Geostatistical Analysis of Soil Penetration Resistance and Shear Strength in Fandoghloo Region of Ardabil

Shokrollah Asghari [a,*], Hossain Shahab Arkhazloo [b], Mahsa Hasanpour Kashani [c]

[a]*Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[b]*Associate Professor, Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*
[c]*Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran*

Research Full Paper
Article History (Received: 01/03/2024 Accepted: 04/05/2024)

Extended abstract

1- Introduction

Soil penetration resistance (PR) and soil shear strength (SS) are used to evaluate soil erodibility. Some soil properties such sand, silt, clay, bulk and particle density, total porosity, organic carbon and $CaCO_3$ and also some land characteristics such as percentage and direction of slope, altitude, type and density of vegetation can affect SS and PR. For example, PR values exceed 2.5 MPa, while root elongation is significantly restricted. Most of soil properties have temporal and spatial variabilities. Therefore, it is necessary to use geostatistical methods to simultaneously use quantitative information and geographic location of variables. The forest, range and cultivated soils of Fandoghloo region of Ardabil are located in sloping lands and are subject to erosion. Therefore, it is necessary to know the state of spatial variability of soil SS and PR as two important indicators affected by compaction and also effective on soil erosion in the mentioned area. The main objectives of this research were: 1) Investigating the spatial variabilities and drawing maps of soil SS and PR in forest, range and cultivated lands of Fandoghloo region of Ardabil, 2) Investigating the correlations between soil SS and PR with other soil characteristics in the study area, 3) Determining semivariogram parameters such as semivariogram models, spatial dependence classes and effective range for soil variables, 4) Comparison of the accuracy of geostatistical methods (ordinary kriging (OK) and inverse distance weighting (IDW)) in the interpolation of SS and PR.

2- Methodology

This study was conducted in the forest, range and cultivated lands of Fandoghloo region of Ardabil located at the 25 km of Ardabil city, northwest of Iran (48° 32′ 45″ to 48° 33′ 5″ E and 38° 24′ 10″ to 38° 24′ 25″ N) at summer 2023. Totally, 80 geo-referenced samples were taken from 0-10 cm soil depth with 50×50 m intervals (15 ha) in cultivated (n=37), range (n=23) and forest (n=20) land uses. Sand, silt, clay, organic carbon (OC) and particle density (PD) were measured in the disturbed soil samples. Bulk density (BD) and field water content (FWC) were measured in the undisturbed soil samples taken by steal cylinders with 5 cm diameter and height. Total porosity was calculated using BD and PD. Soil penetration resistance (PR) was directly measured in the field at three replicates using a cone penetrometer. Soil shear strength (SS) was obtained using shear vane in saturation condition in the field at three replicates. The best fitted semivariograms model (Gaussian, spherical and exponential) was chosen by considering the minimum residual sum of square (RSS) and maximum determination coefficient (R^2) for soil variables. Ordinary Kriging (OK) and inverse distance weighting (IDW) interpolation methods were used to analyze spatial variability of soil SS and PR. Spatial distribution maps of soil variables were provided by Arc GIS software. Normality test of data by Kolmogorov–Smirnov test and Pearson correlations were done using SPSS software. Figures were prepared using Excel software. The accuracy of OK and IDW methods in estimating soil SS and PR was evaluated by mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE) and concordance correlation coefficient (CCC)

* **Corresponding Author: shokrollah.asghari@gmail.com**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

criteria. The CCC indicates the degree to which pairs of the measured and estimated parameter value fall on the 45° line through the origin.

3- Results & Discussion

According to the results of coefficient of variation (CV) from the study area, the most variable (CV=58.3 %) soil indicator was PR in range land use, whereas the least variable (CV= 3.95 %) was PD in cultivated land use. The Pearson correlation coefficient (*r* value) indicated that there are significant correlations between OC with sand (r=0.59) and FWC (r=0.78) and between PR with SS (r=0.31). Also, significant correlations were found between PR with FWC (r=-0.45) and silt (r=-0.36) and between SS with OC (r=0.38), sand (r=0.48) and silt (r=-0.34). The spatial dependency classes of soil variables were determined according to the ratio of nugget variance to sill expressed in percentages: If the ratio was >25% and <75%, the variable was considered moderately spatially dependent; if the ratio was >75%, variable was considered weakly spatially dependent; and if the ratio was <25%, the variable was considered strongly spatially dependent. The strong spatial dependences with the effective ranges of 752 m was found for PR. The medium spatial dependences with the effective ranges of 787 m was obtained for SS. The silt and FWC variables had the least (636 m) and the highest (2282 m) effective range, respectively. The range of influence indicates the limit distance at which a sample point has influence over another points, that is, the maximum distance for correlation between two sampling point. The models of fitted semivariograms were Gaussian for PR and spherical for SS. The high values of CCC and low values of RMSE values indicated the more precision and high accuracy of OK compared with IDW interpolation method in estimating PR in the studied area. According to the RMSE and CCC values, IDW was better than OK to predict SS. Generally, the spatial maps showed that the highest values of soil PR were observed in range land use and the lowest values of soil SS were observed in cultivated land use of the study area.

4- Conclusions

Results showed that PR negatively related to the silt and FWC. Also, SS negatively related to the silt and positively related to the sand and OC. The strong spatial dependency was found for PR and medium spatial dependency was determined for SS in the studied area. The silt revealed the smallest effective range (636 m) among the studied variables. As a suggestion, for subsequent study, soil sampling distance could be taken as 636 m instead of 50 m in order to save time and minimize cost.

Key Words: Geostatistics, Spatial variability, Soil resistance, Semivariogram, Sloped lands**.**

Cite this article: Asghari, Sh., Shahab Arkhazloo, H., & Hasanpour Kashani, M. (2024). Geostatistical analysis of soil penetration resistance and shear strength in Fandoghloo region of Ardabil. *Journal of Environmental Erosion Research. 2024; 14 (2) :106-125*. http//doi.org/

© The Author(s).
DOI: http//doi.org/
Published by Hormozgan University Press.
URL: http://magazine.hormozgan.ac.ir

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

تحلیل زمین آماری مقاومت‌های فروروی و برشی خاک در منطقه فندقلوی اردبیل

شکراله اصغری*: *استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*
حسین شهاب آرخازلو: *دانشیار گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*
مهسا حسنپور کاشانی: *استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل*

نوع مقاله: پژوهشی
تاریخچهٔ مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵)
DOI: http//doi.org/

چکیده

هدف از این پژوهش مطالعه تغییرات مکانی مقاومت فروروی (PR) و مقاومت برشی خاک (SS) در اراضی شیبدار منطقه فندقلوی اردبیل بود. نمونه‌های خاک دست‌خورده و دست‌نخورده از سه کاربری جنگلی (۲۰ نمونه)، مرتعی (۲۳ نمونه) و زراعی (۳۷ نمونه) به‌هم چسبیده (۱۵ ha) برای تعیین برخی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی به‌صورت شبکه‌های تقریباً منظم ۵۰×۵۰ m از منطقه مذکور در تابستان ۱۴۰۲ برداشته شدند. متغیرهای PR و SS به‌صورت درجا در محل به‌ترتیب با استفاده از دستگاه‌های فروسنج مخروطی عقربه‌ای و پره برشی تعیین شد و همزمان رطوبت خاک مزرعه (FWC) در نمونه‌های دست‌نخورده اندازه‌گیری شد. همچنین برخی ویژگی‌های خاک مانند کربن آلی، شن، سیلت، رس، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و تخلخل کل تعیین گردید. از روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای بررسی زمین‌آماری متغیرهای خاک استفاده شد. همبستگی‌های منفی و معنی‌دار بین PR با سیلت و FWC و مثبت و معنی‌دار بین SS با شن و کربن آلی مشاهده شد. متغیر PR دارای بیشترین تغییرپذیری (CV= 58.3 %) در اراضی مرتعی و متغیر سیلت دارای کمترین دامنه تأثیر (۶۳۶ m) نسبت به سایر متغیرهای خاک بود لذا توصیه می‌شود در مطالعات بعدی، فواصل نمونه‌برداری خاک به‌جای ۵۰ متر، ۶۳۶ متر در نظر گرفته شود. مدل نیم‌تغییرنمای گوسی و کروی با وابستگی مکانی قوی و متوسط به‌ترتیب برای PR و SS به‌دست آمد. براساس آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تطابق (CCC)، روش OK به‌علت داشتن RMSE کمتر و CCC بیشتر در مقایسه با روش IDW دارای صحت بالاتری در برآورد PR بود، ولی در درون‌یابی SS، روش IDW در مقایسه با روش OK دقیق‌تر عمل نمود. نقشه تغییرات مکانی نشان داد بیشترین مقادیر PR و SS در کاربری مرتعی و کمترین مقادیر آن‌ها در کاربری زراعی منطقه مورد مطالعه وجود داشت.

واژگان کلیدی: اراضی شیبدار، تغییرات مکانی، زمین آمار، مقاومت خاک، نیم‌تغییرنما.

* نویسندهٔ مسئول: **shokrollah.asghari@gmail.com**

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

۱ـ مقدمه

مقاومت برشی[1] (SS) و مقاومت فروروی[2] (PR) خاک از جمله شاخص‌هایی هستند که در ارزیابی فرسایش‌پذیری خاک کاربرد دارند. برخی ویژگی‌های خاک مانند شن، سیلت و رس، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی، تخلخل کل، کربن آلی، آهک و نیز برخی ویژگی‌های زمین مانند پستی و بلندی، درصد و جهت شیب، ارتفاع محل، نوع و تراکم پوشش گیاهی بر مقاومت‌های برشی و فروروی خاک اثر می‌گذارند. به‌طور مثال، نتایج پژوهش Asghari and Shahab Arkhazloo (2020) در اراضی شیبدار گردنه حیران استان اردبیل نشان داد که رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار بین جرم مخصوص ظاهری با مقاومت فروروی خاک (r=0.69) و کربن آلی با مقاومت برشی خاک (r=0.74) و نیز رابطه همبستگی منفی و معنی‌دار بین کربن آلی با مقاومت فروروی (r=-0.30) و جرم مخصوص ظاهری با مقاومت برشی (r=-0.59) وجود دارد. مقاومت فروروی خاک از ویژگی‌های مکانیکی پویای خاک محسوب می‌شود و آگاهی از آن از نظر رشد و گسترش ریشه گیاه، فعالیت بیولوژیکی، هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری خاک و تولید روان‌آب و فرسایش خاک به‌ویژه در اراضی شیبدار حائز اهمیت فراوان است. Asghari و همکاران (2017) مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین مقاومت فروروی خاک را در ۱۰۵ نمونه خاک برداشته شده از دشت اردبیل به‌ترتیب ۱/۱، ۶/۶ و ۲/۸۶ مگلپاسکال گزارش کردند. در پژوهش نامبردگان، رابطه همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مقاومت فروروی با جرم مخصوص ظاهری، سیلت، رس و آهک و رابطه همبستگی منفی و معنی‌دار بین مقاومت فروروی خاک با شن، تخلخل کل، رطوبت خاک مزرعه و کربن آلی یافت شد. Khalilmoghadam و همکاران (2009) از پارامترهای خاک (شن، سیلت، رس، کربن آلی و آهک) و پارامترهای توپوگرافی زمین (درصد و جهت شیب و ارتفاع محل) و پارامتر پوشش گیاهی (شاخصNDVI) برای تخمین مقاومت برشی خاک سطحی در منطقه زاگرس واقع در مرکز ایران استفاده کردند. نتایج نشان داد ویژگی‌های مربوط به شیب و پوشش گیاهی از حساس‌ترین متغیرها در برآورد مقاومت برشی خاک در منطقه مورد مطالعه بودند. Besalatpour و همکاران (2012) از ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی برای برآورد مقاومت برشی خاک در حوزه آبخیز بازفت استفاده کردند. آن‌ها مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین مقاومت برشی خاک را در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب برابر با ۳/۳۳، ۹/۷۰ و ۶/۳۴ کیلوپاسکال به‌دست آوردند. در پژوهش نامبردگان، ۵ پارامتر شن خیلی ریز، شن ریز، درصد شن، شاخص NDVI و جهت شیب به‌عنوان متغیرهای بهینه برای برآورد مقاومت برشی خاک با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی تشخیص داده شد. Bayat و همکاران (2017) اثرات جهت شیب زمین (شمالی و جنوبی)، شدت چرا (آزاد، حفاظت شده و قرق) و مکان نمونه‌برداری (پایین تاج گیاه و مابین تاج گیاه) را بر منحنی مقاومت فروروی خاک در حوزهٔ آبخیز گنبد واقع در استان همدان مطالعه کردند. نتایج نشان داد که جهت شیب دارای بیشترین تأثیر معنی‌دار بر جرم مخصوص ظاهری و مقاومت فروروی خاک در مکش‌های ماتریک ۳۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال بود. منحنی مقاومت فروروی در شیب جنوبی در مقایسه با شیب شمالی به دلیل مقادیر پایین کربن آلی و نیز مقادیر بالای ذرات درشت در موقعیت بالاتری قرار گرفت. همچنین مقاومت فروروی خاک با شدت چرای دام رابطهٔ مستقیم نشان داد به طوری که منحنی مقاومت فروروی در تیمارهای

[1] Shear Strength
[2] Penetration Resistance

* نویسندهٔ مسئول: shokrollah.asghari@gmail.com

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

چرای آزاد و حفاظت شده در مکش‌های زیر ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در موقعیت بالاتر نسبت به تیمار قرق قرار گرفت. در پژوهش Asghari and Abdolhossainzadeh Namin (2019) بین مقاومت فروروی با جرم مخصوص ظاهری خاک، همبستگی مثبت و معنی‌دار ولی بین مقاومت فروروی با کربن آلی و رطوبت خاک مزرعه (در لحظهٔ اندازه‌گیری مقاومت فروروی)، همبستگی منفی و معنی‌دار در پارک جنگلی فندقلوی اردبیل به‌دست آمد. همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش سطح تردد گردشگر، مقدار جرم مخصوص ظاهری و نیز مقاومت فروروی خاک جنگلی افزایش یافت اگرچه این افزایش فقط در تیمار تردد شدید نسبت به شاهد معنی‌دار بود.

اغلب ویژگی‌های خاک دارای تغییرات زمانی و مکانی هستند. مدیریت اراضی کشاورزی براساس داده‌های مجزا تقریباً ناممکن بوده و ضروری است این داده‌ها به صورت پیوسته ارائه شوند. بنابراین، لازم است روش‌های تحلیل آمار مکانی داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد تا همزمان اطلاعات کمی و موقعیت جغرافیایی متغیرها نیز به کار گرفته‌شود. منشأ اولیهٔ تغییر در ویژگی‌های خاک به عوامل خاک‌زایی برمی‌گردد، درحالی‌که منشأ ثانویه این تغییرات به تأثیر تغییر کاربری و مدیریت متفاوت اراضی مربوط می‌شود. با استفاده از زمین‌آمار می‌توان متغیری از خاک را در نقطه‌ای که نمونه‌برداری نشده است با به کارگیری اطلاعات نقاط نمونه‌برداری شده تخمین زد. برای این منظور از سامانهٔ اطلاعات جغرافیایی[1] (GIS) می‌توان بهره برد که این سامانه قادر است مقادیر زیادی از اطلاعات و داده را با هزینه بسیار کم و سرعت خیلی زیاد نگهداری و بازیابی کند. برای انجام دادن درون‌یابی مکانی متغیر مورد نظر (مثلاً یک ویژگی خاک) در زمین آمار از نیم‌تغییرنما[2] استفاده می‌شود. در واقع نیم‌تغییرنما رابطهٔ بین فاصله (h) و واریانس داده‌ها را نشان می‌دهد و با ضرایب استخراج شده از آن می‌توان تغییرات مکانی متغیرهای خاک را تجزیه و تحلیل نمود. هر نیم‌تغییرنما از سه ضریب اثر قطعه‌ای[3] (C_0)، دامنهٔ تأثیر[4] و آستانه[5] ($C+C_0$) تشکیل یافته است. اگر نسبت واریانس قطعه‌ای به آستانه برای یک متغیر کمتر از ۰/۲۵ باشد متغیر مورد نظر از ساختار مکانی قوی برخوردار است و اگر این نسبت بین ۰/۲۵ تا ۰/۷۵ باشد ساختار مکانی آن متوسط و اگر بیش از ۰/۷۵ باشد ساختار مکانی آن ضعیف است (Cambardella et al., 1994). از روش‌های زمین آماری معروف و پرکاربرد برای مطالعهٔ تغییرات مکانی متغیرهای خاک می‌توان به روش کریجینگ معمولی[6] (OK) و روش وزن‌دهی عکس فاصله[7] (IDW) اشاره کرد.

نتایج مطالعه مزرعه‌ای Kilic و همکاران (2004) نشان داد که تغییرات مکانی مقاومت فروروی خاک در خاک لوم رسی متاثر از مقادیر شن، رس و جرم مخصوص ظاهری ولی در خاک لوم متاثر از مقادیر رطوبت خاک مزرعه و جرم مخصوص ظاهری خاک بود. Barik و همکاران (2014) بیان کردند تردد ماشین‌آلات کشاورزی از طریق فشردگی خاک موجب شد جرم مخصوص ظاهری خاک به مقدار ۸/۶ درصد افزایش و تخلخل کل خاک به مقدار ۸/۹ درصد کاهش یافته و در نتیجه باعث افزایش مقاومت فروروی خاک به مقدار ۴۳/۳ درصد گردید. Asghari و همکاران (2017) تغییرات مکانی ویژگی‌های مکانیکی خاک را در دشت اردبیل با استفاده از زمین آمار مطالعه کردند. نتایج

[1] Geographic Information System
[2] Semivariogram
[3] Nugget
[4] Range
[5] Sill
[6] Ordinary Kriging
[7] Inverse Distance Weighting

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

نشان داد که در منطقه مورد مطالعه، مقاومت فروروی خاک از مدل نیم‌تغییرنمای گوسی پیروی نموده، دارای وابستگی مکانی متوسط و دامنه تاثیر ۲۶۰۳۰ متر بود؛ همچنین روش کریجینگ در مقایسه با روش وزن‌دهی عکس فاصله از دقت‌بالایی در تخمین مقاومت فروروی خاک برخوردار بود. نقشه‌های زمین‌آماری نیز نشان داد که مقادیربالای مقاومت فروروی خاک (>2.4 MPa) در غرب و برخی قسمت‌های جنوب شرق که عمدتاً به سمت جنوب غرب و شمال غرب منطقه مورد مطالعه امتداد دارد، مشاهده شد. این مناطق دارای جرم مخصوص ظاهری نسبتاً بالا و رطوبت مزرعه، شن و تخلخل کل پایین بودند. آن‌ها گزارش کردند اگر مقاومت فروروی خاک از ۲ مگاپاسکال فراتر رود موجب محدودیت در رشد و گسترش ریشهٔ گیاه خواهد شد. بنابراین، نقشهٔ توزیع مکانی می‌تواند به تشخیص خطر فشردگی خاک در اثر عملیات کشاورزی کمک کند. نتایج پژوهش Asghari and Shahabi (2019) در اراضی متاثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه نشان داد که ضریب تغییرات (CV) مقاومت فروروی (PR) برابر با ۴۵/۸۲ و ۴۶/۸۳ درصد به ترتیب در کاربری‌های بایر و کشاورزی بود که بیانگر تغییرپذیری بالای این متغیر در منطقهٔ مورد مطالعه است. همچنین آن‌ها بیان کردند مقاومت فروروی خاک از مدل نیم‌تغییرنمای تجربی نمایی تبعیت نموده، دارای وابستگی مکانی قوی و دامنه تاثیر ۳۳۵ متر بوده و از کاربری کشاورزی به سمت کاربری بایر و با نزدیک شدن به رسوبات دریاچه ارومیه، با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، مقادیر مقاومت فروروی نیز افزایش پیدا کرد.

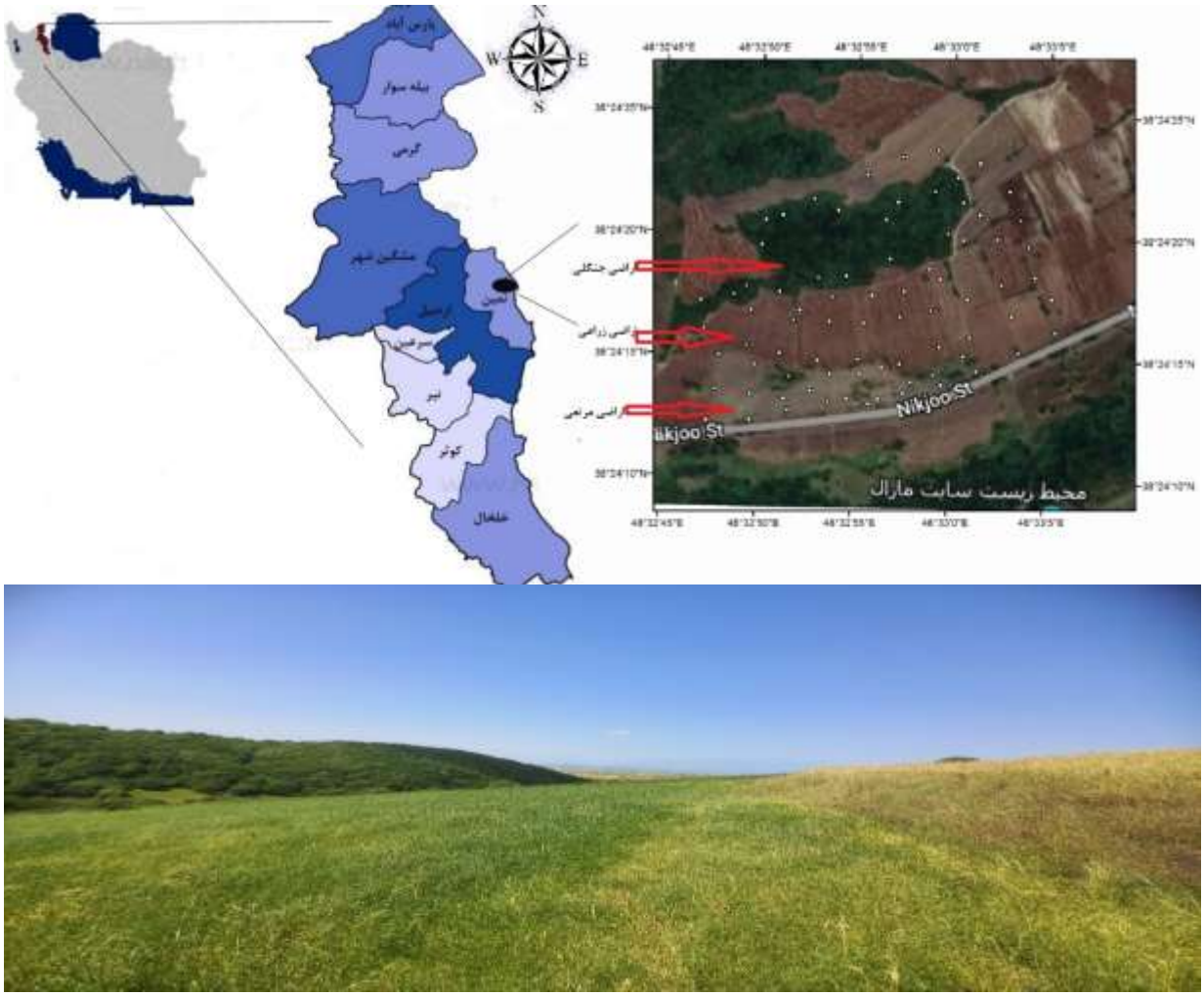
خاک‌های جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل در اراضی شیبدار واقع شده و در معرض فرسایش قرار دارند؛ از سوی دیگر، به‌علت توریستی بودن منطقه، تردد زیاد و اتراق گردشگران و نیز چرای بی‌رویه دام‌های سنگین (گاو و گاومیش)به‌ویژه در مواقع‌بارندگی و مرطوب بودن خاک، منجربه فشردگی خاک می‌گردد. اگرچه مطالعه محدودی در خصوص اثر تردد گردشگر بر برخی‌پارامترهای نفوذ آب و مقاومت فروروی خاک تنها در کاربری جنگلی (پارک جنگلی فندقلو) توسط Asghari and Abdolhossainzadeh Namin (2019) انجام شده ولی بر اساس اطلاعات موجود نقشه تغییرات مکانی مقاومت‌های فروروی و برشی خاک در کاربری‌های جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل به‌طور همزمان تهیه و بررسی نشده است بنابراین اطلاع از وضعیت تغییرات مکانی مقاومت‌های فروروی و برشی خاک به‌عنوان دو شاخص برجسته متاثر از فشردگی و نیز مؤثر بر فرسایش خاک در منطقه مذکور ضروری به‌نظر می‌رسد. اهداف اصلی این پژوهش عبارت بودند از: ۱) بررسی تغییرات مکانی و ترسیم نقشه مقاومت‌های فروروی و برشی خاک در سه کاربری به‌هم چسپیده جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل. ۲) بررسی همبستگی بین مقاومت‌های فروروی و برشی با سایر ویژگی‌های خاک در منطقه مورد مطالعه. ۳) تعیین پارمترهای نیم‌تغییرنما مانند مدل نیم‌تغییرنما، کلاس وابستگی مکانی و دامنه تاثیر برای متغیرهای خاک. ۴) مقایسه دقت روش‌های زمین آماری (کریجینگ و وزن دهی عکس فاصله) در درون‌یابی مقاومت‌های فروروی و برشی خاک.

۲ـ منطقهٔ مورد مطالعه

این پژوهش در شرق استان اردبیل واقع در اراضی شیبدار منطقه فندقلو با فاصله حدود ۲۵ کیلومتری از شهرستان اردبیل (مختصات جغرافیایی ″۴۵ ′۳۲ °۴۸ تا ″۵ ′۳۳ °۴۸ طول شرقی و ″۱۰ ′۲۴ °۳۸ تا ″۲۵ ′۲۴ °۳۸ عرض شمالی) انجام شد (شکل ۱).

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی، نقشه توزیع نقاط نمونه‌برداری و تصویر منطقه مورد مطالعه.

۳ـ مواد و روش‌ها

۳-۱- نمونه‌برداری خاک

در این پژوهش سه کاربری چسپیده به‌هم به مساحت حدود ۱۵ هکتار (۴۴۸×۳۴۱ m^2) شامل اراضی جنگلی (غالباً درختان فندق)، اراضی مرتعی و اراضی زراعی (غالباً زیر کشت گندم و جو) انتخاب گردید سپس ۲۰ نمونه از کاربری جنگلی، ۲۳ نمونه از کاربری مرتعی و ۳۷ نمونه از کاربری زراعی (جمعاً ۸۰ نمونه خاک) از عمق ۰ تا ۱۰cm خاک در قالب شبکه نسبتاً منظم ۵۰×۵۰ m (شکل ۱) با ثبت مختصات جغرافیایی هر نقطه در تابستان سال ۱۴۰۲ برداشته شد. نمونه‌برداری خاک در هر سه کاربری به صورت دست‌خورده با بیلچه و دست‌نخورده با استفاده از استوانه‌های استیل به قطر و ارتفاع ۵ cm انجام گرفت.

۳-۲- اندازه‌گیری ویژگی‌های خاک

نمونه‌های خاک پس از انتقال به آزمایشگاه به مدت دو هفته هواخشک شده سپس نمونه‌های دست‌خورده از الک ۲ mm گذرانده شدند. کربن آلی به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1982)، توزیع اندازه ذرات شن،

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

سیلت و رس و کلاس‌بلفت خاک‌به روش هیدرومتری چهار قرائته (Gee and Or, 2002) لندازه‌گیری شد. جرم مخصوص ظاهری (BD) به روش نمونه دست‌نخورده (Blake and Hartge, 1986a) و رطوبت خاک مزرعه (FWC) به روش وزنی (Gardner, 1986) هر دو در استوانه‌های استیل اشاره شده در بالا تعیین شد. جرم مخصوص حقیقی (PD) به روش پیکنومتر (Blake and Hartge, 1986b) و تخلخل کل از روی داده‌های BD و PD (Danielson and Sutherland, 1986) به‌دست آمد. مقاومت فروروی (PR) در عمق ۰ تا ۱۰cm خاک به صورت درجا با استفاده از یک فروسنج مخروطی مدل عقربه‌ای ساخت شرکت اکجل‌کمپ هلند در سه تکرار در محل و همزمان با نمونه‌برداری خاک دست‌نخورده تعیین شد (Lowery and Morrison, 2002). مقاومت برشی (SS) در خاک سطحی به صورت درجا در محل با استفاده از دستگاه پره برشی آمریکایی در شرایط اشباع در سه تکرار اندازه‌گیری شد (Khalilmoghadam et al., 2009).

۳-۳- تجزیه و تحلیل‌های آماری و زمین‌آماری

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها با آزمون کولموگروف – اسمیرنوف، پارامترهای آمار کلاسیک و ضریب همبستگی پیرسون بین داده‌ها با نرم‌افزار SPSS 22 محاسبه شد. تجزیه‌های نیم تغییرنما برای ارزیابی توزیع تغییرات مکانی SS و PR و نیز برخی متغیرهای فیزیکی و شیمیایی خاک در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Arc GIS انجام گرفت. نیم‌تغییرنمای تجربی تابعی است که به صورت زیر محاسبه می‌شود (Goovaerts, 1997):

رابطهٔ ۱

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

در رابطه ۱، N(h) تعداد جفت نمونه‌های خاک در فاصله h از یکدیگر، $Z(x_i)$ مقدار لندازه‌گیری شده و $Z(x_i + h)$ مقدار اندازه‌گیری شده متغیر موردنظر که به فاصله h از $Z(x_i)$ قرار دارد، است.

هر نیم تغییرنما از سه پارامتر اثر قطعه‌ای، دامنه تاثیر و حد آستانه یا سقف تشکیل شده است. مقدار نیم‌تغییرنما به ازای فاصله صفر (h=0) را اثر قطعه‌ای می‌گویند که معمولاً ناشی از وجود مؤلفه‌های تصادفی در توزیع متغیر، خطاهای نمونه‌برداری، آماده‌سازی، آزمایشگاهی و آنالیز است. با افزایش h مقدار نیم تغییرنما تا فاصله معینی اضافه شده سپس به حد ثابتی می‌رسد که این فاصله را دامنه تأثیر و مقدار نیم تغییرنما که ثابت شده را حد آستانه گویند (Goovaerts, 1997). بهترین مدل برازش یافته به نیم‌تغییرنما (گوسی، کروی، نمایی و خطی) با در نظر گرفتن کمترین مقدار مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و نیز بیشترین ضریب تبیین (R^2) انتخاب گردید. در این پژوهش از روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) جهت بررسی تغییرات مکانی متغیرها استفاده شد. نقشه تغییرات مکانی متغیرهای خاک با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS ترسیم شد.

برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش درون‌یابی، از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطا (ME) و میانگین قدر مطلق خطا (MAE) استفاده شد (Isaaks and Srivastava, 1989):

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

رابطهٔ ۲

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2}{n}}$$

رابطهٔ ۳

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_{i(p)} - Y_{i(m)}}{n}$$

رابطهٔ ۴

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left|(Y_{i(p)} - Y_{i(m)})^2\right|}{n}$$

در روابط ۲، ۳ و ۴، $Y_{i(m)}$ و $Y_{i(p)}$ به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده PR و SS توسط روش و n تعداد داده‌ها برای PR و SS در هر روش درون‌یابی می‌باشد.

همچنین ضریب تطابق[1] (CCC) برای ارزیابی مقدار مطابقت مقادیر لندازه‌گیری و برآورد شده SS و PR با استفاده از معادله لین (Lin, 1989) محاسبه شد:

رابطهٔ ۵

$$\rho_c = \frac{2\rho\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\mu_x - \mu_y)^2}$$

که در آن ρ_c ضریب تطابق (CCC) برآورد شده، ρ ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر، σ_x و σ_y به‌ترتیب واریانس مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر، μ_x وμ_y به‌ترتیب میانگین مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر می‌باشد. معیار CCC مقدار درجه‌ای را نشان می‌دهد که جفت مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده متغیر در اطراف خط ۴۵ درجه از مبدأ قرار می‌گیرند.

۴- یافته‌ها (نتایج) و بحث

۴-۱- آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک

توصیف آماری متغیرهای اندازه‌گیری شده در خاک منطقه مورد مطالعه به تفکیک کاربری اراضی جنگلی، مرتعی و زراعی در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود میانگین کربن آلی در کاربری زراعی ۱/۴۲ درصد بوده که در حدود ۷۱ درصد کمتر از کاربری جنگلی (۴/۹۲٪) و حدود ۵۸ درصد کمتر از کاربری مرتعی (۳/۴٪) می‌باشد که دلیل آن را می‌توان به تجزیه مواد آلی خاک در اثر عملیات شخم و نیز شخم موازی شیب اراضی تپه‌ای منطقه فندقلو و در نتیجه تلفات ماده آلی ارزشمند خاک در اثر فرسایش نواری در جهت شیب زمین نسبت داد. کمترین مقدار جرم مخصوص ظاهری به مقدار g/cm^3 ۰/۸۴ در کاربری جنگلی و بیشترین مقدار جرم مخصوص ظاهری به مقدار g/cm^3 ۱/۳۵ در کاربری زراعی به‌دست آمد (جدول ۱).

[1] Concordance Correlation Coefficient

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

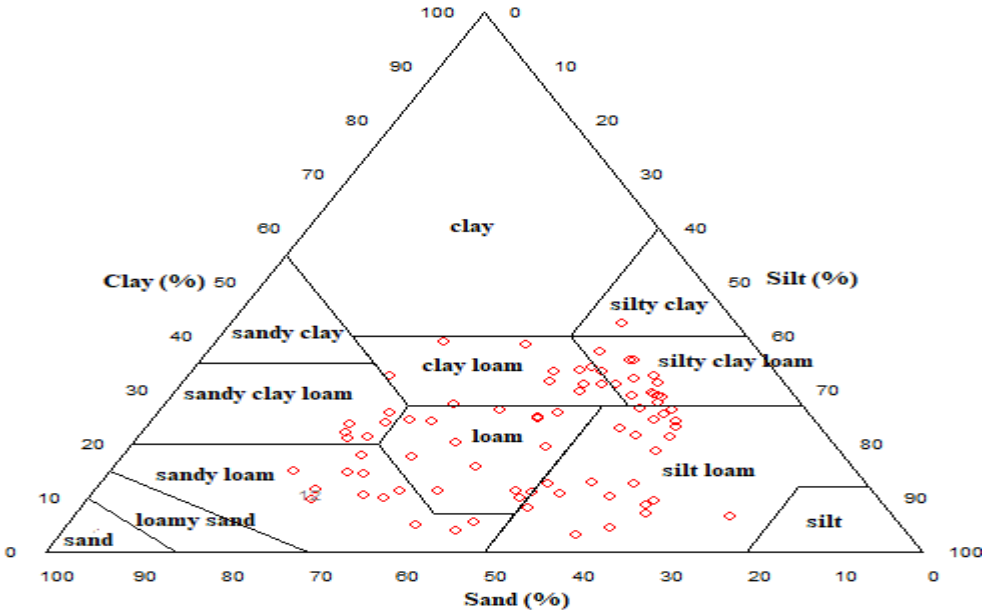
جدول ۱ : آماره‌های توصیفی متغیرهای خاک در سه کاربری منطقه مورد مطالعه.

متغیر	کاربری	میانگین	حداقل	حداکثر	ضریب تغییرات (٪)
مقاومت فروروی PR (MPa)	جنگلی	۱/۶۶	۱/۰۳	۲/۲۳	۲۱/۶۲
	مرتعی	۲/۸۴	۱/۳	۵/۸۳	۵۸/۳۳
	زراعی	۱/۱	۲/۹	۲/۲۳	۲۳/۴
مقاومت برشی SS (kg/cm^2)	جنگلی	۱/۷۱	۱/۱۳	۲/۴	۲۱/۹۳
	مرتعی	۱/۸۱	۰/۵۷	۳/۲۶	۳۱/۷۸
	زراعی	۱/۲۵	۰/۷۷	۱/۸۷	۲۰/۶۱
کربن آلی OC (٪)	جنگلی	۴/۹۲	۱/۵۶	۷/۱۷	۳۱/۳
	مرتعی	۳/۴	۱/۴۸	۵/۳۸	۲۹/۴۶
	زراعی	۱/۴۲	۱/۰۱	۲/۱۸	۱۷/۹۱
شن S (٪)	جنگلی	۳۶/۶۱	۱۶/۲۳	۵۵/۱۷	۲۹/۴۱
	مرتعی	۵۰/۶۹	۲۵/۸۷	۶۴/۸	۱۸/۵۵
	زراعی	۲۰/۶۱	۱۳/۱۴	۳۴/۸۴	۲۷/۸۷
سیلت Si (٪)	جنگلی	۳۶/۶۲	۱۶/۲۲	۵۵/۱۷	۲۹/۴۱
	مرتعی	۵۰/۶۹	۲۵/۸۷	۶۴/۸	۱۸/۵۵
	زراعی	۲۰/۶۲	۱۳/۱۴	۳۴/۸۴	۲۷/۸۷
رس C (٪)	جنگلی	۱۰/۰۷	۲/۹۶	۲۷/۴۶	۵۶/۷۶
	مرتعی	۲۰/۴۱	۹/۶۷	۳۸/۹۲	۴۱/۲۶
	زراعی	۲۸/۱۶	۸/۵۸	۴۲/۱۸	۲۱/۸۱
جرم مخصوص ظاهری (g/cm^3) BD	جنگلی	۱/۰۷	۰/۸۴	۱/۳۱	۱۱/۶
	مرتعی	۱/۱۷	۰/۸۶	۱/۴۳	۱۴/۲۵
	زراعی	۱/۱۵	۰/۹۹	۱/۳۵	۸/۱۳
جرم مخصوص حقیقی (g/cm^3) PD	جنگلی	۲/۳	۲/۰۲	۲/۴۵	۴/۶۹
	مرتعی	۲/۴۱	۲/۰۱	۲/۶۸	۷/۳۸
	زراعی	۲/۵۲	۲/۲۸	۲/۶۵	۳/۹۵
تخلخل کل TP (cm^3/cm^3)	جنگلی	۰/۵۳	۰/۴۶	۰/۶۴	۹/۴
	مرتعی	۰/۵۱	۰/۳۹	۰/۶۲	۱۱/۹
	زراعی	۰/۵۲	۰/۴۳	۰/۵۷	۵/۰۲
رطوبت خاک مزرعه (%g/g) FWC	جنگلی	۳۸/۱	۲۴/۱۹	۵۰/۴۷	۱۵/۸۶
	مرتعی	۲۶/۳۱	۱۲/۶۷	۴۸/۲	۳۶/۵۱
	زراعی	۱۶/۶۳	۱۱/۵۸	۲۲/۷۵	۱۵/۵۸

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

نتایج مشابهی توسط Asghari and Shahab Arkhazloo (2020) در خصوص مقادیر کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک در اراضی شیبدار جنگلی و مرتعی گردنه حیران استان اردبیل نیز گزارش شده است. همچنین مشاهده می‌شود میانگین جرم مخصوص حقیقی در اراضی جنگلی کمتر از اراضی مرتعی و زراعی می‌باشد که باعث گردیده است میانگین تخلخل کل خاک در اراضی جنگلی نسبت به اراضی مرتعی و زراعی بالا باشد و این تغییرات با تغییر کربن آلی و جرم مخصوص ظاهری خاک در بین کاربری‌های مورد مطالعه همسو هستند (جدول ۱). براساس مثلث بافت خاک آمریکایی، خاک‌های مورد مطالعه دارای کلاس بافت لوم سیلتی (n= ۲۳)، لوم رسی سیلتی (n= ۱۴)، لوم (n= ۱۳)، لوم شنی(n= ۱۲)، لوم رسی (n= ۱۱)، لوم رسی شنی (n= ۶) و رسی سیلتی (n= ۱) بودند (شکل ۲). بنابراین خاک‌های واقع در منطقه مورد مطالعه عمدتاً متوسط تا ریزبلفت هستند. طبقه‌بندی Wilding and Dress (1983) برای ارزیابی تغییرات ویژگی‌های خاک براساس ضریب تغییرات (CV) آن‌ها مورد استفاده قرار گرفت: ۱) اگر CV کوچکتر از ۱۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری کمی دارد، ۲) اگر CV بین ۱۵ و ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری متوسط دارد، ۳) اگر CV بالای ۳۵ درصد باشد متغیر تغییرپذیری بالایی دارد. بنابراین مطابق جدول ۱، تغییرپذیری مقاومت فروروی (کاربری مرتعی) و رس (کاربری جنگلی و مرتعی) در منطقه مورد مطالعه بالا بود در حالی که جرم مخصوص ظاهری و حقیقی و تخلخل کل از تغییرپذیری کمی برخوردار بودند. با توجه به تأثیرپذیری بسیار بالای مقاومت فروروی از رطوبت خاک مزرعه در مقایسه با سایر ویژگی‌های خاک، شاید CV بالای رطوبت خاک مزرعه (٪ ۳۶/۵۱) در کاربری مرتعی از دلایل اصلی تغییرپذیری بالای (٪ ۵۸/۳۳) مقاومت فروروی در کاربری مذکور باشد (جدول ۱)؛ تغییرپذیری بالای رطوبت خاک نیز به‌علت وقوع بارش غیر منتظره در حین نمونه‌برداری خاک برخی نقاط در کاربری مرتعی منطقه مورد مطالعه در اواخر تیرماه ۱۴۰۲ بود. Asghari و همکاران (2017) در اراضی دشت اردبیل و Asghari and Shahabi (2019) نیز در اراضی متاثر از نمک اطراف دریاچه ارومیه، مقادیر بالای CV را برای PR گزارش کردند.



شکل ۲: توزیع بافت خاک در منطقه فندقلوی اردبیل براساس مثلث بافت آمریکایی.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

ضـرایب همبسـتگی پیرسـون (r) بین متغیرهای مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شـده اسـت. با توجه به این جدول مشـاهده می‌شـود همبسـتگی منفی و معنی‌دار بین مقاومت فروروی (PR) با رطوبت خاک مزرعه (r=-0.45**) و سـیلت (r=-0.36**) یافت شد. بنابراین در پژوهش حاضر، رطوبت خاک مزرعه و سیلت دو عامل مهم و تأثیرگذار در تغییرات مکانی مقاومت فروروی خاک بودند. می‌توان چنین استنباط نمود که با افزایش رطوبت خاک محل و نیز بالا رفتن سهم سـیلت در توزیع اندازه ذرات خاک به‌علت ایجاد حالت نرمی و سـستی در خاک، مقاومت فروروی خاک در برابر نفوذ فروسنج مخروطی کاهش یافته است؛ این نتایج با یافته‌های محققان قبلی مانند Asghari و همکاران (2017) و Asghari and Abdolhossainzadeh Namin (2019) در یک راستا می‌باشد.

جدول ۲: ضریب همبستگی پیرسون (r) بین متغیرهای مورد مطالعه (n=80).

Variable	SS	OC	S	Si	C	BD	PD	TP	FWC
PR	۰/۳۱**	-۰/۰۶	۰/۲۱	-۰/۳۶**	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۹	-۰/۰۳	-۰/۴۵**
SS	۱	۰/۳۸**	۰/۴۸**	-۰/۳۴**	-۰/۲۹**	-۰/۰۱	-۰/۲۲*	-۰/۱۷	۰/۳۰**
OC		۱	۰/۵۹**	-۰/۲۴*	-۰/۶۰**	-۰/۰۳	-۰/۵۷**	-۰/۰۶	۰/۷۸**
S			۱	-۰/۷۶**	-۰/۵۶**	-۰/۷۲**	-۰/۳۳*	-۰/۲۳*	۰/۴۴**
Si				۱	۰/۱۱	-۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۰۶	-۰/۰۷
C					۱	۰/۱۶	۰/۴۲**	۰/۰۷	-۰/۵۹**
BD						۱	۰/۴۲**	-۰/۷۰**	-۰/۴۱**
PD							۱	۰/۱۹	-۰/۶۳**
TP								۱	۰/۰۲

*و **: به‌ترتیب معنی دار در سطح احتمال۱ و ۵ درصد. توصیف علائم متغیرها در داخل جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۲ نشـان می‌دهد که همبسـتگی مثبت و معنی‌دار بین مقاومت برشـی (SS) با کربن آلی (r=0.38**) و شـن (r=0.48**) و همبسـتگی منفی و معنی‌دار بین SS با سیلت (r=-0.34**) وجود دارد. چنین به‌نظر می‌رسد که در اراضی شـیبدار جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه فندقلوی اردبیل، کربن آلی و شـن از عوامل اصـلی و مهم در افزایش مقاومت برشـی خاک اسـت که این نکته از نظر کاهش شـدت فرسـایش خاک در اراضـی شـیبدار حائز اهمیت فراوان می‌باشـد؛ همبستگی مثبت شن با کربن آلی (r=0.59**) در منطقه مورد مطالعه نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲). سیلت از عوامل اصلی فرسایش‌پذیری خاک محسوب می‌شود زیرا در مقایسه با رس و کربن آلی از چسپندگی کمی برخوردار بوده و در مقایسـه با شـن نیز از وزن کمی برخوردار اسـت (Refahi, 2017) بنابراین ارتباط منفی و معنی‌دار آن با مقاومت برشـی در پژوهش حاضـر قابل توجیه می‌باشـد. Asghari and Shahab Arkhazloo (2020) نیز در اراضـی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

شـیبدار جنگلی و مرتعی گردنه حیران اسـتان اردبیل، همبسـتگی مثبت و معنی‌دار بین مقاومت برشـی (SS) با کربن آلی($r=0.74^{**}$) و شن ($r=0.58^{**}$) را گزارش نمودند.

۲-۴- تحلیل زمین‌آماری متغیرهای خاک

بهترین مدل‌های برازش یافته نیم‌تغییرنماها براسـاس کمترین مجموع مربعات باقی‌مانده (RSS) و بالاترین ضـریب تبیین (R^2) و نیز پارامترهای هر مدل شـامل اثر قطعه‌ای، نسـبت اثر قطعه‌ای به سـقف، دامنه تأثیر و کلاس وابسـتگی مکانی برای متغیرهای خاک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: پارامترهای مدل‌های برازش شده به نیم‌تغییرنمای مقاومت فروروی، مقاومت برشی و برخی متغیرهای خاک.

متغیر	مدل	وابستگی مکانی	دامنه تأثیر (متر)	اثر قطعه ای	سقف	سقف/اثرقطعه ای	RSS	R^2
PR	گوسی	قوی	۷۵۲	۰/۸۴	۳/۶۹	۰/۲۳	۰/۱۳۲	۰/۶۶
SS	کروی	متوسط	۷۸۷	۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۰۰۳	۰/۸۰
FWC	نمایی	متوسط	۲۲۸۲	۹۵	۱۹۰	۰/۵	۵۹۸	۰/۵۸
OC	نمایی	متوسط	۸۱۱	۲/۴۹	۴/۹۹	۰/۴۹	۰/۵۴	۰/۴۲
S	کروی	قوی	۸۱۰	۱۰۸	۴۷۴	۰/۲۳	۶۷۳۷	۰/۸۴
Si	کروی	قوی	۶۳۶	۲۴	۳۵۸	۰/۰۷	۱۳۹۸	۰/۹۷

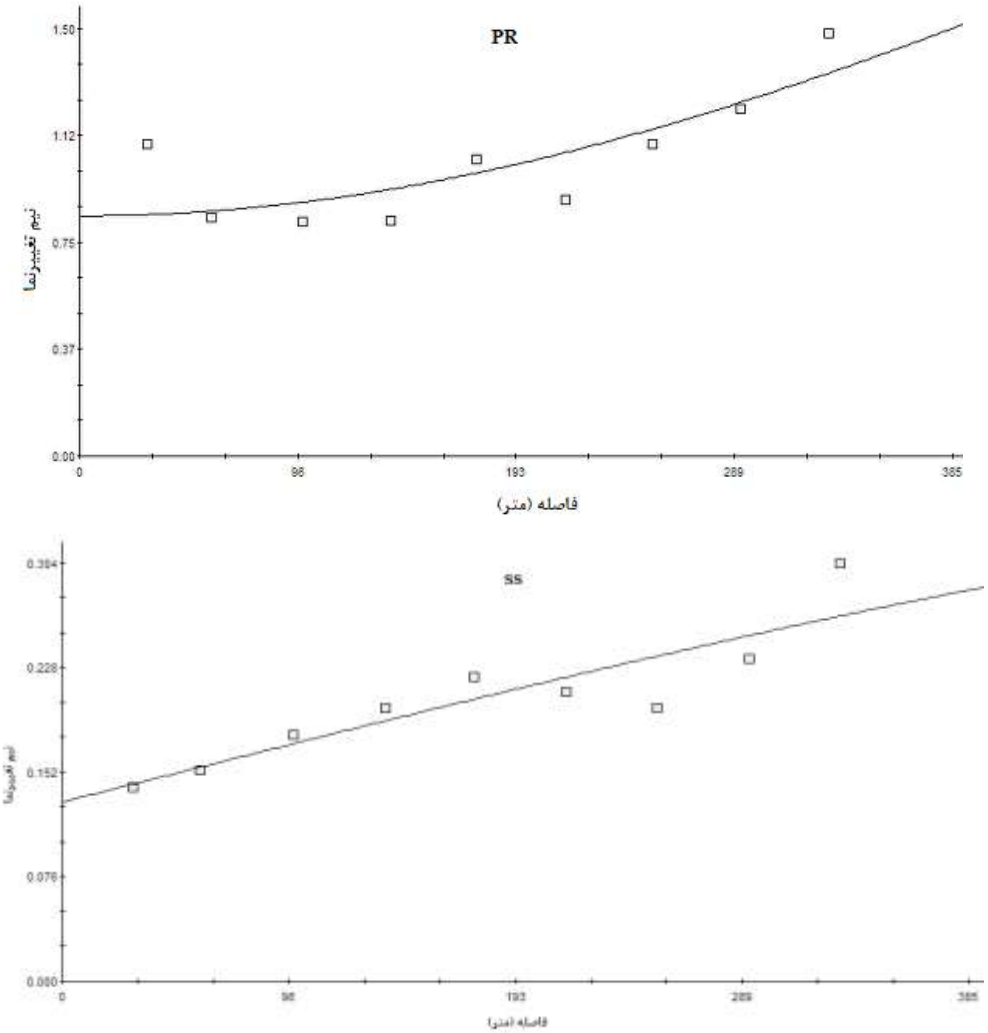
توصیف علائم متغیرها در جدول ۱ آورده شده است. R^2: ضریب تبیین؛ RSS: مجموع مربعات باقی‌مانده.

براسـاس تقسـیم‌بندی Cambardella و همکاران (1994)، اگر نسـبت اثر قطعه‌ای به سـقف کوچکتر از ۰/۲۵ باشـد متغیر دارای وابسـتگی مکانی قوی اسـت؛ اگر این نسـبت بین ۰/۲۵ و ۰/۷۵ باشـد متغیر دارای وابسـتگی مکانی متوسـط اسـت؛ اگر این نسـبت بزرگتر از ۰/۷۵ باشـد متغیر دارای وابسـتگی مکانی ضـعیف اسـت. بر این اسـاس، نیم‌تغییرنماهای حاصـل بیانگر وجود وابسـتگی مکانی متوسـط تا قوی برای همه متغیرهای مورد مطالعه می‌باشـند (جدول ۳). مدل کروی برای شـن، سـیلت و مقاومت برشـی، مدل گوسـی برای مقاومت فروروی و مدل نمایی برای کربن آلی و رطوبت خاک مزرعه (FWC) در منطقه مورد مطالعه برازش داده شد (جدول ۳). در شکل ۳، نیم‌تغییرنماهای برازش‌یافته برای مقاومت فروروی (PR) و مقاومت برشـی (SS) خاک به عنوان نمونه نشـان داده شـده اسـت. تعداد جفت نقاط لازم برای برآورد هر نقطه، حداقل ۸ و حداکثر ۱۶ تا براسـاس فاصـله و نیز کل نقاط لازم برای رسـم نیم‌تغییرنماها ۱۰ تا ۲۰ تا به روش سـعی و خطا تعیین شـد. در این پژوهش، رس، شـن و PR به علت داشـتن نسـبت اثر قطعه‌ای به سـقف کوچکتر از ۰/۲۵ (جدول ۳)، براساس تقسیم‌بندی Cambardella و همکاران (1994) دارای قوی‌ترین وابستگی مکانی بودند این در حالی اسـت که Kilic و همکاران (2004) و Asghari و همکاران (2017) همبسـتگی مکانی متوسـط را برای PR گزارش کردند. بنابراین به‌نظر می‌رسـد در پژوهش حاضـر عمدتاً عوامل ذاتی خاک مانند سـیلت در وابسـتگی مکانی PR دخالت داشـته‌اند؛ مطابق نظر Cambardella و همکاران (1994)، متغیرهای با وابسـتگی مکانی قوی‌تر توسـط تغییرپذیری ذاتی

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

خاک کنترل می‌شوند، در حالی‌که متغیرهای با وابستگی مکانی ضعیف‌تر توسط عوامل بیرونی مثل روش‌های مدیریتی و خاک‌ورزی کنترل می‌شوند.



شکل ۳: نیم تغییرنماها (نقاط) و مدل‌های برازش شده (خطوط) مقاومت فروروی (PR) و مقاومت برشی (SS) خاک.

کمترین مقدار دامنه تأثیر برای سیلت (۶۳۶ m) و بیشترین مقدار دامنه تأثیر برای FWC (۲۲۸۲ m) در منطقه مورد مطالعه (۴۴۸×۳۴۱ m^2) یافت شد همچنین دامنه تأثیر PR برابر با ۷۵۲ متر و دامنه تأثیر SS برابر با ۷۸۷ متر تعیین شد (جدول ۳). دامنه تأثیر PR توسط Asghari و همکاران (2017) برابر با ۲۶۰۳۰ متر در دشت اردبیل (42 × 24 km) گزارش شده است. علت تفاوت مقادیر دامنه تأثیر به‌دست آمده در پژوهش حاضر برای PR در مقایسه با دامنه‌های گزارش شده توسط سایر محققان را می‌توان به تغییرات عوامل ذاتی خاک، مقیاس مطالعاتی، وسعت منطقه و فواصل نمونه‌برداری نسبت داد. در این پژوهش، دامنه تأثیر سیلت کوچکتر از دامنه تأثیر بقیه متغیرها بود (جدول ۳) بنابراین می‌توان استنباط نمود سیلت دارای ساختار مکانی محدودتری در مقایسه با سایر متغیرها در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. بدیهی است که هرچه دامنه تأثیر بزرگتر باشد، ساختار مکانی گسترده‌تر است و محدوده‌ای که می‌توان از داده‌های آن برای تخمین مقادیر مجهول استفاده کرد، افزایش می‌یابد (Goovaerts, 1997). در پژوهش Khalilmoghadam and

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

Gorbani Dashtaki(2012) نیم‌تغییرنمای مقاومت برشی خاک در اراضی مرتعی زاگرس مرکزی (۲۳۵۶۲ هکتار) از مدل نمایی با ساختار مکانی متوسط پیروی نموده و دارای دامنه تأثیر ۲۰۰۰ متر شد. Khosravani و همکاران (2021) در ۵ هزار هکتار از اراضی دشت لپویی استان فارس، مدل نمایی را برای نیم‌تغییرنمای مقاومت‌های فروروی و برشی خاک برازش دادند و ساختار مکانی متوسط با دامنه تأثیر ۳۷۸۰ متر برای مقاومت فروروی و ساختار مکانی قوی با دامنه تأثیر ۶۲۶۴ متر را برای مقاومت برشی خاک گزارش کردند.

۳-۴- ارزیابی صحت درون‌یابی متغیرهای خاک

در جدول ۴ معیارهای ارزیابی صحت برآورد روش‌های درون‌یابی کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW) برای مقاومت فروروی (PR) و مقاومت برشی (SS) خاک ارائه شده است. معیار میانگین خطا (ME) بیانگر متوسط خطای برآورد بوده و مقادیر مثبت آن، بیش‌برآوردی را برای PR و SS توسط هر دو روش درون‌یابی و مقدار منفی آن کم‌برآوردی را برای SS در روش درون‌یابی OK نشان می‌دهد. براساس آماره میانگین مطلق خطا (MAE)، در برآورد SS، بین روش‌های درون‌یابی تفاوت چندان مشهودی وجود ندارد. همچنین روش OK در برآورد PR به‌علت داشتن MAE کوچکتر در مقایسه با روش IDW دارای صحت تخمین نسبتاً بالایی است. معیار مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) نیز نشان می‌دهد که در برآورد PR، روش OK به علت داشتن RMSE کوچکتر دارای خطای کمتر و صحت تخمین نسبتاً بالایی است ولی بین RMSE دو روش درون‌یابی از نظر برآورد SS، تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود (جدول ۴). هرچه مقادیر MAE و RMSE نزدیک به صفر باشند بیانگر آن است که تخمین متغیر با صحت بالاتری صورت گرفته است (Isaaks and Srivastava, 1989).

جدول ۴: معیارهای ارزیابی صحت برآورد مقاومت‌های فروروی (PR) و برشی (SS) خاک با استفاده از دو روش درون‌یابی.

متغیر	روش	ME	MAE	RMSE	CCC
PR (MPa)	OK	۰/۰۱۶	۰/۶۹	۰/۹۳	۰/۱۵
	IDW	۰/۰۵۳	۰/۷۷	۱/۰۵	۰/۱۱
SS (kg/cm^2)	OK	-۰/۰۰۵	۰/۳۳	۰/۴۲	۰/۲۰
	IDW	۰/۰۰۹	۰/۳۲	۰/۴۱	۰/۳۱

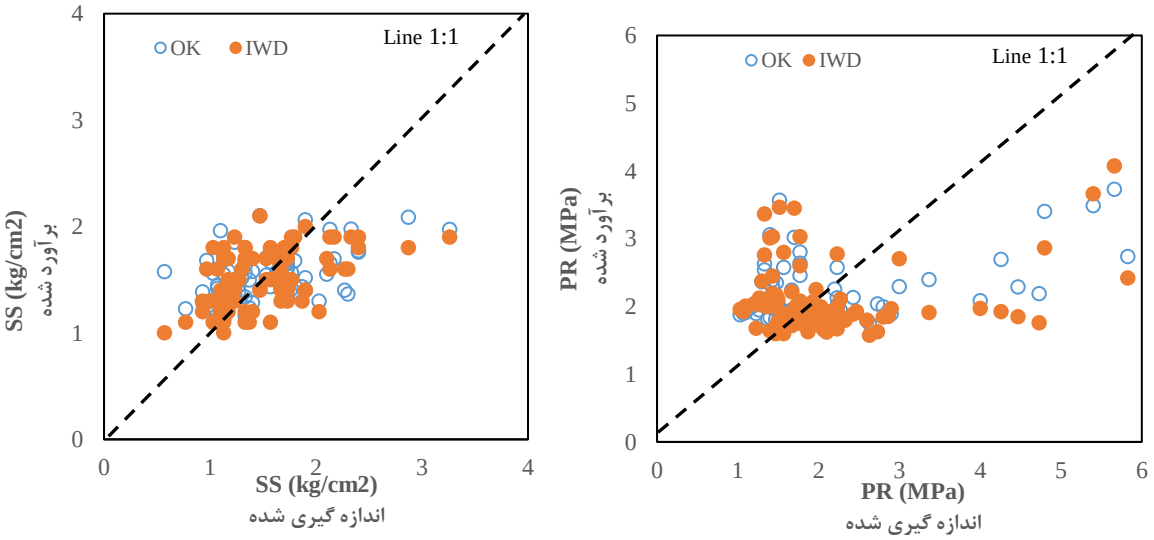
ME: میانگین خطا؛ MAE: میانگین مطلق خطا؛ RMSE: مجذور میانگین مربعات خطا؛ CCC: ضریب تطابق. OK: کریجینگ معمولی؛ IDW: وزن‌دهی عکس فاصله.

برای بررسی بیشتر صحت و دقت روش‌های درون‌یابی OK و IDW، مقادیر تخمینی PR و SS در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده آن‌ها برای همه نقاط نمونه‌برداری (n=80) رسم شد (شکل ۴). بر اساس جدول ۴، مقدار ضریب تطابق (CCC) برای PR در روش OK (۰/۱۵) در مقایسه با روش IDW (۰/۱۱) اندکی بیشتر است و پراکندگی کم داده‌های PR حول محور ۱:۱ در روش OK در مقایسه با روش IDW نیز مؤید این موضوع می‌باشد (شکل ۴). در درون‌یابی SS عکس قضیه اتفاق افتاد و مطابق آماره CCC، روش OK (۰/۲۰) نسبتاً بهتر از روش IDW (۰/۳۱) عمل نموده است (جدول ۴). در مجموع، هردو روش درون‌یابی (OK و IDW) در برآورد SS بهتر از PR بودند و مقادیر زیاد CCC (جدول ۴) و پراکندگی کم حول خط ۱:۱ (شکل)۴ برای SS در مقایسه با PR نیز این موضوع را تأیید می‌کند؛ احتمالاً ضریب تغییرات بالای PR موجب پایین آمدن دقت برآورد آن در مقایسه با SS در پژوهش حاضر شده است (جدول

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

۱). Asghari و همکاران (۲۰۱۷) نیز گزارش کردند در برآورد مقاومت فروروی، روش OKبه دلیل داشتن CCC بالاتر (۰/۴۸) در مقایسه با روش IDW (۰/۲۴) از دقت و صحت بالاتری برخوردار بود. همچنین نتایج پژوهش Asghari و Shahabi (۲۰۱۹) نشان داد در تخمین PR، روش OK به‌علت داشتن RMSE کمتر و CCC بیشتر در مقایسه با روش IDW دارای دقت بالاتری بود.



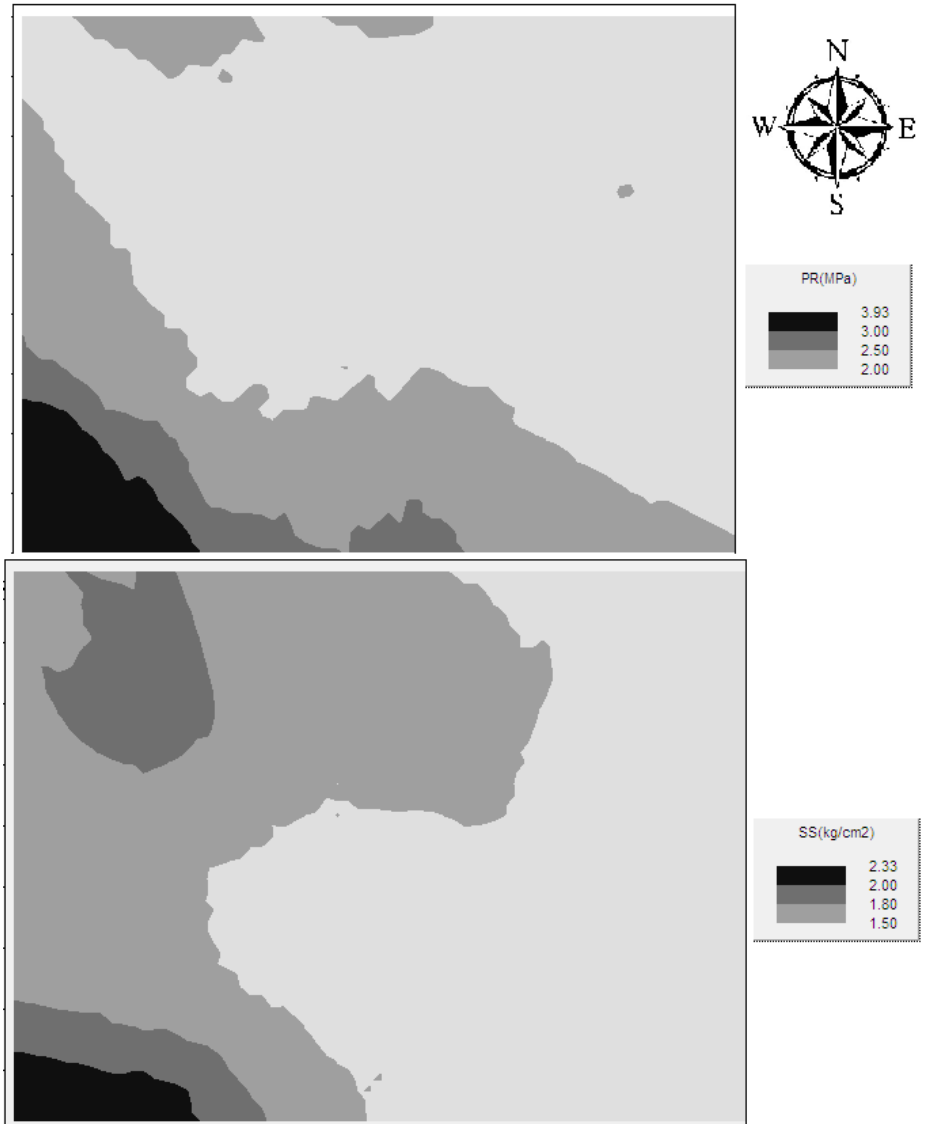
شکل ۴: نمودار ۱:۱ مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده مقاومت فروروی (PR) و مقاومت برشی (SS) خاک به روش کریجینگ معمولی (OK) و وزن‌دهی عکس فاصله (IDW).

۴-۴- نقشه تغییرات مکانی متغیرهای خاک

نقشه‌های توزیع مکانی مقاومت‌های فروروی (PR) و برشی (SS) خاک (شکل ۵) و رطوبت خاک مزرعه (FWC)، کربن آلی (OC)، شن (S) و سیلت (Si) (شکل ۶) با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS در ۴ کلاس طبقه‌بندی برای منطقه مورد مطالعه ترسیم شد. با توجه به نقشه توزیع مکانی PR و SS (شکل ۵)، مشاهده می‌شود مقادیر خیلی زیاد (>۳ MPa) و زیاد PR (۲-۳ MPa) عمدتاً مربوط به کاربری مرتعی در بخش‌های جنوب غربی و جنوبی منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در این نقاط مقادیر مقاومت برشی خاک نیز بالا بود (SS > ۲ kg/cm^2)؛ مشاهده‌های میدانی نیز نشان داد خاک سطحی اراضی مرتعی دارای حجم انبوهی از ریشه گیاهان مرتعی بود و علاوه بر آن مقدار شن (شکل ۶) و سنگریزه در اراضی مرتعی نسبت سایر کاربری‌ها بیشتر بود لذا به‌نظر می‌رسد این دو عامل باعث افزایش مقاومت‌های فروروی و برشی خاک در این قسمت‌ها شده است. همچنین مشاهده می‌شود الگوی پراکنش PR در خلاف جهت FWC و سیلت (شکل ۶) می‌باشد. وجود همبستگی منفی و معنی‌دار بین PR با FWC ($r=-0.45^{**}$) و سیلت ($r=-0.36^{**}$) نیز مؤید نتایج فوق است (جدول۲). شکل ۶ بیانگر آن است که در کاربری‌های جنگلی، مرتعی و زراعی منطقه مورد مطالعه، نقشه تغییرات مکانی رطوبت خاک مزرعه با کربن آلی خاک همسو می‌باشد و همبستگی شدیدFWC با OC ($r=0.78^{**}$) نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۲)؛ بیشترین مقادیرFWC و OC مربوط به نقاط شمالی منطقه مورد مطالعه (کاربری جنگلی) به‌دلیل تجمع لاشبرگ‌های درختان جنگلی می‌باشد و این نکته گویای آن است که با افزایش ماده آلی خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک نیز افزایش یافته است. مشابه نتایج پژوهش حاضر،

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

ارتباط منفی و معنی‌دار PRبا رطوبت خاک مزرعه توسط Asghari and Abdolhossainzadeh Namin (2019) و Kilic و همکاران (2004) گزارش شده است. بر خلاف نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط محققان قبلی مانند Asghari and Shahab Arkhazloo (2020) و Asghari و همکاران (2017)، در این پژوهش بین PRبا OC همبستگی معنی‌دار یافت نشد (جدول ۲) شاید دلیل این قضیه را به CV نسبتاً بالای مقاومت فروروی و کربن آلی در بین کاربری‌های جنگلی، مرتعی و زراعی (جدول ۱) منطقه مورد مطالعه نسبت داد.

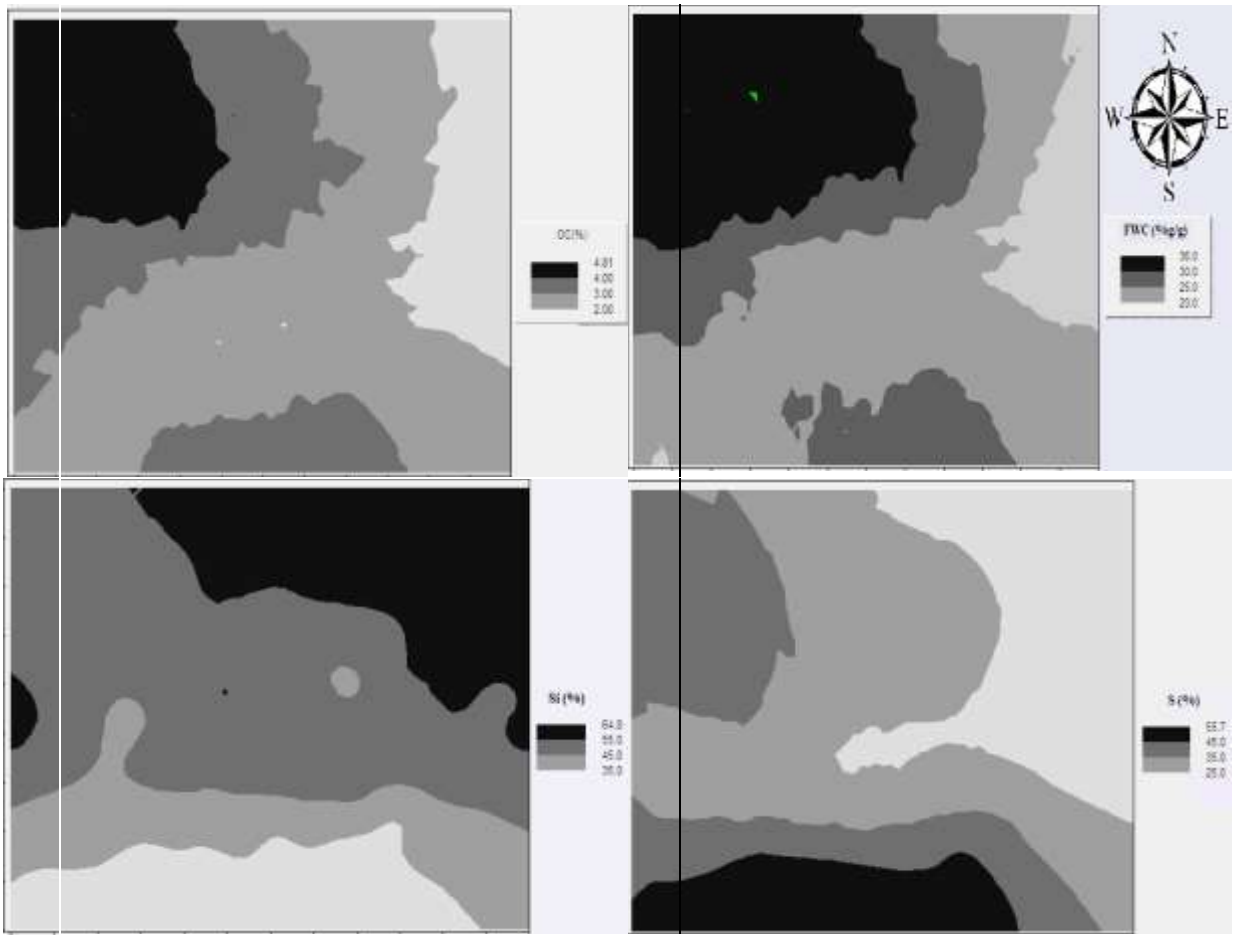


شکل ۵: نقشه تغییرات مکانی مقاومت‌های فروروی (PR) و برشی (SS) خاک در منطقه مورد مطالعه.

نقشه تغییرات مکانی مقاومت برشی (SS) خاک در شکل ۵ نشان می‌دهد که کمترین مقادیر SS (۱/۵ kg/cm^2 > SS) عمدتاً مربوط به کاربری زراعی در قسمت‌های شرقی منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) در مقایسه با کاربری‌های مرتعی و جنگلی می‌باشد. می‌توان چنین استنباط نمود که عملیات شخم در جهت شیب زمین و نیز کشت و کار در اراضی شیبدار منطقه فندقلوی اردبیل از طریق از بین بردن پوشش گیاهی دائمی باعث کاهش حجم ریشه و نیز اتلاف ماده آلی در خاک به‌ویژه در شرایط شیبدار منطقه، موجب کاهش مقاومت برشی خاک شده است؛ مقادیر کم کربن

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]
[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

آلی (OC < ۲٪) در کاربری زراعی واقع در بخش شرقی منطقه مورد مطالعه (شکل ۶) نیز شاهدی بر این ادعاست و علاوه بر آن همبستگی مثبت و معنی‌دار SS با OC ($r=0.38^{**}$) نیز مؤید این قضیه می‌باشد (جدول ۲). همچنین مقایسه نقشه‌ها در اشکال ۵ و ۶ گویای آن است که میزان شن در جهت غربی به شرقی کاهش ولی میزان سیلت در جهت جنوب غربی به شمال شرقی در منطقه مورد مطالعه افزایش یافته و منجر به کاهش مقاومت برشی خاک گردیده است؛ همبستگی‌های مثبت و معنی‌دار SS با شن ($r=0.48^{**}$) و منفی و معنی‌دار SS با سیلت ($r=-0.34^{**}$) نیز این قضیه را تأیید می‌کند. ذرات سیلت در مقایسه با ذرات شن از وزن کمی برخوردار بوده بنابراین انتظار می‌رود افزایش سهم سیلت در توزیع اندازه ذرات و کاهش مقاومت برشی منجر به تشدید فرسایش آبی خاک در کاربری زراعی اراضی شیبدار منطقه مورد مطالعه گردد (Refahi, 2017). نقشه درون‌یابی مقاومت برشی خاک در پژوهش Khalilmoghadam and Gorbani Dashtaki(2012) نیز بیانگر آن بود که خطوط ترازبه هم نزدیک بوده و تغییرپذیری این پارامتر به‌علت تنوع توپوگرافی و پوشش گیاهی بالا بود. Khosravani و همکاران (2021) نیز نقشه تغییرات مکانی مقاومت برشی خاک را در سه واحد فیزیوگرافی واقع در استان فارس رسم کردند نتایج نشان داد میانگین مقاومت برشی خاک در اراضی تپه‌ای به‌طور معنی‌دار کمتر از اراضی دشت دامنه‌ای و دشت بود.



شکل ۶: نقشه تغییرات مکانی رطوبت خاک مزرعه (FWC)، کربن آلی (OC)، شن (S) و سیلت (Si) در منطقه مورد مطالعه.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

۵ـ نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که بیشترین مقادیر مقاومت‌های فروروی و برشی خاک در کاربری مرتعی در مقایسه با کاربری‌های جنگلی و زراعی منطقه مورد مطالعه به‌دست آمد. خاک کاربری جنگلی در مقایسه با دو کاربری دیگر از ماده آلی زیاد و جرم مخصوص ظاهری کم برخوردار بود. ارتباط مثبت و معنی‌دار نسبتاً قوی ($r= 0.59^{**}$) بین کربن آلی و شن در منطقه مورد مطالعه یافت شد. مقاومت فروروی (PR) دارای بالاتری ضریب تغییرات (۵۸/۳ درصد) در کاربری مرتعی به علت تغییرپذیری نسبتاً بالای رطوبت خاک مرتعی و جرم مخصوص حقیقی دارای کمترین ضریب تغییرات (۳/۹۵ درصد) در کاربری زراعی منطقه مورد مطالعه نسبت به سایر متغیرهای خاک بودند. روابط همبستگی منفی و معنی‌دار بین PR با رطوبت خاک مزرعه (FWC) و سیلت و نیز همبستگی مثبت و معنی‌دار بین مقاومت برشی (SS) با شن و کربن آلی به‌دست آمد. متغیر PR دارای مدل نیم‌تغییرنمای گوسی، وابستگی مکانی قوی و دامنه تأثیر ۷۵۲ متر ولی SS دارای مدل نیم‌تغییرنمای کروی، وابستگی مکانی متوسط و دامنه تأثیر ۷۸۷ متر بود. نقشه تغییرات مکانی متغیرها نشان داد در منطقه مورد مطالعه، از شمال شرقی به سمت جنوب غربی از میزان سیلت کاسته شده و بر میزان مقاومت‌های فروروی و برشی خاک افزوده شد. مقادیر زیاد مقاومت فروروی در کاربری مرتعی به‌علت رطوبت کم خاک و مقادیر کم مقاومت برشی در کاربری زراعی به‌دلیل سهم بالای سیلت در مقایسه با شن و نیز پایین بودن میزان ماده آلی خاک مشاهده گردید. کمترین دامنه تأثیر (۶۳۶ m) برای سیلت در میان متغیرهای مورد مطالعه به‌دست آمد لذا توصیه می‌شود برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان برای ترسیم نقشه تغییرات مکانی متغیرهای خاک منطقه مورد مطالعه در تحقیقات بعدی، فواصل نمونه‌برداری خاک به‌جای ۵۰ متر، ۶۳۶ متر در نظر گرفته شود.

منابع

1. Asghari, Sh.; & H. Shahab Arkhazloo, 2020. Effects of land use and Slope on soil physical, mechanical and hydraulic quality in Heyran neck, Ardabil province. Environmental Erosion Research Journal, 10 (1), 79-91. (In Persian)
2. Asghari, Sh.; & S. Abdolhossainzadeh Namin, 2019. Influence of recreational human trampling on some soil physical and hydraulic properties of Ardabil Fandoghloo forest park. Water and Soil Science, 29(1), 125-136. (In Persian)
3. Asghari, Sh.; & M. Shahabi, 2019. Spatial variability of soil saturated hydraulic conductivity and penetration resistance in salt-affected lands around Lake Urmia, Journal of Water and Soil, 33(1), 103-116. (In Persian)
4. Asghari, Sh.; Sheykhzadeh, G.R. & M. Shahabi, 2017. Geostatistical analysis of soil mechanical properties in Ardabil plain of Iran. Archives of Agronomy and Soil Science, 63(12), 1631-1643.
5. Bayat, H.; Sheklabadi, M.; Moradhaseli, M. & E. Ebrahimi, 2017. Effects of slope aspect, grazing, and sampling position on the soil penetration resistance curve. Geoderma, 303, 150–164.
6. Besalatpour, A.; Hajabbasi, M.A.; Ayoubi, S.; Afyuni, M.; Jalalian, A. & R. Schulin, 2012. Soil shear strength prediction using intelligent systems: artificial neural networks and an adaptive neuro-fuzzy inference system. Soil science and plant nutrition, 58(2), 149-160.
7. Barik, K.; Aksakal, E.L.; Islam, K.R.; Sari, S. & I. Angin, 2014. Spatial variability of soil compaction properties associated with field traffic operations. Catena, 120, 122–133.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]

8. Blake, G. R., & K. H. Hartge., 1986a. Bulk Density. In A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of American Inc., Madison, WI, pp: 363-375.
9. Blake, G. R., & K. H. Hartge., 1986b. Particle Density. In A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis. Part 1- Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of American Inc., Madison, WI, pp: 377-382.
10. Cambardella, C.; Moorman, T.; Novak J.; Parkin, T.; Karlen, D.; Turco, R. & A. Konopka, 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 58, 1501-1510.
11. Danielson, R. E., & P. L. Sutherland, 1986. Porosity. In A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis, Part 1- Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of American Inc., Madison, WI, pp: 443-461.
12. Gardner, W. H., 1986. Water content. In A. Klute (ed). Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods. Soil Science Society of American Inc., Madison, WI, pp: 493-544.
13. Gee, G.W., & D. Or., 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (eds.), Methods of Soil Analysis, Part 4, Soil Science Society of America Inc. Book Series No. 5. Madison, WI, pp: 255-293.
14. Goovaerts, P, 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press. Oxford.
15. Isaaks, H. E., & R.M. Srivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, NY.
16. Khalil Moghadam, B., & Ghorbani Dashtaki, S, 2012. Comparison of geostatistics, PTFs, SSPFs methods and their combination for estimating soil surface shear strength. Water and Soil, 26(1), 127-138. (In Persian)
17. Khalil Moghadam, B,; Afyuni, M.; Abbaspour, K.C.; Jalalian, A.; Dehghani, A.A. & R. Schulin, 2009. Estimation of surface shear strength in Zagros region of Iran - A comparison of artificial neural networks and multiple-linear regression models. Geoderma, 153, 29–36.
18. Kilic, K.; Ozgoz, E.; & F. Akbas, 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. Soil and Tillage Research, 76, 1–11.
19. Khosravani, P.; Moosavi, A.; & M. Baghernejad, 2021. Spatial variations of soil penetration resistance and shear strength and the effect of land use type and physiographic unit on these characteristics. Iranian Journal of Soil and Water Research, 52(4), 1041-1057. (In Persian)
20. Lin , L. I, 1989. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. Biometrics, 45, 255–268.
21. Lowery, B. & J. E. Morrison, 2002. Soil penetrometer and penetrability. In: Dane J. H., and Topp G.C (eds.). Methods of soil analysis, part 4. Physical methods. Madison (WI): Soil Science Society of America; pp. 363–388.
22. Nelson, D.W. & L.E. Sommers, 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: A.L. Page et al. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 539–579.
23. Refahi, H, 2017. Water Erosion and Its Control. Tehran University Press. 672p.
24. Wilding, L. P. & L. R. Dress, 1983. Spatial variability and pedology. In: Wilding L.P, Smeckand N.E, and Hall GF, (EDs). Pedogenesis and Soil Taxonomy. I. Concepts and Interactions. Elsevier Science Pub, pp: 83-116.

[Downloaded from magazine.hormozgan.ac.ir on 2026-11-22]

[DOI: 10.61186/jeer.14.2.7]