

(OPEN ACCESS)

Changes in root characteristics and soil biochemical activities under the influence of the Catena landscape in western Mazandaran

Afsaneh Farhadifar¹, Yahya Kooch^{*2}, Mohammad Ali Bahmanyar³

1. Ph.D. Student of Range Management, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: afsaneh.farhadifar@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Associate Prof., Dept. of Range Management, Faculty of Natural Resources and Marine Science, Tarbiat Modares University, Noor, Iran. E-mail: yahya.kooch@modares.ac.ir
3. Professor, Dept. of Soil Sciences and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. E-mail: m.bahmanyar@sanru.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper	Background and Objectives: Rangelands represent one of the most expansive ecosystems globally and are instrumental in preserving ecological equilibrium. Landform significantly influences soil formation and plays a crucial role in the variability of soil properties. "Catena" is one of the various landform types, consisting of five positions: summit, shoulder, back, foot, and toe slopes. Topographic variations in the Catena influence water and nutrient availability, root distribution, and soil properties, ultimately affecting vegetation cover, biological processes, and soil quality. In this context, the different positions of a Catena are key factors in shaping the relationships between soil and root characteristics. Although rangelands constitute a substantial portion of semi-arid landscapes, comprehensive information on semi-arid rangeland soils, particularly across different landform types, is scarce. Semi-arid ecosystems are among the most sensitive and fragile regions due to their specific climatic conditions. This study investigates how landform influences root traits and soil enzymes in a semi-arid rangeland landscape located in the mountainous region of northern Iran, thereby deepening our understanding of the Catena concept. Roots (fine and coarse roots) occupy a very large part of the components of the basement in different positions of the Catena. The landform can have many effects on the biomass of roots, which can vary in different situations. Catena positions determine soil moisture and replenishment, which in turn affects the amount of root biomass. The roots of plants are made up of two main parts: fine roots, which are less than 2 mm in diameter, and coarse roots, with a diameter of more than 2 mm. These two parts play an important role in the underground structure of the soil and constitute a significant part of its composition in natural ecosystems. Fine roots play a very important role in the nutrient cycle. Coarse roots make plants strong due to their larger size and have a slower rate of return to the soil compared to fine roots, but it affects the performance of habitats. Biochemical activities are significantly sensitive to other physical and chemical properties of soils, which consequently makes them a suitable indicator for evaluating soil quality in different landforms. Soil enzymes during the chemical catalysis process are a strategy for replenishing plants and organic matter in the soil.
Article history: Received: 02.03.2025 Revised: 03.10.2025 Accepted: 04.09.2025	
Keywords: Coarse root, Fine root, Enzyme activity, Soil depth, Topography	

Materials and Methods: For this purpose, the Gilkola region in the Kojur district of Mazandaran province was selected as the study area. Initially, three V-shaped and three Λ -shaped Catenas were determined in this area. Within these landforms, sampling was conducted at each of the five positions along the cross-section of the Catena. Soil samples were collected from an area of 30×30 cm at three depths: 0-15 cm, 15-30 cm, and 30-45 cm. In total, 270 soil samples were collected from the studied structures and transported to the laboratory for analysis. After transporting the soil samples to the laboratory, coarse- and fine-roots were separated from the samples (based on the depth of 0-45 cm) and washed with a 2 mm sieve. Air-dried soil samples and root samples were placed in an oven at 70 °C for 24 hours and dried. After sample preparation, root characteristics were measured, including root biomass by weighing, carbon by combustion, nitrogen by mineralization, phosphorus by Olsen method, potassium, calcium and magnesium by atomic absorption method. Biochemical activities of enzymes were incubated under standard conditions and in a sufficient medium, and based on colorimetric measurement of the product released from the enzyme, the enzyme activity rate was determined using standard methods. Soil characteristics were analyzed using the F test and in the form of a double-split plot design. Statistical analysis of all data was performed using SPSS version 20 software. Also, multivariate analysis and principal component analysis (PCA) were used to investigate the relationship between the shape, positions and different depths of the catena using the PC-ORD program.

Results: The results of this research showed that the land form had significant effects on the characteristics studied. The results showed that the biomass (645.57 g/m²) and carbon (18.70%) of the coarse roots, fine roots phosphorus (2.32%) and calcium (0.86%) of the fine roots were higher in the V-shaped Catena than in the Λ -shaped Catena. Also, the highest values of coarse root characteristics including biomass (801.16 g/m²), carbon (24.30%), phosphorus (1.62%), and calcium (0.46%) were observed at the toe position of the Catena slope. The highest values of biomass (35.92 g/m²), nitrogen (0.44%), phosphorus (2.32%), potassium (1.39%), calcium (0.86%) and magnesium (0.69%) of the fine roots were observed in the V-shaped Catena. fine root biomass (47.24 g/m²) and their nutrients (34.30% carbon, 0.54% nitrogen, 3.02% phosphorus, 1.55% potassium, 1.07% calcium, and 0.87% magnesium) were highest in the toe slope of V-shaped Catena. In addition, the results of root measurements showed that its biomass (502.39 g/m²), carbon (24.71%), nitrogen (0.38%), phosphorus (1.89%), potassium (1.19%), calcium (0.62%), and magnesium (0.45%) were highest in the V-shaped Catena, and also in the toe slope position (636.81 g/m², 29.30%, 0.44%, 2.32%, 1.30%, 0.77%, and 0.59%) respectively. The results obtained from the measurement of the enzymes studied showed that in the V-shaped Catena, the highest amounts of acid phosphatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 67.260), arylsulfatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 89.207) and invertase ($\mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{ 3 h}^{-1}$ 40.229) and the highest amounts of urease ($\mu\text{g NH}_4^+ \text{-N g}^{-1} \text{ 2 h}^{-1}$ 04.21), acid phosphatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 35.402), arylsulfatase ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 55.350) and invertase ($\mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{ 3 h}^{-1}$ 77.307) were in the toe slope, respectively, and in the 0-15 cm layer of soil, respectively ($\mu\text{g NH}_4^+ \text{-N g}^{-1} \text{ 2 h}^{-1}$ 67.17), ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 61.267), ($\mu\text{g PNP g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 22.213) and ($\mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{ 3 h}^{-1}$ 01.224) had the highest activity.

Conclusion: The results of this study indicate that different positions of the Catena, as a topographic unit, have a significant impact on soil properties,

vegetation cover, and belowground activities. In the V-shaped Catena, lower slope positions have better soil conditions, such as moisture retention and nutrient availability, which provide favorable conditions for plant growth and biological activities. In these areas, vegetation cover is better than in the upper slope positions and helps protect the soil from erosion. In contrast, in the upper slope positions, due to poor soil conditions, vegetation cover is weaker, and soil erosion can disrupt biological activities. The summit and shoulder positions of the Catena, due to their natural restorative capacity, could be suitable targets for soil restoration and rehabilitation operations. Indeed, it may be thought that the accumulation of organic matter, leaching of nutrients, and creation of a favorable microclimate can enhance biological activities, whereas the reduction of vegetation cover in top positions has detrimental effects on belowground components. The interaction between these variables can provide valuable insights into soil fertility dynamics and ecosystem functioning. In conclusion, the findings of this study demonstrate the necessity of maintaining the foot and toe positions of the Catena to enhance soil fertility and overall soil health. These findings could contribute to improving natural resource management and nutrient cycling in the mountainous regions of northern Iran.

Cite this article: Farhadifar, Afsaneh, Kooch, Yahya, Bahmanyar, Mohammad Ali. 2025. Changes in root characteristics and soil biochemical activities under the influence of the Catena landscape in western Mazandaran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (3), 161-181.



© The Author(s).

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23289.3787

Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

تغییرات مشخصه‌های ریشه و فعالیت‌های بیوشیمی خاک تحت تأثیر زمین‌نمای کاتنا در غرب مازندران

افسانه فرهادی¹، یحیی کوچ^{2*}، محمدعلی بهمنیار³

1. دانشجوی دکتری علوم و مهندسی مرتع، گروه مرتع‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
رایانامه: afsaneh.farhadifar@modares.ac.ir
2. نویسنده مسئول، دانشیار گروه مرتع‌داری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس، نور، ایران.
رایانامه: yahya.kooch@modares.ac.ir
3. استاد گروه علوم و مهندسی خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: m.bahmanyar@sanru.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی - پژوهشی	سابقه و هدف: مراتع یکی از گسترده‌ترین بوم‌سازگان روی زمین را تشکیل می‌دهند و نقش حیاتی در حفظ تعادل اکولوژیکی دارند. شکل زمین به‌طور قابل توجهی بر شکل‌گیری خاک اثر می‌گذارد و نقش بسیار مهمی در تغییرپذیری ویژگی‌های خاک دارد. "کاتنا" یکی از انواع مختلف شکل‌های زمین است که دارای پنج موقعیت (قله، شانه، پستی، پای و پنجه شیب) است. ناهمواری‌های توپوگرافی در کاتنا با تأثیر بر پراکنش ریشه‌ها و ویژگی‌های خاک، موجب تغییر در پوشش گیاهی، فرآیندهای زیستی و کیفیت خاک می‌شود. در همین راستا موقعیت‌های مختلف کاتنا از عوامل مهم در چگونگی ارتباط بین مشخصه‌های خاک و ریشه می‌باشد. اگرچه مناطق مرتعی بخش قابل توجهی از چشم‌انداز نیمه‌خشک را تشکیل می‌دهند، کمبود اطلاعات جامع در مورد خاک‌های مرتعی نیمه‌خشک، به‌ویژه در اشکال مختلف زمین وجود دارد. بوم‌سازگان نیمه‌خشک، با توجه به شرایط اقلیمی خاص خود در زمره مناطق بسیار حساس و شکننده قرار می‌گیرند. این پژوهش به بررسی این موضوع می‌پردازد که چگونه شکل زمین بر ویژگی‌های ریشه و آنزیم‌های خاک در یک چشم‌انداز مرتعی نیمه‌خشک واقع در بخش کوهستانی شمال ایران تأثیر می‌گذارند و در نتیجه درک ما از کاتنا را عمیق‌تر می‌کند. ریشه‌ها (ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها) بخش بسیار زیادی از اجزای زیرزمین در موقعیت‌های مختلف کاتنا را به خود اختصاص داده است. شکل زمین می‌تواند اثرات زیادی بر زی‌توده ریشه‌ها داشته باشد که در موقعیت‌های مختلف، این اثرات می‌توانند متفاوت باشند. موقعیت‌های کاتنا تعیین‌کننده میزان رطوبت و تغذیه خاک است، که به‌نوبه خود بر میزان زی‌توده ریشه‌ها تأثیر دارد. ریشه‌های گیاهان از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها.
واژه‌های کلیدی: توپوگرافی، درشت‌ریشه، ریزریشه، عمق خاک، فعالیت آنزیمی	

ریزیشه‌ها در چرخه عناصر غذایی نقش بسیار مهمی دارند. درشت‌ریشه‌ها به دلیل بزرگ‌تر بودن باعث استحکام گیاهان می‌شوند و در مقایسه با ریزیشه‌ها نرخ بازگشت کندتری به خاک دارند. اما در عملکرد رویشگاه‌ها اثرگذار است. فعالیت‌های بیوشیمی حساسیت قابل‌توجهی نسبت به سایر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند که در نتیجه آن‌ها را به‌عنوان یک شاخص مناسب برای ارزیابی کیفیت خاک در شکل‌های مختلف زمین قرار می‌دهد. آنزیم‌های خاک طی فرایند کاتالیز شیمیایی، راهبردی برای تغذیه گیاهان و مواد آلی در خاک هستند.

مواد و روش‌ها: بدین‌منظور منطقه گیل‌کلا در بخش کجور در استان مازندران به‌عنوان منطقه مورد‌مطالعه انتخاب شد. ابتدا در این منطقه سه کاتنای V شکل و سه کاتنای A شکل انتخاب شد. در این ساختارها در محل هر یک از موقعیت‌های پنج‌گانه موردبررسی در عرض کاتنا، نمونه‌برداری از سطح 30×30 سانتی‌متر و عمق‌های 0-15، 15-30 و 30-45 سانتی‌متری خاک انجام شد. درمجموع در ساختارهای موردبررسی، 270 نمونه خاک برداشت و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از انتقال نمونه‌های خاک به آزمایشگاه، درشت‌ریشه‌ها و ریزیشه‌ها از نمونه‌ها جداسازی (بر مبنای عمق 0-45 سانتی‌متری) شده و با الک 2 میلی‌متری شستشو داده شدند. نمونه‌های خاک هواخشک و نمونه‌های ریشه به‌مدت 24 ساعت در آون با دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و خشک شدند. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، اندازه‌گیری مشخصه‌های ریشه از جمله زی‌توده ریشه‌ها به روش توزین، کربن به روش احتراق، نیتروژن به روش معدنی‌سازی، فسفر به روش اولسن، پتاسیم، کلسیم و منیزیم به روش جذب اتمی اندازه‌گیری شد. فعالیت‌های بیوشیمی آنزیم‌ها در شرایط استاندارد و در یک بستر کافی انکوباسیون شدند و بر اساس اندازه‌گیری رنگ‌سنجی محصول آزاد شده از آنزیم، نرخ فعالیت آنزیم با استفاده از روش‌های استاندارد مشخص گردید. مشخصه‌های خاک با استفاده از آزمون GLM و در قالب طرح کرت‌های دوبار خردشده تجزیه و تحلیل شدند. تجزیه و تحلیل آماری همه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 20 انجام شد. هم‌چنین برای بررسی ارتباط بین شکل، موقعیت‌ها و عمق‌های مختلف کاتنا از تجزیه و تحلیل چندمتغیره و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از برنامه PC-ORD استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که شکل زمین، اثرات معنی‌داری بر مشخصه‌های موردبررسی داشته است. نتایج نشان داد که زی‌توده (645/57 گرم بر مترمربع) و کربن (18/70٪) درشت‌ریشه، فسفر (2/32٪) ریزیشه و کلسیم (0/86٪) ریزیشه در کاتنای V شکل بیش‌تر از کاتنای A شکل بود. هم‌چنین بیش‌ترین مقادیر مشخصه‌های درشت‌ریشه از جمله زی‌توده (801/16 گرم بر مترمربع)، کربن (24/30٪)، فسفر (1/62٪) و کلسیم (0/46٪) در موقعیت پنجه شیب کاتنا مشاهده شد. بیش‌ترین مقادیر زی‌توده (35/92 گرم بر مترمربع)، نیتروژن (0/44٪)، فسفر (2/32٪)، پتاسیم (1/39٪)، کلسیم (0/86٪) و منیزیم (0/69٪) ریزیشه در کاتنای V شکل مشاهده شد. زی‌توده ریزیشه (47/24 گرم بر مترمربع) و عناصر غذایی آن‌ها (کربن 34/30٪، نیتروژن 0/54٪، فسفر 3/02٪، پتاسیم 1/55٪، کلسیم 1/07٪ و منیزیم 0/87٪) در پنجه کاتنای V شکل بیش‌ترین مقدار را داشته است. علاوه‌بر این نتایج اندازه‌گیری ریشه نشان داد که

زی توده آن (۵۰۲/۳۹ گرم بر مترمربع)، کربن (۰/۲۴/۷۱)، نیتروژن (۰/۳۸)، فسفر (۰/۱/۸۹)، پتاسیم (۰/۱/۱۹)، کلسیم (۰/۶۲) و منیزیم (۰/۴۵) بیشترین میزان خود را در کاتنا V شکل داشته است، همچنین در موقعیت پنجه شیب نیز به ترتیب (۶۳۶/۸۱ گرم بر مترمربع، ۰/۲۹/۳۰، ۰/۴۴، ۰/۲/۳۲، ۰/۱/۳۰، ۰/۰/۷۷، ۰/۰/۵۹) بیشترین مقدار را داشته است. نتایج به دست آمده از اندازه گیری آنزیم های مورد بررسی نشان داد که در کاتنا V شکل بیشترین مقدار آنزیم های اسید فسفاتاز ($260/67 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، آریل سولفاتاز ($207/89 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) و اینورتاز ($229/40 \mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{h}^{-1}$) و بیشترین مقدار آن ها به ترتیب اوره آز ($21/04 \mu\text{g NH}_4^+ - \text{N g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، اسید فسفاتاز ($402/35 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، آریل سولفاتاز ($350/55 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) و اینورتاز ($307/77 \mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{h}^{-1}$) در پنجه شیب بوده و در لایه ۰-۱۵ سانتی متری خاک به ترتیب ($17/67 \mu\text{g NH}_4^+ - \text{N g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، ($267/61 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، ($213/22 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) و ($207/89 \mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{h}^{-1}$) بیشترین فعالیت را داشته اند.

نتیجه گیری: نتایج پژوهش حاضر به این نکته اشاره دارد که موقعیت های مختلف کاتنا به عنوان یک واحد توپوگرافی، تأثیر زیادی بر ویژگی های خاک، پوشش گیاهی و فعالیت های زیرزمینی دارند. در کاتنا V شکل، موقعیت های پایین شیب به دلیل ویژگی های مناسب خاک، مانند نگهداری رطوبت و مواد مغذی، شرایط بهتری برای رشد گیاهان و فعالیت های زیستی دارند. در این نواحی، پوشش گیاهی بهتر از مناطق بالای شیب است و از خاک در برابر فرسایش محافظت می کند. در مقابل، در نواحی بالای شیب به دلیل شرایط نامناسب خاک، پوشش گیاهی ضعیف تر است و فرسایش خاک می تواند فعالیت های زیستی را مختل کند. موقعیت های قله و شانه کاتنا به دلیل قابلیت احیای طبیعی، می توانند هدف مناسبی برای عملیات ترمیم و بازسازی خاک باشند. در واقع، ممکن است تصور شود که تجمع مواد آلی، شستشوی مواد مغذی و ایجاد یک میکرواقلیم مناسب می تواند فعالیت های بیولوژیکی را افزایش دهد، در مقابل آن کاهش نسبت پوشش گیاهی در موقعیت های بالا اثرات مضر بر اجزای زیرزمینی ایجاد می کند. تعامل بین این متغیرها می تواند بینش ارزشمندی در مورد پویایی حاصلخیزی خاک و عملکرد بوم سازگان ایجاد کند. در نتیجه، یافته های این پژوهش ضرورت حفظ موقعیت پای و پنجه کاتنا برای تقویت حاصلخیزی خاک و سلامت کلی خاک را اثبات می کند. علاوه بر این، ممکن است به ارزیابی چرخه مواد مغذی در مناطق شمالی ایران کمک کند. همچنین این یافته ها می تواند به بهبود مدیریت منابع طبیعی و چرخه عناصر غذایی در مناطق کوهستانی شمال کشور کمک کند.

استناد: فرهادی فر، افسانه، کوچ، یحیی، بهمنیار، محمدعلی (۱۴۰۴). تغییرات مشخصه های ریشه و فعالیت های بیوشیمی خاک تحت تأثیر زمین نمای کاتنا در غرب مازندران. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۳۲ (۳)، ۱۸۱-۱۶۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23289.3787



© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

مقدمه

یکی از گسترده‌ترین بوم‌سازگان کره زمین، مراتع هستند که نقش اساسی در حفظ تعادل زیست‌محیطی ایفا می‌کنند. باین‌حال، این بوم‌سازگان به‌دلیل مدیریت نادرست و فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، در معرض تهدیدات جدی قرار دارند. عواملی هم‌چون ویژگی‌های خاکی، شرایط اقلیمی و توپوگرافی به‌عنوان اجزای اصلی محیط‌های طبیعی، تأثیر زیادی بر ساختار و کارکرد این بوم‌سازگان دارند (1). شکل سطح زمین به‌عنوان عاملی مهم از طریق مؤلفه‌های شیب، جهت و ارتفاع از سطح دریا بر ویژگی‌های خاک، تغییرات مکانی خرداقلیم و نحوه پراکنش گونه‌های گیاهی اثرگذار بوده و باعث می‌شود که عمق‌های مختلفی از خاک در دامنه‌هایی با شیب تند، متوسط و کم در رویشگاه‌های مرتعی به‌وجود آید (2). برخی از پژوهش‌گران (3 و 4) نشان داده‌اند که ویژگی‌های خاک تغییرات قابل‌توجهی در مقیاس محلی نشان می‌دهند و اغلب این نوسانات را به تغییرات جزئی در ویژگی‌های توپوگرافی مانند شیب‌های مقعر و محدب نسبت می‌دهند (5 و 6).

کاتنا یکی از مهم‌ترین تقسیم‌بندی‌های شکل زمین است و شامل مجموعه‌ای از خاک‌های پیوسته در یک ردیف پستی‌وبلندی است (7). این ساختار به‌صورت V یا Λ در طبیعت دیده می‌شود و شامل موقعیت‌هایی مانند قله شیب¹، شانه شیب²، پستی شیب³، پای شیب⁴ شیب⁴ و پنجه شیب⁵ است. بررسی ویژگی‌های خاک در طول یک کاتنا، ارتباط آن با توپوگرافی را آشکار می‌کند و نقش مهمی در ناهمگنی خاک، خرداقلیم، چرخه عناصر غذایی و فعالیت‌های آنزیمی دارد (8، 9 و 10). تغییرات توپوگرافی در کاتنا بر توزیع ریشه

گیاهان و کیفیت خاک تأثیر گذاشته و در نهایت بر پوشش گیاهی و فرآیندهای زیستی اثر می‌گذارد و در نتیجه اثرات متفاوتی بر تغییرپذیری اجزای زیرزمین، عملکرد و کیفیت خاک دارد (11).

ریشه‌ها (ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها) بخش بسیار زیادی از اجزای زیرزمین در موقعیت‌های مختلف کاتنا را به خود اختصاص داده است. شکل زمین می‌تواند اثرات زیادی بر زی‌توده ریشه‌ها داشته باشد که در موقعیت‌های مختلف، این اثرات می‌تواند متفاوت باشند. موقعیت‌های کاتنا تعیین‌کننده میزان رطوبت و تغذیه خاک است، که به‌نوبه خود بر میزان زی‌توده ریشه‌ها تأثیر دارد. ریشه‌های گیاهان از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند: ریزریشه‌ها، که قطری کم‌تر از 2 میلی‌متر دارند، و درشت‌ریشه‌ها، با قطری بیش از 2 میلی‌متر. این دو بخش نقش مهمی در ساختار زیرزمینی خاک ایفا کرده و بخش قابل‌توجهی از ترکیب آن را در بوم‌سازگان طبیعی تشکیل می‌دهند (12). ریزریشه‌ها در چرخه عناصر غذایی نقش بسیار مهمی دارند (12). بنابراین میزان آن‌ها بر چرخه بیوژئوشیمیایی اثر مستقیم داشته و بر مشخصه‌های فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک اثرگذار است (12). آب و عناصر غذایی در خاک از طریق ریشه‌ها برای گیاهان قابل‌دسترس می‌شوند (12). با توجه به این‌که ریزریشه‌ها دوره زیست کوتاه‌مدتی دارند و به تغییرات محیطی حساس هستند، بررسی و تأثیر مشخصه‌های آن‌ها بر وضعیت چرخه عناصر غذایی بسیار مهم است (13). درشت‌ریشه‌ها به‌دلیل بزرگ‌تر بودن باعث استحکام گیاهان می‌شوند و در مقایسه با ریزریشه‌ها نرخ بازگشت کندتری به خاک دارند اما در عملکرد رویشگاه‌ها اثرگذار است (14).

فعالیت‌های بیوشیمی حساسیت قابل‌توجهی نسبت به سایر مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارند که در نتیجه آن‌ها را به‌عنوان یک شاخص مناسب

- 1- Summits
- 2- Shoulder
- 3- Back Slope
- 4- Foot Slope
- 5- Toe Slope

برای ارزیابی کیفیت خاک در شکل‌های مختلف زمین قرار می‌دهد (15). در پژوهشی بیان شده است که فعالیت آنزیمی پاسخ سریعی نسبت به تغییرات ماده آلی خاک نشان داده است. تغییرات شیب در شکل‌های مختلف زمین به‌ویژه کاتنا باعث می‌شود که در موقعیت‌های بالای شیب به دلیل فرسایش و آبشویی ذرات خاک شسته شده و در موقعیت‌های پای و پنجه کاتنا تجمع می‌یابند که سبب هدررفت ماده آلی در موقعیت‌های بالایی شده، در نتیجه فعالیت آنزیمی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (16). آنزیم‌های خاک طی فرایند کاتالیز شیمیایی، راهبردی برای تغذیه گیاهان و مواد آلی در خاک هستند (17). آنزیم اوره‌آز در معدنی شدن نیتروژن نقش مهمی دارد و شکل زمین بر سطح فعالیت آن تأثیرگذار است (18). آنزیم اسیدفسفاتاز با هیدرولیز پیوندهای استر- فسفات، باعث می‌شود فسفات در خاک آزاد شده و در دسترس گیاهان و موجودات خاکزی قرار بگیرد (19). آنزیم آریل سولفاتاز در تجزیه ماده آلی نقش حیاتی داشته است (20). آنزیم اینورتاز به هیدرولیز ساکاروز سرعت بخشیده و شاخص مهمی برای ارزیابی کیفیت خاک می‌باشد (19).

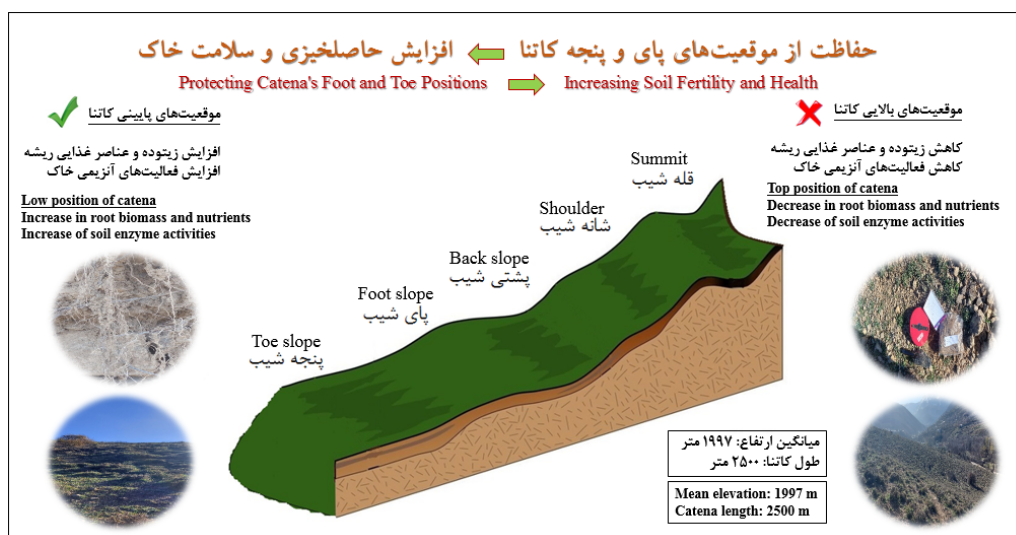
بوم‌سازگان نیمه‌خشک، با توجه به شرایط اقلیمی خاص خود در زمره‌ی مناطق بسیار حساس و شکننده قرار می‌گیرند. مرور منابع نشان داده است در خصوص اثر شکل زمین بر ویژگی‌های ریشه و فعالیت‌های بیوشیمی خاک در مناطق نیمه‌خشک بوده، مطالعات اندکی انجام شده است. در مطالعه‌ای پان و همکاران (2018) تأکید کردند که توپوگرافی اثر مثبتی بر مواد مغذی و ویژگی‌های بستر داشته و در نتیجه، فعالیت آنزیم‌های خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند (21). هم‌چنین استاک و همکاران (2019) به این نتیجه رسیدند که فعالیت میکروبی خاک به‌طور عمده توسط دسترسی به کربن محدود می‌شود، که بخش زیادی از

آن از طریق ریشه‌های زنده آزاد می‌شود (22). ترشحات ریشه و رسوبات میکروبی نه‌تنها فعالیت‌های میکروبی را تحریک می‌کنند، بلکه می‌توانند تعادل استوکیومتریک بین C، N و P را تغییر دهند و به افزایش تولید آنزیم‌های خاک منجر شوند. در پژوهشی پایریک و همکاران (2010) نشان داد که توپوگرافی و حاصلخیزی خاک می‌توانند تغییرات قابل‌توجهی در صفات ریزریشه و تنوع عملکردی در طول شیب کاتنا ایجاد کنند (23). بنابراین با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص سازه‌های کاتنا در مناطق کوهستانی، این ساختارها نمایانگر یک جزء بسیار حساس از بوم‌سازگان هستند که تحت تأثیر شرایط اقلیمی می‌باشند. با توجه به این‌که چنین ساختارهایی به‌عنوان شکل‌های مختلف زمین در مناطق کوهستانی شمال ایران شناخته می‌شوند، در این پژوهش تأثیری که شکل‌های زمین بر شاخص‌های زیستی خاک دارد، با هدف روشن کردن رابطه بین شکل و موقعیت‌های مختلف کاتنا ارزیابی می‌شود.

منطقه مورد مطالعه: محدوده موردبررسی در رویشگاه ییلاقی گیل‌کلا از توابع بخش کجور در جنوب‌شرقی شهرستان نوشهر (عرض جغرافیایی $36^{\circ}27'14''$ تا $36^{\circ}27'16''$ شمالی و طول جغرافیایی $51^{\circ}46'24''$ تا $51^{\circ}46'27''$ شرقی) و در زون البرز مرکزی قرار گرفته است (شکل 2). منطقه مورد مطالعه دارای اقلیم کوهستانی نیمه‌خشک می‌باشد و متوسط ارتفاع آن 1600 متر از سطح دریا بوده، میزان بارندگی متوسط سالانه آن 370 میلی‌متر و پتانسیل تبخیر سالانه آن برابر با 1300 میلی‌متر است. حداقل دما 5 درجه سانتی‌گراد در بهمن‌ماه و حداکثر دما 22 درجه سانتی‌گراد در مردادماه می‌باشد. انواع مختلفی از پوشش گیاهی (24) در شکل کاتنای V و A شکل (در مناطق حفاظت شده) وجود دارد (شکل 3). بافت خاک در هر دو شکل کاتناهای مورد بررسی در

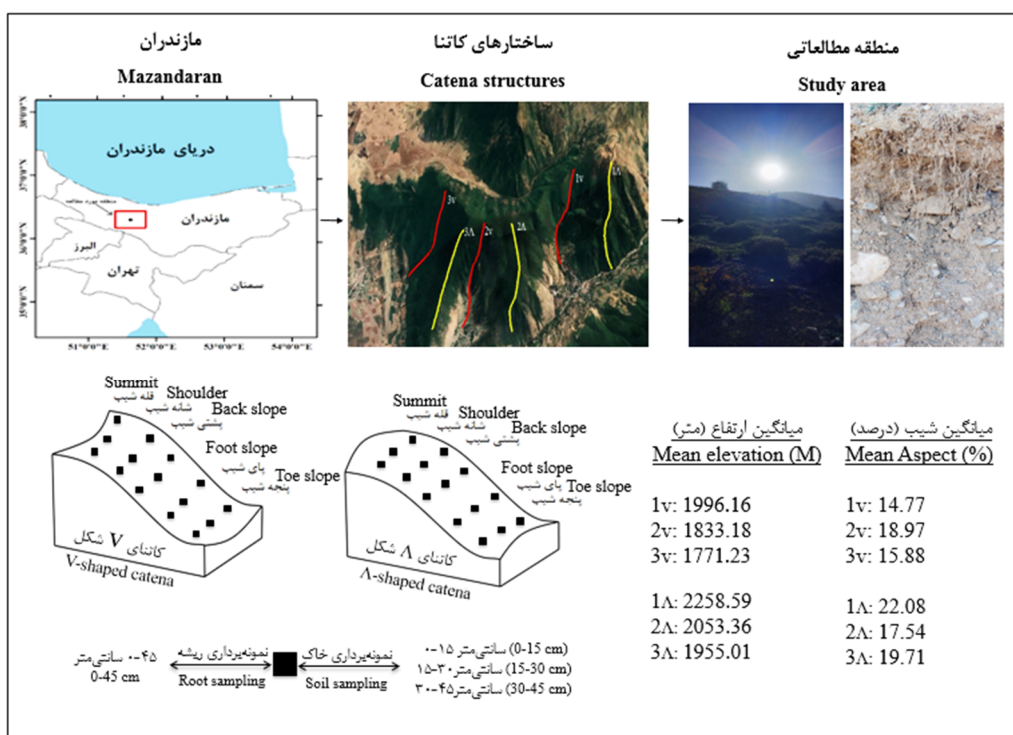
سطح پنج درصد و یک درصد تفاوت معنی‌دار را نشان داد. به‌طوری‌که بیش‌ترین پایداری در پنجه شیب (61/35) کاتنا V شکل مشاهده شد (25).

موقعیت‌های قله، شانه و پستی شیب، لومی رسی و در موقعیت‌های پای و پنجه شیب، رسی بوده است. همچنین پایداری خاکدانه‌ها در دو شکل کاتنا در سطح پنج درصد و در موقعیت‌های مختلف کاتنا در



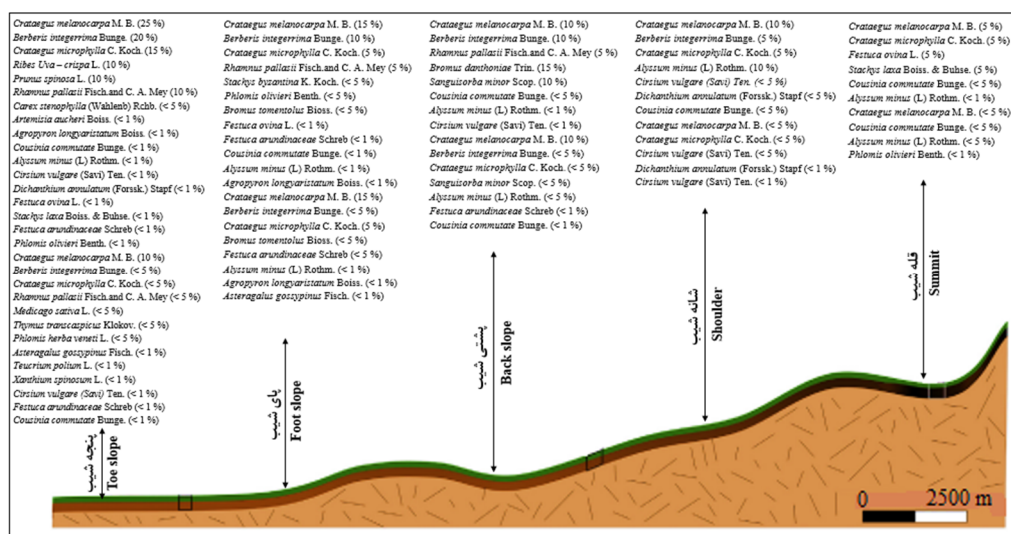
شکل ۱- چکیده تصویری.

Figure 1. Graphical abstract.



شکل ۲- موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان مازندران در شمال ایران، نحوه استقرار قطعه‌نمونه‌ها در شکل‌های مختلف کاتنا.

Figure 2. Location of the study area in Mazandaran Province, northern Iran and arrangement of sample plots in different catena landforms.



شکل 3- شرح پوشش‌های زمین در موقعیت‌های مختلف کاتناهای V شکل و A شکل.

Figure 3. Description of land covers at different positions of V-shaped and A-shaped catenas.

کلیسم و منیزیم موجود در ریشه‌ها با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد (27). جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم‌ها، خاک در شرایط استاندارد و در یک بستر کافی انکوباسیون شدند و بر اساس اندازه‌گیری رنگ‌سنجی محصول آزاد شده از آنزیم، نرخ فعالیت آنزیم با استفاده از روش‌های استاندارد مشخص گردید. میزان فعالیت آنزیم آورده‌آز با استفاده از 200 میلی‌مول آورده به عنوان سوبسترا، در شرایط استاندارد (به مدت 2 ساعت در دمای 27 درجه سانتی‌گراد) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری نرخ فعالیت آنزیم فسفاتاز از 15 میلی‌مولار پارانیتروفیل فسفات به‌عنوان سوبسترا در شرایط $pH=11$ به مدت 1 ساعت و دمای 37 درجه سانتی‌گراد استفاده شده است. جهت اندازه‌گیری فعالیت آنزیم آریل سولفاتاز به مدت 1 ساعت در دمای 37 درجه سانتی‌گراد نمونه را در پارانیتروفیل سولفات انکوباسیون شده و با توجه به میزان پارانیتروفیل آزاد شده طی هیدرولیز توسط دستگاه اسپکتروفتومتر تعیین گردید. نرخ فعالیت آنزیم اینورتاز از محلول گلوکز که به عنوان سوبسترا استفاده شده است به مدت 3 ساعت در دمای 50

روش نمونه‌برداری و تجزیه آزمایشگاهی: به‌منظور انجام این پژوهش، سه ساختار کاتنا V شکل و سه ساختار کاتنا A شکل مدنظر قرار گرفت (تلاش شد ساختارهای مورد مطالعه از نظر مواد مادری، جهت کلی شیب، درصد شیب و زوایای موجود تقریباً مشابه یکدیگر باشند تا مقدار خطاها به حداقل کاهش یابد). در این ساختارها، قسمت‌های قله شیب، شانه شیب، پستی شیب، پای شیب و پنجه شیب مشخص شد. در محل هر یک از موقعیت‌های پنج‌گانه مورد بررسی در عرض کاتنا، قطعات نمونه مستقر شد و نمونه‌برداری از سطح 30×30 سانتی‌متر و عمق‌های 0-15، 15-30 و 30-45 سانتی‌متری خاک انجام شد. نمونه‌های خاک به آزمایشگاه انتقال داده شده و درشت‌ریشه‌ها و ریزریشه‌ها از نمونه‌ها جداسازی (بر مبنای عمق 0-45 سانتی‌متری) شده و با الک 2 میلی‌متری شستشو داده شدند. نمونه‌های ریشه به مدت 24 ساعت در آون با دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد و خشک شدند (26). سپس این نمونه‌های خشک توزین شده، مقدار زیتوده آن‌ها محاسبه شده و میزان کربن، نیتروژن، نسبت کربن به نیتروژن، فسفر، پتاسیم،

درجه سانتی‌گراد انکوباسیون و سپس اندازه‌گیری شد (28).

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها: در اولین مرحله، نرمال بودن داده‌ها به وسیله آزمون کولموگروف - اسمیرنوف و همگن بودن واریانس داده‌ها با استفاده از آزمون لون مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی تفاوت یا عدم تفاوت مقادیر مشخصه‌های مورد بررسی، از تجزیه واریانس استفاده شد. مشخصه‌های خاک با استفاده از آزمون GLM و در قالب طرح کرت‌های دوبار خردشده (Split plot) تجزیه و تحلیل شدند. برای تحلیل ویژگی‌های ریشه، تجزیه واریانس دوطرفه (Two-way ANOVA) به منظور بررسی تأثیر متقابل دو عامل مستقل (شکل کاتنا و موقعیت‌های آن) بر روی متغیر وابسته انجام شد. از سوی دیگر، در تحلیل ویژگی‌های بیوشیمیایی خاک از تجزیه واریانس سه‌طرفه (Three-way ANOVA) جهت بررسی تأثیر متقابل سه عامل مستقل (شکل کاتنا، موقعیت‌های کاتنا و عمق خاک) بر روی متغیر وابسته استفاده شد. آزمون دانکن نیز به منظور مقایسه چندگانه میانگین بکار گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری کلیه داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه 20 انجام شد. برای بررسی بر مبنای پارامترهای مختلف، از بین تمامی مشخصه‌های اندازه‌گیری شده، هم‌چنین برای بررسی ارتباط بین متغیرهای مورد بررسی، شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا از تجزیه و تحلیل چندمتغیره و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) با استفاده از برنامه PC - ORD استفاده شد.

نتایج و بحث

اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های ریشه: نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مشخصه‌های درشت‌ریشه نشان داد که زیتوده درشت‌ریشه، فسفر و کلسیم ریزریشه در دو

شکل کاتنا در سطوح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان داد. نتایج نشان داد که مقادیر آن‌ها در کاتنای V شکل بیش‌تر از کاتنای A شکل بود و مقدار زیتوده درشت‌ریشه (645/57 گرم بر مترمربع)، فسفر (1/45 درصد) و کلسیم (0/38 درصد) اندازه‌گیری شد، هم‌چنین کربن درشت‌ریشه (18/70 درصد) در سطح پنج درصد در کاتنای V شکل بیش‌ترین مقدار را داشت. زیتوده درشت‌ریشه (801/16 گرم بر مترمربع)، کربن (24/30 درصد)، فسفر (1/64 درصد)، کلسیم (0/46 درصد) و منیزیم (0/31 درصد) در موقعیت‌های مختلف شیب در سطوح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان داد و بیش‌ترین مقدار آن‌ها در پنجه شیب بوده است. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس مشخصه‌های ریزریشه نشان داد که زیتوده ریزریشه (35/92 گرم بر مترمربع)، فسفر (2/32 درصد)، پتاسیم (1/39 درصد) و کلسیم (0/86 درصد) ریزریشه در دو شکل کاتنا در سطوح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار داشته و بیش‌ترین مقادیر آن‌ها در کاتنای V شکل اندازه‌گیری شد. هم‌چنین نیتروژن (0/44 درصد) و منیزیم (0/69 درصد) ریزریشه در شکل کاتنا و در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار داشته و بیش‌ترین مقدار آن‌ها نیز در کاتنای V شکل مشاهده شد.

در موقعیت‌های مختلف شیب به‌غیر از کربن ریزریشه (34/30 درصد) که در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان داد، دیگر مشخصه‌ها از جمله زیتوده ریزریشه (47/24 گرم بر مترمربع)، نیتروژن (0/54 درصد)، فسفر (3/02 درصد)، پتاسیم (1/55 درصد)، کلسیم (1/07 درصد) و منیزیم (0/87 درصد) در سطوح یک و پنج درصد در موقعیت پنجه شیب بیش‌ترین مقدار را داشته‌اند. نتایج به‌دست آمده از تجزیه واریانس میانگین مشخصه‌های درشت و ریزریشه نشان داد که به‌غیر از میانگین کربن (24/71 درصد) و

مکمل یکدیگر هستند و توان جذب عناصر غذایی افزایش یافته و به همین دلیل زیتوده ریشه‌ها در موقعیت‌های پایین کاتنا بیش‌تر می‌باشد (31).

برخی از پژوهش‌گران بیان کرده‌اند که ریشه‌ها تحت‌تأثیر مشخصه‌های خاک قرار می‌گیرند. در موقعیت‌های پای و پنجه شیب ممکن است به دلیل کیفیت بهتر خاک، دارای پوشش گیاهی بیش‌تر و به‌دنبال آن مواد آلی ضخیم‌تری در لایه سطحی خاک باشد. یکی از ویژگی‌های اصلی لایه آلی، ساختار اسفنجی آن است که باعث حفظ رطوبت خاک شده و منجر به افزایش زیتوده ریشه‌ها شده است، زیرا افزایش رطوبت، جذب عناصر غذایی توسط ریشه‌ها را تسهیل می‌کند (32 و 33). کاهش درصد پوشش گیاهی در موقعیت‌های بالایی کاتنا و افزایش آبشویی عناصر غذایی منجر به کاهش عناصر غذایی و در نتیجه اثرات منفی بر زیتوده ریشه شده است (34). پژوهش‌های پیشین بیان کرده‌اند که بین محتوی عناصر غذایی خاک و عناصر غذایی ریشه‌ها ارتباط نزدیکی وجود دارد (35 و 13). نتایج این پژوهش نشان داد که عناصر غذایی ریشه‌ها در موقعیت‌های پای و پنجه کاتنا بیش‌تر از موقعیت‌های بالایی بوده است که این نتایج بیانگر حاصلخیزتر بودن خاک موقعیت‌های پایینی کاتناهای مورد مطالعه می‌باشد. هم‌چنین میزان عناصر غذایی به‌ویژه کربن و نیتروژن در ریزریشه بیش‌تر از درشت‌ریشه می‌باشد. در همین ارتباط، نتایج پژوهشی بیان کرده است که نگهداری و استقرار گیاهان در خاک بر عهده درشت‌ریشه‌ها می‌باشد و جذب عناصر غذایی برای رشد گیاهان توسط ریزریشه‌ها صورت می‌گیرد (36).

منیزیم (0/45 درصد) که در شکل کاتنا در سطح پنج درصد تفاوت معنی‌دار داشته، دیگر مشخصه‌ها از جمله میانگین زیتوده درشت و ریزریشه (502/39 گرم بر مترمربع)، نیتروژن (0/38 درصد)، فسفر (1/89 درصد)، پتاسیم (1/19 درصد) و کلسیم (0/62 درصد) در شکل کاتنا سطوح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار داشته و بیش‌ترین مقادیر آن‌ها در کاتنا V شکل اندازه‌گیری شده است. میانگین زیتوده درشت و ریزریشه (636/81 گرم بر مترمربع)، کربن (29/30 درصد)، نیتروژن (0/44 درصد)، فسفر (2/32 درصد)، پتاسیم (1/30 درصد)، کلسیم (0/77 درصد) و منیزیم (0/59 درصد) بیش‌ترین مقدار را در پنجه شیب داشته و در موقعیت‌های مختلف کاتنا در سطوح یک و پنج درصد تفاوت معنی‌دار نشان دادند (جدول‌های 2 و 3). توپوگرافی منطقه گیل‌کلا به‌طور قابل‌توجهی بر ویژگی‌های خاک از طریق مکانیسم‌های مختلف تأثیر می‌گذارد. ناهمگونی توپوگرافی، ریزاقلیم‌هایی را ایجاد می‌کند که از گونه‌های گیاهی متنوع پشتیبانی می‌کند، و اجازه می‌دهد در موقعیت‌های مختلف پوشش گیاهی و به‌دنبال آن مشخصه‌های ریشه تغییر کنند (29). تراکم پوشش گیاهی، زیتوده ریشه‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (30). در همین ارتباط، کاهش درصد پوشش گیاهی در موقعیت‌های بالای کاتنا منجر به کاهش میزان زیتوده ریشه شده است. هم‌چنین تراکم گونه‌ها در موقعیت‌های پای و پنجه شیب بیش‌تر بوده که موجب افزایش زیتوده ریشه‌ها در این موقعیت‌ها شده است. در واقع، رابطه بین تعداد گونه‌ها و زیتوده ریشه‌ها بیانگر این است که مجموعه‌ای از گیاهان مختلف که در استفاده از منابع

جدول 1- اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های ریشه.

Table 1. The effect of different shapes and positions of catena on root characteristics.

شکل × موقعیت‌های مختلف کاتنا Catena shape × Catena positions	موقعیت‌های کاتنا Catena positions	شکل کاتنا Catena shape	مشخصه‌های ریشه Root properties
1.091 ^{ns}	12.753**	11.358**	زیتوده درشت‌ریشه Coarse root biomass
0.216 ^{ns}	13.867**	4.549*	کربن درشت‌ریشه Coarse root Carbon
0.022 ^{ns}	1.908 ^{ns}	2.877 ^{ns}	نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root Nitrogen
0.402 ^{ns}	0.354 ^{ns}	0.004 ^{ns}	نسبت کربن به نیتروژن درشت‌ریشه Coarse root C.N ratio
1.217 ^{ns}	6.378**	8.382**	فسفر درشت‌ریشه Coarse root phosphorus
0.030 ^{ns}	1.068 ^{ns}	1.782 ^{ns}	پتاسیم درشت‌ریشه Coarse root potassium
0.527 ^{ns}	5.730**	8.329**	کلسیم درشت‌ریشه Coarse root calcium
0.172 ^{ns}	5.525**	1.228 ^{ns}	منیزیم درشت‌ریشه Coarse root magnesium
1.169 ^{ns}	7.942**	8.694**	زیتوده ریزریشه Fine root biomass
0.024 ^{ns}	3.095*	2.308 ^{ns}	کربن ریزریشه Fine root Carbon
0.316 ^{ns}	6.390**	4.524*	نیتروژن ریزریشه Fine root Nitrogen
0.770 ^{ns}	1.237 ^{ns}	0.645 ^{ns}	نسبت کربن به نیتروژن ریزریشه Fine root C.N ratio
1.027 ^{ns}	25.178**	12.988**	فسفر ریزریشه Fine root phosphorus
0.964 ^{ns}	5.745**	10.084**	پتاسیم ریزریشه Fine root potassium
0.440 ^{ns}	15.286**	8.321**	کلسیم ریزریشه Fine root calcium
0.612 ^{ns}	18.490**	4.316*	منیزیم ریزریشه Fine root magnesium
2.452*	23.312**	22.673**	زیتوده ریشه Root biomass
0.098 ^{ns}	11.834**	5.826*	کربن ریشه Root carbon
0.165 ^{ns}	6.605**	6.490**	نیتروژن ریشه Root nitrogen
1.154 ^{ns}	1.021 ^{ns}	0.416 ^{ns}	نسبت کربن به نیتروژن ریشه Root C.N ratio
1.806 ^{ns}	29.238**	20.377**	فسفر ریشه Root phosphorus
0.871 ^{ns}	6.612**	11.542**	پتاسیم ریشه Root potassium
0.732 ^{ns}	17.027**	13.013**	کلسیم ریشه Root calcium
0.706 ^{ns}	22.088**	5.090*	منیزیم ریشه Root magnesium

^{ns} عدم معنی‌داری، * معنی‌داری در سطح احتمال 5٪، ** معنی‌داری در سطح احتمال 1٪

^{ns} non-significance, * significance at the 5% probability level, ** significance at the 1% probability level

جدول ۲- مقایسه میانگین (± اشتباه معیار) اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های ریشه.

موقعیت‌های کاتنا (Catena positions)					شکل کاتنا (V shape)		مشخصه‌های ریشه	
پنجه (Toe)	پای (Foot)	پشتی (Back slope)	پشتی (Shoulder)	قله (Summit)	شکل (V shape)	شکل (Λ shape)	Root properties	ریشه
801.16±51.98 ^a	728.77±44.95 ^a	501.66±78.60 ^b	413.22±53.98 ^b	385.83±42.75 ^b	486.69±34.27 ^b	645.57±47.37 ^a	زیاده درشت‌ریشه (Coarse root biomass) (g.m ²)	زیاده درشت‌ریشه (Coarse root biomass)
24.30±2.35 ^a	22.94±2.14 ^a	15.02±1.42 ^b	12.01±0.80 ^b	11.44±0.76 ^b	15.58±1.14 ^b	18.70±1.41 ^a	کربن درشت‌ریشه (Coarse root Carbon) (%)	کربن درشت‌ریشه (Coarse root Carbon)
0.35±0.04 ^a	0.32±0.02 ^a	0.28±0.03 ^a	0.25±0.04 ^a	0.23±0.03 ^a	0.26±0.02 ^a	0.31±0.02 ^a	نیترژن درشت‌ریشه (Coarse root Nitrogen) (%)	نیترژن درشت‌ریشه (Coarse root Nitrogen)
85.56±10.72 ^a	77.64±8.91 ^a	77.88±16.93 ^a	73.92±11.91 ^a	65.34±10.33 ^a	75.71±7.72 ^a	76.43±7.42 ^a	نسبت کربن به نیترژن درشت‌ریشه (Coarse root C.N ratio)	نسبت کربن به نیترژن درشت‌ریشه (Coarse root C.N ratio)
1.62±0.12 ^a	1.58±0.12 ^a	1.17±0.12 ^b	1.10±0.09 ^b	1.04±0.08 ^b	1.16±0.04 ^b	1.45±0.09 ^a	فسفر درشت‌ریشه (Coarse root phosphorus) (%)	فسفر درشت‌ریشه (Coarse root phosphorus)
1.04±0.07 ^a	1.00±0.04 ^a	0.93±0.07 ^a	0.90±0.06 ^a	0.88±0.06 ^a	0.91±0.04 ^a	0.99±0.03 ^a	پتاسیم درشت‌ریشه (Coarse root potassium) (%)	پتاسیم درشت‌ریشه (Coarse root potassium)
0.46±0.05 ^a	0.41±0.04 ^{ab}	0.29±0.02 ^{bc}	0.26±0.03 ^c	0.23±0.04 ^c	0.28±0.02 ^b	0.38±0.03 ^a	کلسیم درشت‌ریشه (Coarse root calcium) (%)	کلسیم درشت‌ریشه (Coarse root calcium)
0.31±0.06 ^a	0.26±0.04 ^{ab}	0.16±0.02 ^{bc}	0.12±0.02 ^c	0.09±0.02 ^c	0.17±0.02 ^a	0.21±0.02 ^a	منیزیم درشت‌ریشه (Coarse root magnesium) (%)	منیزیم درشت‌ریشه (Coarse root magnesium)
47.24±5.38 ^a	37.90±6.23 ^{ab}	25.63±3.88 ^{bc}	22.09±3.10 ^c	18.98±2.14 ^c	24.82±2.52 ^b	35.92±3.51 ^a	زیاده ریزریشه (Fine root biomass) (g.m ²)	زیاده ریزریشه (Fine root biomass)
34.30±2.65 ^a	33.69±1.47 ^a	27.17±2.05 ^{ab}	25.15±2.29 ^b	24.01±4.21 ^b	27.00±1.85 ^a	30.73±1.69 ^a	کربن ریزریشه (Fine root Carbon) (%)	کربن ریزریشه (Fine root Carbon)
0.54±0.03 ^a	0.48±0.03 ^a	0.36±0.04 ^b	0.35±0.02 ^b	0.33±0.04 ^b	0.37±0.02 ^b	0.44±0.02 ^a	نیترژن ریزریشه (Fine root Nitrogen) (%)	نیترژن ریزریشه (Fine root Nitrogen)
64.93±3.81 ^a	78.24±7.79 ^a	116.88±36.75 ^a	75.61±7.54 ^a	75.52±12.71 ^a	88.20±15.70 ^a	75.08±4.55 ^a	نسبت کربن به نیترژن ریزریشه (Fine root C.N ratio)	نسبت کربن به نیترژن ریزریشه (Fine root C.N ratio)
3.02±0.21 ^a	2.76±0.21 ^a	1.68±0.09 ^b	1.54±0.09 ^b	1.43±0.13 ^b	1.85±0.11 ^b	2.32±0.15 ^a	فسفر ریزریشه (Fine root phosphorus) (%)	فسفر ریزریشه (Fine root phosphorus)
1.55±0.16 ^a	1.50±0.12 ^a	1.11±0.09 ^b	1.02±0.07 ^b	0.90±0.14 ^b	1.04±0.07 ^b	1.39±0.09 ^a	پتاسیم ریزریشه (Fine root potassium) (%)	پتاسیم ریزریشه (Fine root potassium)
1.07±0.06 ^a	1.03±0.08 ^a	0.67±0.05 ^b	0.59±0.05 ^b	0.55±0.05 ^b	0.70±0.03 ^b	0.86±0.06 ^a	کلسیم ریزریشه (Fine root calcium) (%)	کلسیم ریزریشه (Fine root calcium)
0.87±0.02 ^a	0.82±0.03 ^a	0.57±0.04 ^b	0.54±0.05 ^b	0.47±0.04 ^b	0.62±0.03 ^b	0.69±0.03 ^a	منیزیم ریزریشه (Fine root magnesium) (%)	منیزیم ریزریشه (Fine root magnesium)
636.81±47.23 ^a	553.92±39.25 ^a	379.01±34.50 ^b	317.07±32.18 ^b	287.8±25.31 ^b	367.48±24.18 ^b	502.39±32.93 ^a	زیاده ریشه (Root biomass) (g.m ²)	زیاده ریشه (Root biomass)
29.30±1.86 ^a	28.31±1.05 ^a	21.09±1.38 ^b	18.58±1.28 ^b	17.73±2.14 ^b	21.29±1.11 ^b	24.71±1.29 ^a	کربن ریشه (Root carbon) (%)	کربن ریشه (Root carbon)
0.44±0.03 ^a	0.40±0.01 ^{ab}	0.32±0.02 ^{bc}	0.30±0.02 ^c	0.28±0.03 ^c	0.32±0.01 ^b	0.38±0.02 ^a	نیترژن ریشه (Root nitrogen) (%)	نیترژن ریشه (Root nitrogen)
75.25±6.00 ^a	77.94±4.55 ^a	97.38±19.96 ^a	74.77±6.79 ^a	68.93±8.78 ^a	81.95±8.62 ^a	75.75±4.34 ^a	نسبت کربن به نیترژن ریشه (Root C.N ratio)	نسبت کربن به نیترژن ریشه (Root C.N ratio)
2.32±0.13 ^a	2.17±0.13 ^a	1.43±0.07 ^b	1.32±0.07 ^b	1.23±0.09 ^b	1.50±0.06 ^b	1.89±0.11 ^a	فسفر ریشه (Root phosphorus) (%)	فسفر ریشه (Root phosphorus)
1.30±0.09 ^a	1.25±0.06 ^a	1.02±0.07 ^b	0.96±0.05 ^b	0.89±0.08 ^b	0.98±0.04 ^b	1.19±0.05 ^a	پتاسیم ریشه (Root potassium) (%)	پتاسیم ریشه (Root potassium)
0.77±0.04 ^a	0.72±0.05 ^a	0.48±0.03 ^b	0.42±0.03 ^b	0.39±0.04 ^b	0.49±0.02 ^b	0.62±0.04 ^a	کلسیم ریشه (Root calcium) (%)	کلسیم ریشه (Root calcium)
0.59±0.03 ^a	0.54±0.03 ^a	0.36±0.02 ^b	0.33±0.02 ^b	0.28±0.02 ^b	0.39±0.02 ^b	0.45±0.02 ^a	منیزیم ریشه (Root magnesium) (%)	منیزیم ریشه (Root magnesium)

حروف‌های انگلیسی در هر سطر و ستون نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار (<P/0.05) در مشخصه‌ها بین شکل، موقعیت‌های مختلف کاتنا و عمق‌های مورد مطالعه می‌باشند.
The English letters in each row and column indicate significant differences (P<0.05) in characteristics between the shapes, positions of the catena, and the studied depths

اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های بیوشیمی: نتایج به‌دست آمده از اندازه‌گیری آنزیم‌های مورد بررسی نشان داد که در شکل کاتنا آنزیم‌های اسید فسفاتاز، آریل سولفاتاز و اینورتاز در سطوح یک و پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار بوده و این آنزیم‌ها در کاتنای V شکل به‌ترتیب با مقادیر $260/67 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ و $207/89 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$ و $229/40$ بیش‌ترین مقدار را داشتند. در موقعیت‌های مختلف شیب این آنزیم‌ها در سطوح یک و پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار بوده و بیش‌ترین مقدار آن‌ها به ترتیب اوره‌آز ($21/04 \mu\text{g NH}_4^+ -\text{N g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، آریل اسید فسفاتاز ($402/35 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$)، آریل سولفاتاز ($350/55 \mu\text{g PNP g}^{-1} \text{h}^{-1}$) و اینورتاز ($307/77 \mu\text{g Glucose g}^{-1} \text{h}^{-1}$) در پنجه شیب مشاهده شده است. در عمق‌های مختلف خاک بجز آریل سولفاتاز که در سطح پنج درصد دارای تفاوت معنی‌دار بود، دیگر آنزیم‌ها در سطوح یک و پنج درصد دارای اختلاف معنی‌دار بوده‌اند و بیش‌ترین مقدار آن‌ها در لایه سطحی (0-15 سانتی‌متری) خاک اندازه‌گیری شد (جدول 3 و شکل 4). مشخصه‌های آنزیمی به تغییرات شکل زمین و پوشش گیاهی به سرعت واکنش نشان می‌دهند، بنابراین از این مشخصه‌ها به عنوان متغیرهای اولیه تغییرات زیستی خاک به حساب می‌آیند (37). باتوجه به نتایج این پژوهش همه آنزیم‌هایی مورد بررسی به‌جز اوره‌آز تحت‌تأثیر شکل کاتنا قرار گرفته و دارای تفاوت معنی‌دار بوده و بیش‌ترین مقدار را در کاتنای V شکل داشته‌اند. در همین ارتباط لی و همکاران (2018) و ریس و همکاران (2010) بیان کردند که بین مقدار رطوبت و فعالیت آنزیم اوره‌آز ارتباط مستقیم و مثبتی وجود دارد (38 و 39) به همین دلیل طبق نتایج پژوهش حاضر در لایه بالایی خاک در موقعیت‌های

پای و پنجه شیب بیش‌ترین مقدار این آنزیم مشاهده شد. در همین راستا در موقعیت‌های پایین شیب که پوشش گیاهی و تجمع لاشه‌ریزه بیش‌تر است، بنابراین لایه آلی خاک تقویت شده و باعث می‌شود که محتوی رطوبت بیش‌تری در این موقعیت‌ها وجود داشته باشد. از طرفی لایه آلی در عمق 0-15 سانتی‌متری خاک واقع شده و رطوبت در این لایه بیش‌تر وجود دارد که باعث شد افزایش فعالیت آنزیم اوره‌آز در این عمق مشاهده شود. هم‌چنین آنزیم اوره‌آز تحت‌تأثیر عناصر غذایی قرار می‌گیرد (20). افزایش مقادیر عناصر غذایی در موقعیت‌های پای و پنجه شیب سبب شده است که فعالیت این آنزیم‌ها افزایش پیدا کند. در منطقه مورد مطالعه با افزایش رطوبت و عناصر غذایی در موقعیت‌های پایین شیب کاتنای V شکل، افزایش فعالیت آنزیم اسید فسفاتاز مشاهده شد (18). از طرفی با افزایش پوشش گیاهی و لاشه‌ریزه در این موقعیت‌ها، میزان شدت نور کاهش یافته و سبب افزایش فعالیت این آنزیم در لایه سطحی خاک شده است (40). آنزیم آریل سولفاتاز، یک نوع از آنزیم‌هایی است که نقش مهمی در تجزیه مواد آلی و معدنی‌سازی عناصر در خاک‌ها دارد و تحت‌تأثیر شکل زمین قرار می‌گیرد (41). همان‌طور که گفته شد افزایش محتوی رطوبت و عناصر غذایی که باعث افزایش حاصلخیزی خاک می‌شود، فعالیت آنزیم‌ها از جمله آنزیم آریل سولفاتاز را نیز در پنجه کاتنای V شکل افزایش داده است (42). در چرخه کربن و نیتروژن آنزیم اینورتاز نقش مهمی را ایفا کرده و باعث می‌شود که ساکاروز به گلوکز و فروکتوز تبدیل شود (19). در همین ارتباط بین مقادیر کربن و نیتروژن در خاک و این آنزیم ارتباط مستقیم وجود دارد (20). افزایش مقادیر این عناصر در ریشه‌ها و خاک سطحی در موقعیت‌های پای و پنجه کاتنای V شکل سبب افزایش فعالیت آنزیم اینورتاز شده است.

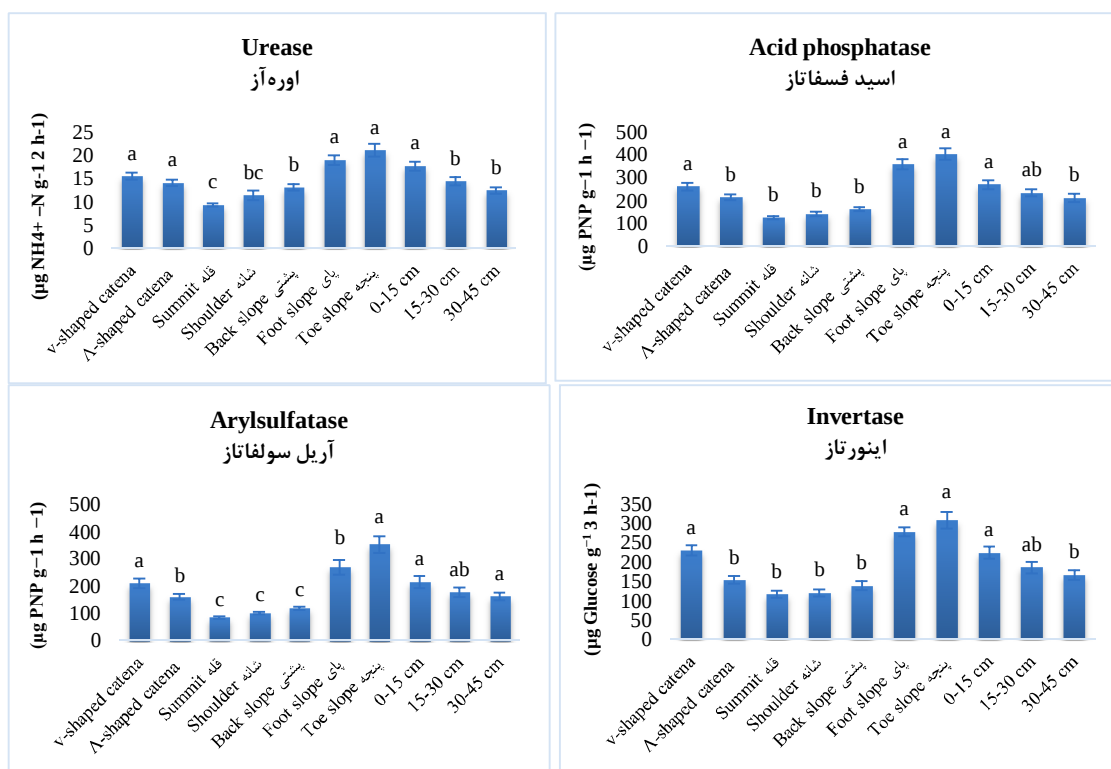
جدول 3- اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های بیوشیمی.

Table 3. The effect of different shapes and positions of catena on biochemical characteristics.

متغیرهای اصلی Main variables	آنزیم اوره‌آز Urease enzyme	آنزیم اسید فسفاتاز Acidphosphatase enzyme	آنزیم آریل سولفاتاز Arylsulfatase enzyme	آنزیم اینورتاز Invertase enzyme
شکل کاتنا Catena shape	2.873 ^{ns}	10.315**	8.850**	35.052**
موقعیت‌های کاتنا Catena positions	28.043**	64.181**	42.294**	42.736**
شکل × موقعیت‌های کاتنا Catena shape × Catena positions	0.467 ^{ns}	1.331 ^{ns}	2.810*	1.991 ^{ns}
عمق خاک Soil depth	13.520**	5.061**	3.592*	7.194**
شکل کاتنا × عمق خاک Catena shape × Soil depth	0.128 ^{ns}	0.009 ^{ns}	0.298 ^{ns}	0.143 ^{ns}
موقعیت‌های کاتنا × عمق خاک Catena positions × Soil depth	0.438 ^{ns}	0.584 ^{ns}	0.278 ^{ns}	0.237 ^{ns}
شکل کاتنا × موقعیت‌های کاتنا × عمق خاک Catena shape × Catena positions × Soil depth	0.042 ^{ns}	0.044 ^{ns}	0.036 ^{ns}	0.153 ^{ns}

^{ns} عدم معنی داری، * معنی داری در سطح احتمال 5٪، ** معنی داری در سطح احتمال 1٪

^{ns} non-significance, * significance at the 5% probability level, ** significance at the 1% probability level



شکل 4- مقایسه میانگین (± اشتباه معیار) اثر شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های بیوشیمی.

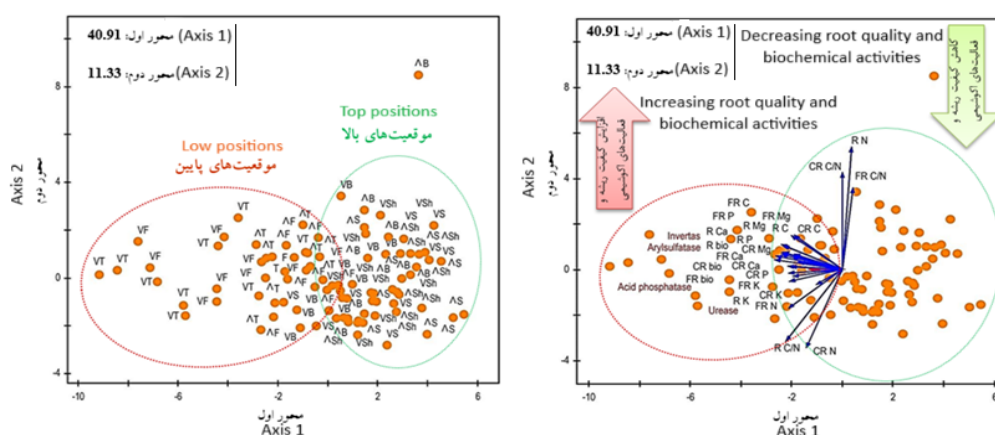
Figure 4. Comparison of means (± Standard Error) of the effect of different shapes and positions of catena on biochemical characteristics.

حروف‌های انگلیسی نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار ($P < 0.05$) مشخصه‌ها بین شکل، موقعیت‌های مختلف کاتنا و عمق‌های مورد مطالعه می‌باشند.

The English letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in characteristics between the shapes, positions of the catena, and the studied depths.

نشان داده شده است (شکل 5). به‌طورکلی، بین توپوگرافی و فعالیت‌های زیستی خاک روابط مؤثری وجود دارد (43). در این مطالعه اثر شکل و موقعیت کاتنا را بر مشخصه‌های ریشه و خاک در منطقه نیمه‌خشک کمی‌سازی شده است. PCA یک واگرایی مناسب از ویژگی‌های خاک بین موقعیت‌های مختلف کاتنا را شناسایی کرده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد کیفیت ریشه و فعالیت بیوشیمی خاک بیش‌ترین مقادیر را در موقعیت پای و پنجه شیب دارد. بنابراین می‌توان بیان کرد که حاصلخیزی بیش‌تر خاک در مناطق نیمه‌خشک می‌تواند باعث افزایش مشخصه‌های زیستی خاک شود. بنابراین، احیای موقعیت‌های پایین‌تر در چشم‌انداز کاتنا و منطقه نیمه‌خشک می‌تواند شرایط بهتری از چرخه پویایی زیستی و مواد مغذی خاک را فراهم کند.

ارتباط شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا با مشخصه‌های ریشه و فعالیت بیوشیمی؛ نتایج تجزیه مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که به‌طورکلی بین توپوگرافی و مشخصه‌های خاک روابط مؤثر وجود دارد. هم‌چنین بین ویژگی‌های ریشه و خاک در موقعیت‌های مختلف کاتنا همبستگی بالایی را شناسایی کرد. تجزیه مؤلفه‌های اصلی در ارتباط با شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا نشان داد که موقعیت‌های پای و پنجه شیب در هر دو شکل کاتنا در سمت چپ نمودار مشاهده شده‌اند. در سمت چپ تصویر بالا بودن کیفیت ریشه و هم‌چنین فعالیت بیوشیمی بیشتری مشاهده شد. از طرف دیگر در سمت راست تصویر موقعیت‌های قله و شانه در کاتناهای مختلف پراکنش بیشتری داشته و از مشخصه‌های مورد بررسی نیست عناصر در ریشه‌ها



شکل 5- ارتباط شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا (تصویر سمت چپ) با مشخصه‌های ریشه و بیوشیمی (تصویر سمت راست) در آنالیز مؤلفه‌های اصلی؛ کاتنا V شکل (VS: قله شیب، VSh: شانه شیب، VB: پستی شیب، VF: پای شیب، VT: پنجه شیب)؛ کاتنا A شکل (AS: قله شیب، ASH: شانه شیب، AB: پستی شیب، AF: پای شیب، AT: پنجه شیب)؛ ریشه (RC: کرین کل، RN: نیتروژن کل، RP: فسفر، RK: پتاسیم، RCa: کلسیم، RMg: منیزیم، RC/N: نسبت کرین به نیتروژن)؛ ریزریشه (RC: کرین کل، FRN: نیتروژن کل، FRP: فسفر، FRK: پتاسیم، FRCa: کلسیم، FRMg: منیزیم، FRC/N: نسبت کرین به نیتروژن)؛ درشت‌ریشه (CRC: کرین کل، CRN: نیتروژن کل، CRP: فسفر، CRK: پتاسیم، CRCa: کلسیم، CRMg: منیزیم، CRC/N: نسبت کرین به نیتروژن).

Figure 5. The relationship between different shapes and positions of catena (left image) with root and biochemical characteristics (right image) in principal component analysis; V-shaped catena (VS: summit slope, VSh: shoulder slope, VB: back slope, VF: foot slope, VT: toe slope); A-shaped catena (AS: summit slope, ASh: shoulder slope, AB: back slope, AF: foot slope, AT: toe slope); root (R C: total carbon, R N: total nitrogen, R P: phosphorus, R K: potassium, R Ca: calcium, R Mg: magnesium, R C/N: carbon to nitrogen ratio); fine root (FR C: total carbon, FR N: total nitrogen, FR P: phosphorus, FR K: potassium, FR Ca: calcium, FR Mg: magnesium, FR C/N: carbon to nitrogen ratio); coarse root (CR C: total carbon, CR N: total nitrogen, CR P: phosphorus, CR K: potassium, CR Ca: calcium, CR Mg: magnesium, CR C/N: carbon to nitrogen ratio).

نتیجه‌گیری کلی

شکل زمین به‌طور قابل‌توجهی بر ویژگی‌های خاک تأثیر می‌گذارد که به‌نوبه خود بر ساختارهای جامعه گیاهی و ویژگی‌های ریشه تأثیر می‌گذارد. یافته‌های پژوهش حاضر بیان می‌کند که شکل‌ها و موقعیت‌های مختلف کاتنا بر مشخصه‌های خاک اثر قابل‌توجهی دارند. ویژگی‌های ریشه شامل زی‌توده و عناصر غذایی (کربن، نیتروژن، فسفر، پتاسیم، کلسیم و منیزیم) در ریزریشه‌ها و درشت‌ریشه‌ها و فعالیت‌های آنزیمی خاک در موقعیت‌های پایینی کاتنا افزایش معنی‌داری را نشان داد. درواقع می‌توان بیان کرد که مواد آلی ورودی، آبشویی عناصر غذایی و میکروکلیمای مناسب می‌تواند باعث افزایش فعالیت‌های زیستی شود، درحالی‌که کاهش درصد پوشش گیاهی در موقعیت‌های بالایی اثرات منفی بر اجزای زیرزمینی خاک دارد. تأثیر متقابل بین این عوامل می‌تواند بیش‌هایی را در مورد حاصلخیزی خاک و پویایی بوم‌سازگان ارائه دهد. بنابراین نتایج این پژوهش حفاظت از موقعیت‌های پای و پنجه کاتنا جهت افزایش حاصلخیزی و سلامت خاک را تأیید می‌کند. هم‌چنین می‌تواند به ارزیابی چرخه عناصر غذایی در مناطق شمالی ایران کمک شایانی نماید.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از دانشگاه تربیت مدرس، که موجبات تسهیل انجام این پژوهش را فراهم نموده‌اند، تشکر می‌نمایند.

داده‌ها و اطلاعات

داده‌های این پژوهش مربوط به رساله دوره دکتری نویسنده اول است که در سال‌های 1403 انجام شده است و با مکاتبه با نویسنده مسئول قابل دسترسی می‌باشند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به‌صورت زیر است:

نویسنده اول: طرح موضوع پژوهش، طرح تحقیق و روش‌شناسی، نظارت تحقیق، تهیه پیش‌نویس مقاله، اصلاح و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده دوم: داده‌برداری میدانی، تجزیه و تحلیل داده‌ها و استخراج نتایج.

نویسنده سوم: تهیه و آماده‌سازی داده‌ها، تجزیه و تحلیل داده‌ها، نظارت تحقیق.

اصول اخلاقی انجام و انتشار تحقیق

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌ها می‌باشد.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت مدرس انجام شده است.

منابع

- Goodarzi, M., Fadaei Jazi, F., & Soltani, Z. (2024). Investigating the ecological capacity of Shahin Shahr's physical development. *Spatial Planning*. 13, 47-70.
- Kooch, Y., & Hosseini, S. M. (2015). Forest soil ecology (Concepts and Algorithms). *Jahad Daneshgahi Publications Mazandaran branch*. 456 p. [In Persian]
- Ma, W., Li, Z., Ding, K., Huang, B., Nie, X., Lu, Y., & Xiao, H. (2016). Soil erosion, organic carbon and nitrogen dynamics in planted forests: a case study in a hilly catchment of Hunan Province. China. *Soil and Tillage Research*, 155, 69-77.
- Conforti, M., Longobucco, T., Scarciglia, F., Niceforo, G., Matteucci, G., & Buttafuoco, G. (2020). Interplay between soil formation and geomorphic processes along a soil catena in a Mediterranean mountain landscape: an integrated pedological and geophysical approach. *Environmental Earth Sciences*. 79, 1-16.
- Wang, L., Wang, L., Zhang, W., Meng, X., Liu, S., & Zhu, C. (2024). Time series prediction of reservoir bank landslide failure probability considering the spatial variability of soil properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 16, 3951-3960.
- Daniel, M., Carlos, E. G. R., Guilherme, R., Priscyla, M. S., Rodrigues, Duque-Brasil, R., Ferreira, J. R., Ary, T., & Filho, O. (2015). Landforms and soil attributes determine the vegetation structure in the Brazilian semiarid. *Folia Geobotanica*. 50, 175-184.
- Alves, G. B., Oliveira, F. S. D., Silva, A. H. N. D., & Souza, V. S. D. (2024). Toposequence: What are we talking about? *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 48, e0230137.
- Karaca, S., Gülser, F., & Selçuk, R. (2018). Relationships between soil properties, topography and land use in the Van Lake Basin, Turkey. *Eurasian Journal of Soil Science*. 7, 115-120.
- Zhu, M., Feng, Q., Zhang, M., Liu, W., Qin, Y., Deo, R. C., & Zhang, C. (2018). Effects of topography on soil organic carbon stocks in grasslands of a semiarid alpine region, northwestern China. *Journal of Soils Sediments*. 19, 1640.
- Lozano-García, B., & Parras-Alcantara, L. (2014). Variation in soil organic carbon and nitrogen stocks along a toposequence in a traditional Mediterranean olive grove. *Land Degradation and Development*. 25, 297-304.
- Nie XiaoDong, N. X., Guo Wang, G. W., Huang Bin, H. B., Zhuo MuNing, Z. M., Li DingQiang, L. D., Li ZhongWu, L. Z., & Yuan ZaiJian, Y. Z. (2019). Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region. *Catena*. 176, 104-111.
- Dipesh, K. C., & Schuler, J. L. (2013). Estimating fine-root production and mortality in the biomass plantations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 44, 2514-2523.
- Azaryan, M., Vajari, K. A., & Amanzadeh, B. (2021). Variations in humus and fine root properties related to development stages in a temperate natural Beech forest. *European Journal of Forest Research*. 140, 307-316.
- Tamoooh, F., Huxhamd, M., Karachi, M., Mencuccini, M., Kairo, G., & Kirui, B. (2008). Below-ground root yield and distribution in natural and replanted mangrove forests at Gazi bay, Kenya. *Forest Ecology and Management*. 256, 1290-1297.
- Wang, L., Hamel, C., Lu, P., Wang, J., Sun, D., Wang, Y., & Gan, G. Y. (2023). Using enzyme activities as an indicator of soil fertility in grassland-an academic dilemma. *Frontiers in Plant Science*. 14, 1175946.
- Corstanje, R., Schulin, R., & Lark, R. M. (2007). Scale-dependent relationships between soil organic carbon and urease

- activity. *European Journal of Soil Science*. 58, 1087-1095.
17. Wyszowska, J., Kucharski, J., & Lajszner, W. (2005). Enzymatic Activities in Different Soils Contaminated with Copper. *Polish Journal of Environmental Studies*. 14, 5.
18. Silva, V., Mol, H.G., Zomer, P., Tienstra, M., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2019). Pesticide residues in European agricultural soils—A hidden reality unfolded. *Science of the Total Environment*. 653, 1532-1545.
19. Pang, L. (2009). Microbial removal rates in subsurface media estimated from published studies of field experiments and large intact soil cores. *Journal of Environmental Quality*. 38, 1531-1559.
20. Zeng, D. H., Hu, Y. L., Chang, S. X., & Fan, Z. P. (2009). Land cover change effects on soil chemical and biological properties after planting Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) in sandy lands in Keerqin, northeastern China. *Plant and Soil*. 317, 121-133.
21. Pan, F., Han, X., Li, N., Yan, J., & Xu, Y. (2020). Effect of organic amendment amount on soil nematode community structure and metabolic footprints in soybean phase of a soybean-maize rotation on mollisols. *Pedosphere*. 30, 544-554.
22. Stock, S. C., Köster, M., Dippold, M. A., Nájera, F., Matus, F., Merino, C., & Kuzyakov, Y. (2019). Environmental drivers and stoichiometric constraints on enzyme activities in soils from rhizosphere to continental scale. *Geoderma*, 337, 973-982.
23. Pierick, K., Leuschner, C., & Homeier, J. (2021). Topography as a factor driving small-scale variation in tree fine root traits and root functional diversity in a species-rich tropical montane forest. *New Phytologist*. 230, 129-138.
24. Ghaderi, E. (2022). The effect of canopy composition of Black Hawthorn and Barberry on soil function indicators in Western Mazandaran, M. Sc. 112 p. [In Persian]
25. Farhadifar, A. (2024). The effect of catena landscape on the horizons evolution and differentiation of soil characteristics of semi-arid rangelands of Central Alborz. PhD thesis.
26. Neatrour, M. A., Jones, R. H., & Golladay, S. W. (2005). Correlations between soil nutrients availability and fine- root biomass at two spatial scales in forested wetlands with contrasting hydrological regimes. *NRC Research Press*. 35, 2934-2941.
27. Pransiska, Y., Triadiati, T., Tjitrosoedirjo, S., Hertel, D., & Kotowska, M. M. (2016). Forest conversion impacts on the fine and coarse root system, and soil organic matter in tropical lowlands of Sumatera (Indonesia). *Forest Ecology and Management*. 379, 288-298.
28. Alef, K., & Nannipieri, P. (1995). Methods in applied soil microbiology and biochemistry. *Academic Press, London*. 576.
29. Shi, Y., Wu, P., Zhao, X., Li, H., Wang, J., & Zhang, B. (2014). Statistical analyses and controls of root-zone soil moisture in a large gully of the Loess Plateau. *Environmental earth sciences*. 71, 4801-4809.
30. Hertel, D., Harteveld, M. A., & Leuschne, C. H. (2009). Conversion of a tropical forest into agroforestry alters the fine root-related carbon flux to the soil. *Soil Biology and Biochemistry*. 41, 481-490.
31. Cardinale, B. J., Wright, J. P., Cadotte, M. W., Carroll, I. T., Hector, A., Srivastava, D. S., Loreau, M., & Weis, J. J. (2007). Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 104, 18123-18128.
32. Wang, X., Ouyang, Z., Hao, F., & Zang, W. (2018). Effects of soil organic matter on root biomass and nutrient uptake. *Soil Science Society of America Journal*. 82, 567-576.

33. Haruna, S. I. (2021). Spatial and fractal characterization of selected soil nutrients along a catena. *Catena*. 204, 105443.
34. Singha, D., Brearley, F. Q., & Tripathi, S. K. (2020). Fine root and soil nitrogen dynamics during stand development following shifting agriculture in Northeast India. *Forest*. 11, 123-142.
35. Marschner, H. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. *Academic Press*.
36. Ma, Y. Z., Zhong, Q. L., Jin, B. J., Lu, H. D., Guo, B. Q., Zheng, Y., Li, M., & Cheng, D. L. (2015). Spatial changes and influencing factors of fine root carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of plants in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 39, 159-167.
37. Lei, T., Gu, Q., Guo, X., Ma, J., Zhang, Y., & Sun, X. (2018). Urease activity and urea hydrolysis rate under coupling effects of moisture content, temperature, and nitrogen application rate. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 11: 132-138.
38. Reyes, F., Silvana, Z., Espinosa, A., & Marysol, A. (2010). Biochemical properties in vascular epiphytes substrate from a temperate forest of Chile. *Revista de la ciencia de suelo y nutrición vegetal*. 10, 126-138.
39. Taati, S., Matinzadeh, M., & Sagheb Talebi, K. (2016). Impact of gap size and light intensity on activity of soil phosphatase enzyme in Beech stands (case study; control plot: Langa-Kelardasht). *Journal of Plant Research (Iranian Journal of Biology)*. 29, 532-539.
40. Ndiaye, E. L., Sandeno, J. M., McGrath, D., & Dick, R. P. (2000). Integrative biological indicators for detecting change in soil quality. *American Journal of Alternative Agriculture*. 15, 26-36.
41. Ling, N., Sun, Y., Ma, J., Guo, J., Zhu, P., Peng, C., & Shen, Q. (2014). Response of the bacterial diversity and soil enzyme activity in particle-size fractions of Mollisol after different fertilization in a long-term experiment. *Biology and Fertility of Soils*. 50, 901-911.
42. Ahmed, N., & Al-Mutairi, K. A. (2022). Earthworms effect on microbial population and soil fertility as well as their interaction with agriculture practices. *Sustainability*. 14, 7803.

