژگی	کمینه		بیشینه		میانگین		میانه		اختلاف	معنی‌داری
		۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	۱۳۹۰	۱۴۰۳	میانگین	
NQI	حداقل ویژگی‌ها	۰/۱۶۳	۰/۲۹۸	۰/۸۰۰	۰/۷۲۱	۰/۴۴۸	۰/۴۲۰	۰/۴۴۷	۰/۴۰۰	-۰/۰۲۸	۰/۴۳۰ ns
	کل ویژگی‌ها	۰/۳۵۹	۰/۳۵۲	۰/۶۸۰	۰/۵۸۲	۰/۴۹۷	۰/۴۸۰	۰/۵۱۹	۰/۴۹۵	-۰/۰۱۷	۰/۳۰۰ ns
IQI_a	حداقل ویژگی‌ها	۰/۲۸۸	۰/۵۲۷	۱/۰۰۰	۰/۹۶۱	۰/۷۱۹	۰/۷۱۵	۰/۷۹۰	۰/۷۰۵	-۰/۰۰۴	۰/۹۱۰ ns
	کل ویژگی‌ها	۰/۵۴۹	۰/۵۳۹	۰/۹۱۵	۰/۸۹۰	۰/۷۵۲	۰/۷۳۳	۰/۷۸۲	۰/۷۵۵	-۰/۰۱۹	۰/۳۷۱ ns
IQI_w	حداقل ویژگی‌ها	۰/۳۳۵	۰/۵۶۲	۱/۰۰۰	۰/۹۵۹	۰/۷۶۵	۰/۷۶۹	۰/۸۸۱	۰/۷۶۱	۰/۰۰۴	۰/۹۲۹ ns
	کل ویژگی‌ها	۰/۵۶۶	۰/۵۳۸	۰/۹۱۰	۰/۸۹۷	۰/۷۶۶	۰/۷۴۹	۰/۸۰۳	۰/۷۶۴	-۰/۰۱۷	۰/۴۲۸ ns

توزیع مکانی و زمانی شاخص‌های کیفیت خاک

شکل ۲ نقشه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک را در اراضی زراعی استان البرز نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۷ با اینکه میانگین کیفیت خاک در همه مدل‌های کیفیت خاک اختلاف معنی‌داری نداشت، ولی با توجه به نقشه‌های کیفیت خاک، مقایسه منطقه‌ای استان البرز نشان دهنده تغییرات کیفیت خاک در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال ۱۳۹۰ بود، که این تغییرات در برخی نقاط افزایشی و در برخی نقاط کاهشی بود که موجب معنی‌دار نشدن میانگین کیفیت خاک در کل استان شد. با توجه به نقشه‌های تغییرات مکانی کیفیت خاک، روند کاهشی کیفیت خاک از مرکز به سمت جنوب غرب منطقه مورد مطالعه کاملاً مشهود بود. مقایسه مکانی نقشه‌های شاخص کیفیت خاک در هر دو مدل نمورو و تجمعی در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۴۰۳ نشان داد که اگرچه الگوی کلی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان البرز به سمت بهبود نسبی حرکت کرده بود، اما این روند یکنواخت نبود. بهبود عمدتاً در بخش‌های شمال‌غربی و بخش‌هایی از نواحی مرکزی مشاهده شد، در حالی که نوار غربی و جنوب‌غربی استان کاهش محسوس کیفیت خاک را نشان داد و به‌عنوان مهم‌ترین کانون کاهش کیفیت در قابل تشخیص بود. همچنین بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی بیشتر در کلاس‌های میانی باقی مانده بودند و شدت افزایش کیفیت خاک در آن‌ها کمتر بود. رحمانی‌پور و همکاران (Rahmanipour et al., 2014) با استفاده از شاخص کیفیت تجمعی و نمورو نقشه کیفیت منطقه قزوین را بررسی و نشان دادند که کیفیت خاک منطقه قزوین در غرب نظرآباد از غرب به شرق روند کاهشی داشت که با روند کاهشی شرق به غرب استان البرز در این تحقیق مطابق بود. همچنین میرخانی و همکاران (Mirkhani et al., 2020) نیز نشان دادند که منطقه بین جنوب غرب استان البرز (جنوب نظر آباد و اشتهارد) و قزوین به‌دلیل بافت شنی و لومی شنی و نیز شور و سدیمی بودن، دارای کیفیت پایینی بود. علت کاهش کیفیت خاک در نواحی غربی و جنوب غرب استان در سال ۱۴۰۳ نسبت به سال ۱۳۹۰ افزایش شوری و بروز خطر

منیزیمی‌شدن خاک بود که به کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده در آبیاری، به‌ویژه در پی بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مرتبط دانسته شد.



شکل ۲- نقشه شاخص‌های کیفیت خاک با استفاده از کل ویژگی‌ها و حداقل ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت خاک در منطقه نظرآباد

نتیجه‌گیری

پایش زمانی و مکانی کیفیت خاک در اراضی کشاورزی استان البرز طی یک دوره ۱۳ ساله (۱۳۹۰ تا ۱۴۰۳) نشان داد که میانگین کلی شاخص‌های کیفیت خاک در سطح استان تفاوت معنی‌داری نکرده است، اما این پایداری ظاهری در مقیاس کل استان، تغییرات مکانی و غیریکنواختی را در سطح استان نشان نمی‌دهد. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از کریجینگ معمولی نشان داد که بخش‌های مرکزی (چهارباغ و ساوجبلاغ)، جنوب‌شرقی (ماهدشت) و شمال‌غربی (نظرآباد) روند بهبود نسبی کیفیت خاک را تجربه کرده‌اند، نوار غربی و جنوب‌غربی استان (جنوب نظرآباد و اشتهارد) به‌عنوان کانون اصلی افت کیفیت خاک شناسایی شد. بخش‌های شرقی و شمال‌شرقی (اطراف کرج) نیز در طول این دوره در کلاس‌های کیفی میانی باقی مانده و شدت افزایش کیفیت خاک در آن‌ها محدود بوده است. علت اصلی افت کیفیت در نواحی غرب و جنوب‌غربی استان، افزایشوری و بروز خطر منیزیمی‌شدن خاک بود که به کاهش کیفیت آب‌های زیرزمینی مورد استفاده در آبیاری، به‌ویژه در پی بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، مرتبط دانسته شد. به‌طور کلی، این پژوهش نشان داد که ارزیابی کیفیت خاک تنها بر اساس میانگین استانی نمی‌تواند روندهای واقعی تغییرات خاک را نشان دهد، ولی پایش مکانی-زمانی مبتنی بر زمین‌آمار، ابزاری ضروری برای شناسایی دقیق مناطق آسیب‌پذیر است. بر این اساس، با انجام عملیات مدیریتی مناسب شامل افزایش مواد آلی خاک و بهبود ساختمان فیزیکی خاک، کنترل شوری و سدیمی / منیزیمی شدن از طریق مدیریت کیفیت آب آبیاری و اجرای شخم حفاظتی نواحی بحرانی استان البرز، ضرورتی فوری و علمی برای حفظ پایداری تولید کشاورزی و پیشگیری از تخریب غیرقابل بازگشت منابع خاک در این منطقه خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود.

REFERENCES

Aria, P., & Mirkhani, R. (2005). Methods of Soil Physical Analysis, *Technical Bulletin,* Soil and Water Research Institute, Iran No: *479*. (In Persian).

Basak, N., Mandal, B., Biswas, S., Basak, P., Mitran, T., Saha, B., & Datta, A. (2022). Impact of long term nutrient management on soil quality indices in rice-wheat system of lower indo-gangetic plain .*Sustainability*, *14*(11), 6533. https://doi.org/10.3390/su14116533.

Cherubin, M. R., Karlen, D. L., Cerri, C. E., Franco, A. L., Tormena, C. A., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2016). Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. *PloS one*, *11*(3): e0150860. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150860.

de Paul Obade, V., & Lal, R. (2016). Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*, *265*: 96-102. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.023.

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for assessing soil quality/editors, John W. Doran and Alice J. Jones; editor-in-chief SSSA, Jerry M. Bigham; managing editor, David M. Kral; associate editor, Marian K. Viney*. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2.

Esmaeelnejad, L., & Saadat, S. (2025). The risk of Magnesium hazard of agricultural soils in Alborz Province due to long-term groundwater use. *19th Iranian Soil Science Congress*. Karaj, Iran. (In Persian with English abstract).

Gao, L., Zhang, C., & Li, C. (2025). Remote Sensing Evaluation of Cultivated Land Soil Quality in Soda–Saline Soil Areas. *Land*, *14*(10), 1986. https://doi.org/10.3390/land14101986.

Hashemy, N., Khademalrasoul, A., Ghafari, H., & Zahirnia, A. R. (2024). Long-Term Effects of Sugarcane Cultivation on the Physicochemical Quality Indices of Saline and Sodic Soils: A Case Study of South Khuzestan. *Applied and Environmental Soil Science*, *2024*(1), 5247959. https://doi.org/10.1155/aess/5247959.

Hemmati, S., Moravej, K., Navidi, M. N., Golchin, A., & Askari, M. S. (2025). Assessing the effects of land use change on soil quality using composite indicators and total and minimum dataset analyses. *Iranian Journal of Soil Research*, *39*(2), 225-246. https://doi.org/10.22092/ijsr.2025.370015.780.

Isong, I. A., John, K., Okon, P. B., Ogban, P. I., & Afu, S. M. (2022). Soil quality estimation using environmental covariates and predictive models: an example from tropical soils of Nigeria. *Ecological Processes*, *11*(1), 1-22. https://doi.org/10.1186/s13717-022-00411-y.

Juhos, K., Szabó, S., & Ladányi, M. (2015). Influence of soil properties on crop yield: a multivariate statistical approach, International *Agrophysics*, *29*: 433-440. https://doi.org/10.1515/intag-2015-0049.

Karlen, D. L., Rosek, M. J., Gardner, J. C., Allan, D. L., Alms, M. J., Bezdicek, D. F., Flock, M., Huggins, D. R., Miller, B. S., & Staben, M. L. (1999). Conservation reserve program effects on soil quality indicators. *Journal of Soil and Water Conservation*, *54*(1): 439-444. https://doi.org/10.1080/00224561.1999.12457260.

Liu, Z., Luo, F., Lu, W., Zhu, B., Li, H., Liu, Z., & Yi, L. (2024). Soil quality assessment of tobacco field based on minimum data set in southwest Guizhou Autonomous Prefecture. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, *53*(7), 100. https://doi.org/10.15933/j.cnki.1004-3268.2024.07.011.

MATLAB R2015b. 2015. Software for technical computing and model-based design. The Mach Works Ins, USA.

Mirkhani, R. (2020*). Investigation of soil quality indices and their spatial variations in agricultural lands of Alborz province*. Faculty of Agriculture, Zanjan University, Zanjan, Iran.(In Persian with English abstract). https://doi.org/10.29252/jstnar.23.1.3

Mirkhani, R., Bybordi, A., Saadat, S., Rezaei, H., & Esmaeelnejad, L. (2024). Evaluation of the soil quality of the lands under irrigated wheat cultivation in Tabriz plain. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *54*(12), 1981-1994. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.363792.669555

Mirkhani, R., Vaezi, A. R., & Rezaei, H. (2020). Investigation of the soil quality indices in irrigated wheat farms of Nazarabad region in west of Alborz province. *Water and Soil*, *34*(5), 1125-1139. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.v34i5.85526 24.

Mirkhani, R., Vaezi, A. R., & Rezaei, H. (2021). Spatial distribution of soil quality in Savojbolagh fields in Alborz province. *Applied Soil Research*, *9*(2), 1-14. (In Persian with English abstract)

Nikpey, M., Robatjazi, J., Garmehei, S., Lasar, H. G. W., Nghia, N. K., & Agyei, B. K. (2024). Assessment of Agricultural Soil Quality Indices Using Mechanistic Models. *Journal of Soil Science*, *14*, 333-352. https://doi.org/10.4236/ojss.2024.146019.

Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. 939pp.

Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (1982). Methods of Soil Analysis, part 2, chemical and microbiological properties. American Society of Agronomy, Inc. Soil Science Society of America. Madison, WI.

Qi, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W., & Gu, Z. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. *Geoderma*, 149(3): 325-334. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015.

Rahmanipour, F., Marzaioli, R., Bahrami, H. A., Fereidouni, Z., & Bandarabadi, S. R. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. *Ecological Indicators*, 40: 19-26. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003.

Sánchez-Navarro, A., Gil-Vázquez, J. M., Delgado-Iniesta, M. J., Marín-Sanleandro, P., Blanco- Bernardeau, A., & Ortiz-Silla, R. (2015). Establishing an index and identification of limiting parameters for characterizing soil quality in Mediterranean ecosystems. *Catena*, 131: 35-45. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.02.023.

Walkley, A., Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science,* 37, 29-37.