

## Comparison of the effects of some topographic factors and reclamation measures on soil hydrological conditions

Saeedreza Moazeni Noghondar<sup>1</sup>, Ali Salajegheh<sup>2\*</sup>, Shahram Khalighi Sigaroudi<sup>3</sup> and Ali Golkarian<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student, Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

<sup>2</sup> Professor of the Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of reclamation of Arid and Mountainous Region, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran

<sup>4</sup> Associate Professor, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University, Mashhad, Iran

Received: 10 June 2025

Accepted: 12 October 2025

### Extended abstract

#### Introduction

Mountainous regions, as the most sensitive and vital ecosystems, play a crucial role in providing fresh water, regulating climate, and preserving biodiversity. However, these areas are vulnerable to soil erosion, natural resource degradation, and climate change. Sustainable water and soil management in mountainous regions is particularly important, as soil quality is directly linked to essential ecosystem services. Natural factors such as slope and aspect influence the distribution of organic matter, soil aggregate stability, and water infiltration, while human activities like uncontrolled pasture exploitation, overgrazing, vegetation destruction, and land use changes contribute to soil degradation, reduced infiltration, and severe erosion. Management practices, including watershed structures and planting native species, can enhance soil water and nutrient retention, improving its physical and chemical properties. Paired watersheds serve as natural laboratories for monitoring and evaluating changes in soil, water, and ecosystem quality under the influence of human activities and climatic conditions. This study aims to investigate the impact of topographic variables, specifically slope aspect and the topographic wetness index (TWI), on the effectiveness of restoration measures in enhancing the physical and chemical properties of soil.

#### Materials and methods

This study was conducted in the paired watershed of Gonbad, located in Hamedan province, Iran. The area comprises two sub-watersheds: one subjected to watershed management operations (treated sub-watershed) and the other without such activities (control sub-watershed). To assess the effect of topography on soil properties, soil sampling was performed at various points in both the control and treated areas, based on two key topographic factors: slope aspect and TWI. For slope aspect analysis, three points were selected on north-facing slopes and three on south-facing slopes within each sub-basin. The TWI was calculated using the relevant equation, and each sub-basin was divided into three zones with varying moisture conditions (low, medium, and high TWI). Soil samples were collected at the end of the growing season from a depth of 0-15 cm while maintaining the soil structure. With three replicates, a total of 36 sampling points were established. Soil physical and chemical properties, including permeability, texture, porosity, aggregate stability, organic matter, pH, electrical conductivity, water holding capacity, and surface cover components, were measured. Restoration measures in the treated sub-watershed included biological measures (seeding of drought-resistant species such as *Astragalus gossypinus* and *Bromus tomentellus*) and managerial measures (complete grazing exclusion). To analyze the effects of restoration measures, slope aspect, and TWI on soil hydrological properties, statistical methods including analysis of variance (ANOVA) based on a nested design, and Pearson correlation were employed using SAS and R software.

#### Results and discussion

The findings demonstrated that restoration measures and topographic variations significantly improved soil properties. Comparison of the treated and control watersheds using the t-test revealed that the treated watershed exhibited lower bulk density ( $1.18 \pm 0.01$  vs.  $1.31 \pm 0.02$  g/cm<sup>3</sup>), reduced bare soil percentage

\* Corresponding author: salajegh@ut.ac.ir

(13.06±1.38% vs. 32.5±1.61%), and higher steady-state infiltration rate (28.44±1.92 vs. 19.78±0.82 mm/h) ( $P<0.05$ ). Additionally, soil porosity (51.13±0.73% vs. 41.66±1.14%) and aggregate stability (1.96±0.52 vs. 1.52±0.39 mm) were significantly greater in the treated watershed ( $P<0.05$ ). Organic matter content was also higher in the treated watershed (2.15±0.62% vs. 1.5±0.38%) ( $P<0.05$ ), indicating the positive influence of restoration on soil quality and erosion control. Slope aspect significantly affected certain soil properties. The t-test showed that north-facing slopes had greater aggregate stability (2.14±0.33 vs. 1.35±0.29 mm), higher organic matter (2.13±0.64% vs. 1.32±0.38%), and denser vegetation cover (60.39±3.18% vs. 48.17±3.2%) compared to south-facing slopes ( $P<0.05$ ). These differences are linked to improved moisture conditions on north-facing slopes due to reduced solar radiation and denser vegetation, enhancing organic matter retention and erosion resistance. Analysis of TWI classes using ANOVA indicated that the TWI3 class had the highest organic matter (1.45±0.61%) and aggregate stability (1.96±0.52 mm), though these differences were not statistically significant ( $P>0.05$ ). However, soil texture varied significantly with TWI: clay increased from 42.75±3.12% (TWI1) to 46.12±3.05% (TWI3), silt from 28.43±2.76% to 31.66±2.78%, and sand decreased from 28.82±5.53% to 22.22±5.68% ( $P<0.05$ ), suggesting finer particle deposition in higher TWI zones (lower slopes). Principal component analysis (PCA) showed that TWI and vegetation were correlated with organic matter, aggregate stability, and infiltration ( $P<0.05$ ), while bare soil and bulk density were associated with southern slopes and low TWI. Northern slopes and high TWI classes showed the greatest improvement in organic matter and vegetation. These findings confirm the key role of slope orientation, TWI, and biological interventions in improving soil and vegetation quality in semi-arid regions.

### Conclusion

The present research showed that restoration measures generally lead to improved soil quality, but the effectiveness of these measures is significantly affected by topographic characteristics, especially slope aspect and topographic wetness index (TWI). North-facing slopes and points with high TWI showed the greatest improvement in soil parameters, especially organic matter and soil aggregate stability. The findings of this research show the importance of considering topographic characteristics in planning and implementing restoration measures, and it is suggested that in future studies, more focus should be on investigating the factors affecting the reduction of some parameters and the long-term effects of restoration measures.

**Keywords:** Mountainous regions, Slope aspect, Soil hydrological properties, Topographic wetness index, Watershed management measures

Cite this article: Moazeni Noghondar, S., Salajegheh, A., Khalighi Sigaroudi, Sh., Golkarian, A., 2026. Comparison of the effects of some topographic factors and reclamation measures on soil hydrological conditions. *Watershed. Water. Eng. Manag.* 18(1), 82-102.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)





## بررسی ارتباط جهت دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی و اقدامات احیایی با ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در حوضه زوجی گنبد همدان

سعیدرضا مؤذنی نقندر<sup>۱</sup>، علی سلاجقه<sup>۲\*</sup>، شهرام خلیقی سیگارودی<sup>۳</sup> و علی گلکاریان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه احیا مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

مناطق کوهستانی، به‌عنوان حساس‌ترین و حیاتی‌ترین زیست‌بوم‌ها، نقش مهمی در تأمین آب شیرین، تنظیم اقلیم و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند. با این حال، این مناطق به‌دلیل فرسایش خاک، تخریب منابع طبیعی و تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیرند. مدیریت پایدار آب و خاک در این مناطق، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا کیفیت خاک به‌طور مستقیم با خدمات زیست بوم مرتبط است. عوامل طبیعی و انسانی گوناگونی بر ویژگی‌های خاک در مناطق کوهستانی تأثیر می‌گذارند. عواملی مانند شیب و جهت دامنه به‌طور مستقیم بر توزیع مواد آلی، پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری آب مؤثرند. فعالیت‌های انسانی مانند بهره‌برداری بی‌رویه از مراتع، چرای بیش از حد دام و تغییر کاربری اراضی نیز به تخریب خاک، کاهش نفوذپذیری و فرسایش شدید منجر می‌شوند. اقدامات مدیریتی مانند اجرای سازه‌های آبخیزداری و کاشت گیاهان بومی می‌توانند ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی خاک را افزایش داده و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شوند. حوضه‌های معرف و زوجی به‌عنوان آزمایشگاه‌های طبیعی برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی و تأثیرات اقدامات مدیریتی در مقیاس محلی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. این حوضه‌ها برای پایش و ارزیابی تغییرات در کیفیت خاک، آب و زیست‌بوم‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و شرایط اقلیمی حائز اهمیت هستند. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر متغیرهای توپوگرافی شامل جهت دامنه و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) بر کارآمدی اقدامات احیایی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است.

### مواد و روش‌ها

این پژوهش در دو زیرحوضه نمونه و شاهد در حوزه آبخیز معرف-زوجی گنبد در استان همدان انجام شده است. این حوضه شامل دو زیرحوضه، یک زیرحوضه تحت پوشش عملیات آبخیزداری به‌عنوان زیرحوضه نمونه و دیگری بدون هیچگونه فعالیت آبخیزداری به‌عنوان زیرحوضه شاهد در نظر گرفته شده است. برای بررسی ارتباط توپوگرافی و ویژگی‌های خاک، نمونه‌برداری خاک در نقاط مختلفی از حوضه‌های شاهد و نمونه بر اساس دو عامل اصلی توپوگرافی، یعنی جهت دامنه و TWI انجام شد. برای بررسی تأثیر جهت دامنه، سه نقطه در دامنه‌های رو به شمال و سه نقطه در دامنه‌های رو به جنوب از هر دو زیرحوضه انتخاب شدند. شاخص TWI نیز با استفاده از معادله مربوطه محاسبه و هر زیرحوضه به سه

ناحیه با شرایط رطوبتی مختلف (TWI پایین، TWI متوسط و TWI بالا) تقسیم شد. با انجام سه تکرار، در مجموع، ۳۶ نقطه نمونه برداری انتخاب شد. نمونه‌های خاک در پایان فصل رشد گیاهان، از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری ضمن حفظ ساختمان خاک برداشت شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله نفوذپذیری خاک، بافت خاک، تخلخل خاک، پایداری خاکدانه‌ها، ماده آلی خاک، pH و هدایت الکتریکی خاک، ظرفیت نگهداری آب خاک و اجزای پوشش سطح خاک اندازه‌گیری شدند. اقدامات احیایی در زیرحوضه نمونه شامل اقدامات زیستی و مدیریتی بود. اقدامات زیستی شامل بذرکاری گونه‌های مقاوم به خشکی مانند *Astragalus gossypinus* و *Bromus tomentellus* و اقدامات مدیریتی شامل قرق کامل و مهار چرای دام بود. به منظور بررسی تأثیر احیای حوزه آبخیز، جهت شیب و شاخص TWI بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک، از روش‌های آماری شامل تحلیل واریانس (ANOVA) بر اساس طرح آشیانه‌ای و همبستگی پیرسون با استفاده از نرم‌افزارهای SAS و R استفاده شد. این تحلیل‌ها تفاوت‌های معنی‌دار بین گروه‌ها و روابط بین متغیرهای خاک را مشخص کردند.

### نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که اقدامات احیایی و تفاوت‌های توپوگرافی به‌طور معناداری ویژگی‌های خاک را بهبود بخشیده‌اند. زیرحوضه نمونه در مقایسه با زیرحوضه شاهد، جرم مخصوص ظاهری کمتر ( $1.01 \pm 1.18$  در مقابل  $1.02 \pm 1.31$  گرم بر سانتی‌متر مکعب)، درصد خاک لخت کمتر ( $13.06 \pm 1.38$  درصد در مقابل  $32.5 \pm 1.61$  درصد)، و سرعت نفوذ بیشتر ( $28.44 \pm 1.92$  در مقابل  $19.78 \pm 0.82$  میلی‌متر بر ساعت) داشت ( $p < 0.05$ ). همچنین، تخلخل ( $0.73 \pm 5.13$  درصد در مقابل  $41.66 \pm 1.14$  درصد) و پایداری خاکدانه ( $1.96 \pm 0.52$  در مقابل  $1.52 \pm 0.39$  میلی‌متر) در حوضه نمونه به‌طور معنی‌داری افزایش یافت. ماده آلی نیز در زیرحوضه نمونه ( $2.15 \pm 0.62$  درصد) نسبت به شاهد ( $1.5 \pm 0.38$  درصد) بیشتر بود ( $P < 0.05$ ). جهت دامنه نیز تأثیر معنی‌داری بر برخی از ویژگی‌های خاک داشت؛ دامنه‌های شمالی در مقایسه با دامنه‌های جنوبی، پایداری خاکدانه بیشتر ( $2.14 \pm 0.33$  در مقابل  $1.35 \pm 0.29$  میلی‌متر)، ماده آلی بالاتر ( $2.13 \pm 0.64$  درصد در مقابل  $1.32 \pm 0.38$  درصد) و تاج پوشش گیاهی متراکم‌تری ( $60.39 \pm 3.18$  درصد در مقابل  $48.17 \pm 3.2$  درصد) نشان دادند ( $p < 0.05$ ). بررسی طبقات مختلف TWI نیز نشان داد که طبقه TWI3 بالاترین مقادیر ماده آلی ( $1.45 \pm 0.61$  درصد) و پایداری خاکدانه ( $1.96 \pm 0.52$  میلی‌متر) را دارا است. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) نشان داد که TWI و پوشش گیاهی با ماده آلی، پایداری خاکدانه و نفوذپذیری هم‌جهت هستند ( $P < 0.05$ ). در حالی که خاک لخت و جرم مخصوص ظاهری با نقاط دامنه‌های جنوبی و TWI پایین مرتبط‌اند. دامنه‌های شمالی و طبقات TWI بالا بیشترین بهبود را در ماده آلی و پوشش گیاهی نشان دادند. این یافته‌ها نقش کلیدی جهت دامنه، TWI و اقدامات زیستی در بهبود کیفیت خاک و پوشش گیاهی در مناطق نیمه‌خشک را تأیید می‌کند.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که اقدامات احیایی به‌طور کلی منجر به بهبود کیفیت خاک می‌شوند، اما میزان اثربخشی این اقدامات به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی، به‌ویژه جهت دامنه و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) قرار دارد. دامنه‌های شمالی و نقاط با TWI بالا، بیشترین میزان بهبود را در ویژگی‌های خاک، به‌ویژه ماده آلی و پایداری خاکدانه نشان دادند. یافته‌های این پژوهش، اهمیت در نظر گرفتن ویژگی‌های توپوگرافی در برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات احیایی را نشان می‌دهد و پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، تمرکز بیشتری بر بررسی عوامل مؤثر بر کاهش برخی ویژگی‌ها و اثرات بلندمدت اقدامات احیایی صورت گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** اقدامات آبخیزداری، جهت دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافی، مناطق کوهستانی، ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک

## مقدمه

مناطق کوهستانی به‌عنوان یکی از حساس‌ترین زیست‌بوم‌های طبیعی، نقش مهمی در تأمین منابع آب شیرین، تنظیم اقلیم محلی و جهانی و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند. این مناطق با توجه به دارا بودن شرایط خاص توپوگرافی و اقلیمی، از پتانسیل بالایی برای خدمات زیست‌بوم برخوردارند (Hamedani et al., 2022؛ Luo et al., 2024). با این حال، فرسایش خاک، تخریب منابع طبیعی و تغییرات اقلیمی، این زیست‌بوم را به‌شدت آسیب‌پذیر کرده است (Azizi et al., 2022؛ Cifuentes-Croquevielle et al., 2020). در این میان، مدیریت پایدار آب و خاک و حفاظت از این منابع اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است، زیرا کیفیت خاک در این مناطق به‌طور مستقیم با خدمات اکوسیستمی حیاتی مرتبط است.

عوامل طبیعی متنوعی بر ویژگی‌های خاک در مناطق کوهستانی از جمله اقلیم، شرایط توپوگرافی، فیزیوگرافی، پوشش گیاهی و غیره تأثیر می‌گذارند. مطالعات نشان داده‌اند که شیب و جهت دامنه به‌طور مستقیم بر توزیع مواد آلی، پایداری خاکدانه‌ها و نفوذپذیری آب تأثیر می‌گذارند (Mhalla et al., 2019؛ Zhang et al., 2022). در همین راستا، Mohammadkhan et al., (2016) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی<sup>1</sup>، مدلی کمی برای ارزیابی شدت فرسایش در حوزه آبخیز لتیان توسعه دادند که معیارهایی نظیر شیب، جهت دامنه، ماده آلی خاک و نفوذپذیری را شامل می‌شد. این مطالعه نشان داد که تغییرات توپوگرافی به‌طور مستقیم بر فرسایش و توزیع رسوبات تأثیر می‌گذارد و با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری همخوانی بالایی دارد.

در کنار عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی نیز اثر دوگانه‌ای بر کیفیت خاک دارند. بهره‌برداری بی‌رویه از مراتع، فشار بیش از حد چرا، تخریب پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی از جمله فعالیت‌هایی هستند که به تخریب خاک، کاهش نفوذپذیری، فرسایش شدید و افت کیفیت منابع آب و خاک منجر می‌شوند (Xiong et al., 2015؛ Rahimi Ashjardi and Ayoubi, 2013).

اقدامات مدیریتی نظیر اجرای سازه‌های آبخیزداری، مدیریت چرای دام و کاشت گیاهان بومی در مناطق نمونه به‌طور قابل‌توجهی ظرفیت نگهداری آب و مواد غذایی خاک را افزایش داده و موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شده‌اند (Wang et al., 2021؛ Pavand Dorou et al., 2015). این اقدامات همچنین با کاهش رسوب‌گذاری در پای دامنه‌ها و افزایش پایداری خاکدانه‌ها، شرایط مناسبی برای رشد گیاهان و جلوگیری از تخریب بیشتر خاک فراهم کرده‌اند (Luo et al., 2024؛ Mohajeri et al., 2016).

تحقیقات López-Rosas et al., (2003) و Ladányi et al., (2016) نشان داده‌اند که افزایش پوشش گیاهی در مناطق شیب‌دار، رواناب سطحی را کاهش داده و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، Armin et al., (2016) نیز با بررسی پایداری خاکدانه‌ها در حوزه آبخیز طالقان نشان دادند که بهبود مدیریت خاک می‌تواند اثرات فرسایشی ناشی از تغییرات توپوگرافی را کاهش دهد. مطالعات Moeieni et al., (2006) نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های ژئومورفولوژیک در تحلیل فرایندهای خاکساز می‌تواند دقت و کارایی اقدامات حفاظتی را افزایش دهد. پژوهش‌های اخیر مانند Zhao و Wang et al., (2021) بر نقش اقدامات مدیریتی در مناطق کوهستانی، به‌ویژه در شیب‌های تند و دامنه‌های شمالی، تأکید دارند. این مطالعات نشان می‌دهند که ترکیب مدیریت اصولی و توجه به شاخص‌های ژئومورفومتری، می‌تواند به حفظ چرخه‌های زیست‌محیطی، بهبود تنوع زیستی و ارتقای پایداری مناطق کوهستانی کمک کند. در مطالعات منابع طبیعی و مدیریت حوزه آبخیز، حوضه‌های معرف و زوجی به‌عنوان آزمایشگاه‌های طبیعی برای بررسی فرایندهای هیدرولوژیکی، فرسایش خاک و تأثیرات اقدامات مدیریتی در مقیاس محلی و منطقه‌ای طراحی شده‌اند. این حوضه‌ها در سراسر جهان، از جمله ایران، برای پایش و ارزیابی تغییرات در کیفیت خاک، آب، و زیست‌بوم‌ها تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و شرایط اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. هدف این پژوهش بررسی ارتباط بین متغیرهای

<sup>1</sup> Analytical Hierarchy process (AHP)

خشکی دمارتن، این منطقه به‌عنوان نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود و به‌طور متوسط سالانه ۳۹۶/۸ میلی‌متر بارش دریافت می‌کند که عمدتاً در اواخر زمستان رخ می‌دهد. رشد پوشش گیاهی معمولاً از اوایل فروردین آغاز شده و تا اواسط تابستان ادامه می‌یابد، تحت تأثیر دمای متوسط سالانه ۱۱ درجه سانتی‌گراد که در فصل زمستان به حداقل ۳۰ درجه و در تابستان به بالای ۳۰ درجه می‌رسد.

توپوگرافی منطقه کوهستانی است و دامنه‌ها از شیب‌های تند تا متوسط متغیرند. زیرحوضه نمونه دارای شیب میانگین ۳۲/۷ درصد است، در حالی که این میزان در زیرحوضه شاهد ۳۰/۳ درصد است. هر دو زیرحوضه دارای جهت دامنه غالب شمالی و جنوبی هستند که میکروکلیمای متفاوتی را ایجاد می‌کنند و بر رطوبت خاک، دما و دینامیک پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارند. اقدامات احیایی در زیرحوضه نمونه از سال ۱۳۸۳ (۲۰۰۴) آغاز شد و شامل اقدامات زیستی، مکانیکی و مدیریتی بود. اقدامات زیستی شامل بذرکاری گونه‌های مقاوم به خشکی مانند *Astragalus gossypinus* و *Bromus tomentellus* در ۵۰ هکتار از اراضی با شیب کمتر از ۲۰ درصد و کپه‌کاری این گونه‌ها در ۶۶ هکتار از دامنه‌های با شیب متوسط بود.

این اقدامات با تراکم ۵۰۰ بذر در هکتار برای بذرکاری و ۲۰۰ کپه در هکتار با استفاده از بذرهای تأییدشده توسط اداره منابع طبیعی در سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۸ انجام شد. اقدامات مدیریتی شامل قرق کامل و مهار چرای دام در کل زیرحوضه نمونه بود. در مقابل، زیرحوضه شاهد همچنان در معرض چرای دام و مدیریت نادرست قرار دارد که منجر به پوشش گیاهی ضعیف، تخریب وسیع خاک و کاهش عملکرد هیدرولوژیکی شده است. این منطقه نمونه‌ای مناسب برای بررسی اثرات توپوگرافی و اقدامات احیایی بر ویژگی‌های خاک است (Sajadi Bami et al., 2020). شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه و اقدامات احیایی اجرا شده و شکل ۲ نیز تصاویری از عملیات احیا در زیرحوضه نمونه را نشان می‌دهد.

توپوگرافی نظیر جهت دامنه و شاخص رطوبت توپوگرافی<sup>۱</sup> و کارآمدی اقدامات احیایی در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک است.

این مطالعه علاوه بر ارزیابی تأثیرات اقدامات حفاظتی، به دنبال شناسایی مناطقی با شرایط توپوگرافی بهینه برای اجرای این اقدامات است. نتایج این مطالعه، نه تنها دانش و اطلاعات را درباره ارتباطات پیچیده بین خاک، پوشش زمین و عوامل توپوگرافی افزایش می‌دهد، بلکه به سیاست‌گذاران و مدیران منابع طبیعی در طراحی برنامه‌های کارآمدتر برای حفاظت و احیای خاک در مناطق کوهستانی کمک خواهد کرد.

## مواد و روش‌ها

**منطقه پژوهش:** این پژوهش در حوزه آبخیز زوجی گنبد در فاصله ۳۵ کیلومتری جنوب شهرستان همدان، با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۴ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی انجام شده است. حوضه زوجی گنبد شامل دو زیرحوضه است. یکی تحت پوشش عملیات آبخیزداری و دیگری بدون انجام هیچگونه فعالیت آبخیزداری شرایط فعلی منطقه را نمایش می‌دهد. این منطقه نمونه‌ای مناسب برای بررسی اثرات توپوگرافی و اقدامات احیایی بر ویژگی‌های خاک است.

حوزه آبخیز احیاءشده مساحتی حدود ۱۴۵ هکتار را پوشش می‌دهد، در حالی که زیرحوضه شاهد ۱۴۳ هکتار است. با توجه به همجواری این دو زیرحوضه این امکان فراهم است که اثرات اقدامات احیایی بر ویژگی‌های خاک تحت شرایط اقلیمی و توپوگرافی مشابه مقایسه شوند.

منطقه مورد پژوهش، چالش‌های معمول زیست‌بوم‌های نیمه‌خشک ایران را نشان می‌دهد، از جمله بارش محدود و فرسایش خاک که در این منطقه براساس گزارش اداره منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان به‌صورت کم تا متوسط (۳/۱۶-۲/۴۹) تن در هکتار در سال) مشاهده شده است. براساس شاخص

<sup>1</sup> Topographic Wetness Index (TWI)



که در آن،  $A_s$  نشان‌دهنده مساحت زهکشی (متر مربع)،  $\beta$  زاویه شیب دامنه (درجه) است. با توجه به نقشه به‌دست آمده، هر زیرحوضه به سه ناحیه با شرایط رطوبتی مختلف تقسیم شد.

TWI پایین ( $2 < TWI \leq 7$ ): نواحی با ذخیره رطوبتی کم

TWI متوسط ( $7 < TWI \leq 12$ ): نواحی با تجمع آب متوسط

TWI بالا ( $12 < TWI \leq 17$ ): نواحی با تجمع آب زیاد و رطوبت بالا

در هر حوضه، نقاط نمونه‌برداری بر اساس دو متغیر توپوگرافی، یعنی جهت دامنه و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، انتخاب شدند. به این ترتیب، در هر زیرحوضه دو دامنه (رو به شمال و رو به جنوب) در نظر گرفته شد و در هر دامنه، سه طبقه TWI (پایین، متوسط و بالا) تعریف شد. برای هر طبقه TWI، با احتساب سه تکرار در انتخاب دامنه، در مجموع، ۳۶ نقطه نمونه‌برداری (۲ حوضه  $\times$  ۶ دامنه  $\times$  ۳ TWI  $\times$  ۳ تکرار) به‌دست آمد.

نمونه‌های خاک از عمق صفر تا ۱۵ سانتی‌متری ضمن حفظ ساختمان خاک برداشت شدند تا تأثیر شرایط توپوگرافی بر ویژگی‌های خاک بررسی شود. نقشه جهت دامنه، شاخص TWI و موقعیت نقاط نمونه‌برداری در شکل ۳ نشان داده شده و نام‌گذاری آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

توپوگرافی، نمونه‌برداری خاک از نقاط مختلف هر دو زیرحوضه انجام شد که بر اساس دو عامل کلیدی جهت دامنه (شمالی و جنوبی) و شاخص توپوگرافی رطوبتی انتخاب شدند.

این عوامل به‌دلیل تأثیر آنها بر شرایط رطوبتی و فرایندهای خاکسازي انتخاب شدند. دامنه‌های شمالی به‌دلیل دریافت کمتر تابش خورشید، رطوبت بیشتر و دمای پایین‌تری دارند، در حالی که دامنه‌های جنوبی با تابش بیشتر، خشک‌تر و گرم‌ترند. در هر حوضه، سه نقطه در دامنه‌های شمالی و سه نقطه در دامنه‌های جنوبی برای بررسی این تفاوت‌ها نمونه‌برداری شدند. شاخص TWI میزان تمایل آب به تجمع در نقاط مختلف یک زیرحوضه و همچنین جهت‌گیری نیروهای گرانشی برای انتقال آب به سمت پایین‌دست را توصیف می‌کند (Luca et al., 2011).

این شاخص که با ترکیب مساحت حوضه بالادست و شیب محاسبه می‌شود، به‌طور معمول برای بررسی و کمی‌سازی تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی بر فرایندهای هیدرولوژیکی به‌کار می‌رود. مناطقی که دارای تقعر بیشتری هستند، معمولاً مقادیر بالاتری از شاخص TWI دارند. این شاخص به‌ویژه برای ارزیابی تأثیر توپوگرافی بر میزان اشباع خاک و تولید رواناب اهمیت دارد و می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نمود (Luca et al., 2011).

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan\beta}\right) \quad (1)$$

جدول ۱- نام‌گذاری نقاط نمونه‌برداری

Table 1. Naming of sampling points

	$2 < TWI \leq 7$	$7 < TWI \leq 12$	$12 < TWI \leq 17$
North-facing slope	NF-T1	NF-T2	NF-T3
South-facing slope	SF-T1	SF-T2	SF-T3

TWI: Topographic Wetness Index, NF: North Facing, SF: South Facing, T1:  $2 < TWI \leq 7$ , T2:  $7 < TWI \leq 12$ , T3:  $12 < TWI \leq 17$

شماره ۴۶۷) انجام شد. نرخ نفوذپذیری خاک با روش نفوذسنج استوانه مضاعف (استاندارد ASTM D3385-03 و اقتباس از Bouwer, 1986) اندازه‌گیری شد.

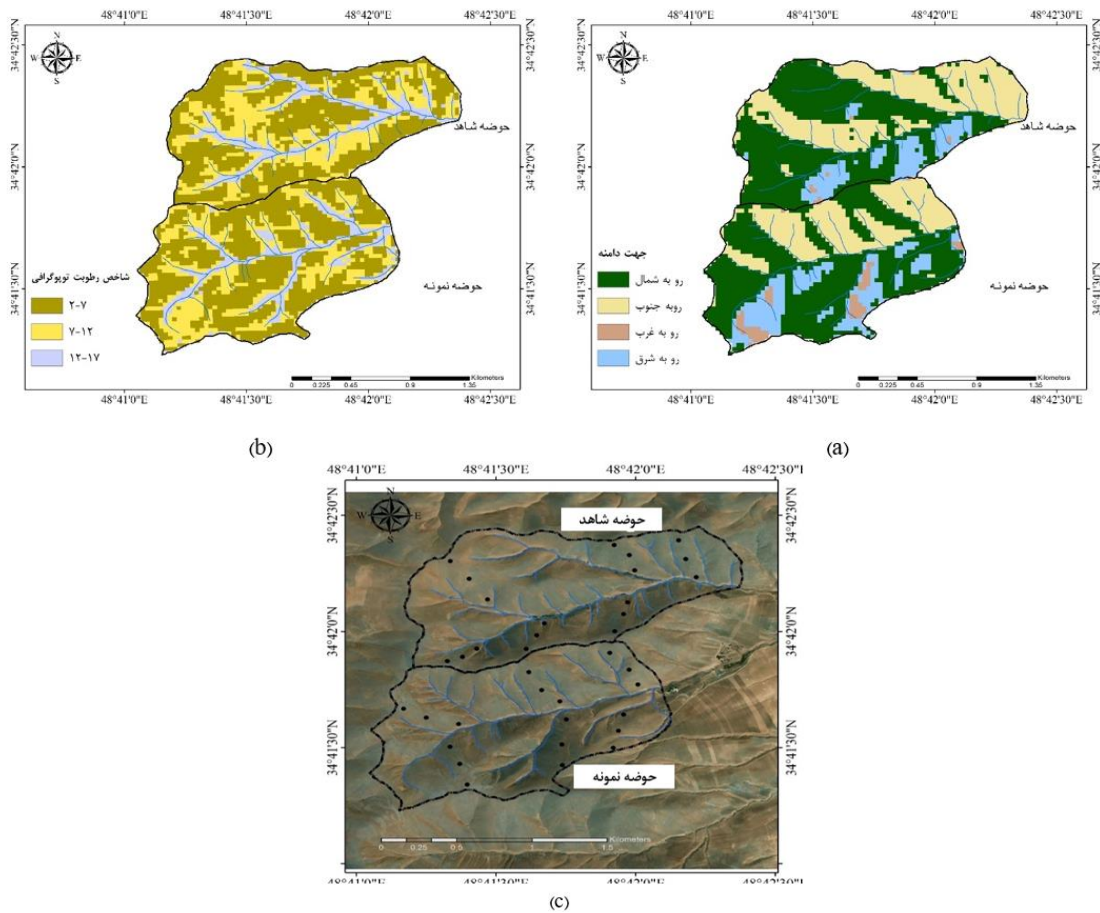
برای این منظور، دو حلقه فلزی هم‌مرکز با قطرهای ۲۰ و ۴۰ سانتی‌متر به عمق ۱۰ سانتی‌متر در خاک کوبیده شده و با حفظ سطح آب ثابت برای به حداقل رساندن جریان جانبی، ارتفاع آب در فواصل زمانی یک، پنج، ۱۰، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه ثبت شد تا

### اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک:

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، نمونه‌ها پس از خشک شدن در دمای اتاق و حذف بقایای گیاهی و سنگریزه، از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند و در مواردی که نیاز به آنالیز دقیق‌تر بود، با آسیاب آزمایشگاهی کوبیده و مجدداً الک شدند. تمامی مراحل آماده‌سازی بر اساس استانداردهای دستورالعمل تجزیه‌های آزمایشگاهی نمونه‌های خاک و آب (نشریه

شکل ۴ تصاویر مربوط به آزمایش نفوذپذیری را نشان می‌دهد. نتایج مشابهی در بررسی مدل‌های نفوذ در اراضی مرتعی حوضه گنبد همدان نیز گزارش شده است (Porhemmat and Nazariipooya, 2015).

نرخ نفوذ اولیه (IIR)، نرخ نفوذ نهایی (SIR) و زمان رسیدن به حالت نهایی (TSI) محاسبه شود. این اندازه‌گیری‌ها حداقل ۱۱ روز پس از آخرین بارش مؤثر انجام شد تا اثر رطوبت پیشین کاهش یابد.



شکل ۳- نقشه (a) جهت دامنه، (b) شاخص TWI و (c) موقعیت نقاط نمونه‌برداری  
 Fig 3. a) slope aspect, b) TWI and c) location of sampling points map

پایداری خاکدانه‌ها با استفاده از روش الک تر (اقتباس از Soane, 1990) ارزیابی شد. ابتدا نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوا از الک هشت میلی‌متری عبور داده شدند. سپس، ۵۰ گرم از خاک الک‌شده روی مجموعه الک‌هایی با اندازه چشمه‌های دو، یک، ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱۲۵ و ۰/۰۶۳ میلی‌متر قرار گرفت و به مدت ۱۵ دقیقه در دستگاه الک تر غوطه‌ور شد.

پس از اتمام فرایند، الک‌ها به آرامی از آب خارج شدند و خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک به ظروف چینی منتقل شده و در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. با توجه به احتمال وجود ذرات درشت اولیه (مانند شن و سنگریزه) در نمونه‌ها، تصحیح

بافت خاک با روش هیدرومتر اصلاح‌شده بویوکس و مخلوط کردن ۵۰ گرم خاک خشک با هگزامتافسفات سدیم (به مدت ۱۸ ساعت) تعیین شد و پس از انتقال سوسپانسیون به استوانه رسوبگذاری، قرائت‌های هیدرومتر در ۴۰ ثانیه و ۲ ساعت برای محاسبه درصد شن، سیلت و رس انجام گرفت. تخلخل کل خاک از طریق جرم مخصوص ظاهری (BD) و جرم مخصوص ویژه ذرات (PD) با رابطه (۲) محاسبه شد.

$$\text{Soil Porosity (\%)} = \left(1 - \frac{PD}{BD}\right) \times 100 \quad (2)$$

که در آن، BD با خشک کردن نمونه‌های دست‌نخورده در آون (۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت) و PD با روش پیکنومتر به دست آمد.

مقدار ماده آلی خاک با روش والکی-بلیک اندازه‌گیری شد (Walkley and Black, 1934). در این روش، پس از اکسیداسیون کربن آلی با بی‌کرومات و اسید سولفوریک، تیتراسیون با فروآمونیم سولفات انجام شد و درصد کربن آلی و ماده آلی بر اساس رابطه‌های (۴) و (۵) تعیین شد.

$$\%OC = 0.39 * m * \frac{V1 - V2}{S} \quad (4)$$

$$\%OM = \%OC * 1.72 \quad (5)$$

که در آن، S وزن خاک شده (یک گرم)، v1 حجم فرو آمونیم سولفات مصرفی برای بلانک، v2 حجم فرو آمونیم سولفات مصرفی برای نمونه، m نرمالیه سولفات (۰/۵) و ۰/۳۹ ضریب ثابت است.

مقدار شن انجام شد؛ به این ترتیب، خاکدانه‌های خشک‌شده در آب پراکنده شدند و مجدداً روی الک هم‌اندازه خود ریخته شدند تا شن و سنگریزه جدا شود. وزن شن باقی‌مانده پس از خشک شدن در آون اندازه‌گیری و از وزن اولیه خاکدانه‌ها کسر شد. در نهایت، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها (MWD) با استفاده رابطه (۳) به‌دست آمد.

$$MWD = \sum \bar{X}_i . W_i \quad (3)$$

در این رابطه،  $\bar{X}_i$  میانگین قطر خاکدانه‌های باقی‌مانده روی هر الک،  $W_i$  نسبت وزن خاکدانه‌های اصلاح‌شده (پس از کسر شن) به وزن کل نمونه و MWD معیار پایداری خاکدانه‌ها بر حسب میلی‌متر است. هرچه مقدار MWD بیشتر باشد، نشان‌دهنده پایداری بالاتر خاکدانه‌ها در برابر تجزیه توسط آب است.



شکل ۴- آزمایش نفوذپذیری به‌وسیله استوانه مضاعف در نقطه نمونه‌برداری NF-T1 زیرحوضه نمونه  
Fig. 4. Double ring infiltration test at sampling point NF-T1, treated watershed

پوشش سطح زمین با استفاده از پلات گذاری را نشان می‌دهد.

**تحلیل آماری:** به‌منظور بررسی ارتباط بین احیای حوزه آبخیز، جهت شیب، و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) با نفوذپذیری خاک و ویژگی‌های هیدرولوژیکی مرتبط با آن (مانند جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، ماده آلی، پایداری خاکدانه، و هدایت الکتریکی)، از روش‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای SAS (نسخه ۹.۴) و R (نسخه ۴.۲.۲) استفاده شد.

با توجه به تفاوت‌های ذاتی بین حوزه‌های آبخیز، حتی در شرایط همجواری، و وجود ساختار

ظرفیت نگهداری آب خاک با دستگاه صفحات فشاری در فشارهای ۰/۳۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ بار و نمونه‌های دست‌نخورده اشباع‌شده اندازه‌گیری شد تا رطوبت اشباع (SMC)، ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی دائم (PWP) و آب قابل استفاده گیاه (PAW = FC - PWP) استخراج شود. در نهایت، اجزای پوشش سطح زمین شامل درصد پوشش گیاهی زنده<sup>۱</sup>، پوشش لاشبرگ<sup>۲</sup>، درصد سنگ و سنگریزه<sup>۳</sup> و خاک لخت<sup>۴</sup> در اوایل خرداد ماه با پلات‌های یک مترمربعی و برآورد چشمی در محل نقاط نمونه‌برداری تعیین شدند. شکل ۵-ب، اندازه‌گیری

<sup>3</sup> Rock Fragment (RF)

<sup>4</sup> Bare Soil

<sup>1</sup> Vegetation Canopy

<sup>2</sup> Litter Cover (LC)

انتخاب شد. این طرح امکان مدلسازی اثر عوامل سلسله‌مراتبی و بررسی اثرات متقابل بین آنها را فراهم می‌کند و برای تحلیل داده‌های حوزه‌های آبخیز با شرایط طبیعی متفاوت مناسب است.

سلسله‌مراتبی در داده‌ها (حوزه آبخیز به‌عنوان عامل اصلی، جهت شیب به‌عنوان عامل آشیانه‌ای در حوزه، و TWI به‌عنوان عامل آشیانه‌ای در جهت شیب)، تحلیل واریانس بر اساس طرح آشیانه‌ای (Nested ANOVA)



شکل ۵- اندازه‌گیری پوشش سطح زمین با استفاده از پلات گذاری در نقاط نمونه‌برداری (a) NF-T3 زیرحوضه نمونه و (b) SF-T2 زیرحوضه شاهد

Fig. 5. Land cover measurement using plotting at sampling points (a) NF-T3 of the restored watershed and (b) SF-T2 of the control watershed

شد تا تأثیر ترکیبی این عوامل بر ویژگی‌های خاک مشخص شود.

### نتایج و بحث

#### ارتباط بین اقدامات احیایی و ویژگی‌های خاک:

نتایج تحلیل واریانس بر اساس طرح آشیانه‌ای نشان داد که اقدامات زیستی و مدیریتی انجام شده در زیرحوضه نمونه، جهت دامنه (رو به شمال و رو به جنوب)، و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) ارتباط معنی‌داری با اغلب ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک دارند (جدول ۲). این تحلیل با در نظر گرفتن ساختار سلسله‌مراتبی داده‌ها انجام شد تا تفاوت‌های ذاتی بین دو حوزه آبخیز هم‌جوار در نظر گرفته شود. میانگین‌های ویژگی‌های خاک نیز در جدول ۳ نشان داده شده است.

مقایسه حوضه‌های نمونه با شاهد نشان داد که اقدامات مدیریتی منجر به بهبود قابل توجه در کیفیت خاک شده است. کیفیت خاک بر اساس معیارهایی مانند جرم مخصوص ظاهری، تخلخل، پایداری خاکدانه، ماده آلی و تا حدی بافت ارزیابی شد که نشان‌دهنده توانایی خاک در حفظ آب، مقاومت در برابر فرسایش و حمایت از رشد گیاهان است. در زیرحوضه نمونه، جرم

قبل از انجام آزمون‌های آماری، نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنف بررسی شد و تأیید شد که داده‌ها از توزیع نرمال پیروی می‌کنند ( $P < 0.05$ ). بنابراین، از تحلیل واریانس پارامتری (ANOVA) بر اساس طرح آشیانه‌ای برای ارزیابی اثر حوزه آبخیز (شاهد در مقابل نمونه)، جهت شیب (رو به شمال و رو به جنوب)، و شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) در سه طبقه) بر ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک استفاده شد. برای مقایسه میانگین‌ها بین حوزه‌ها، جهت‌های شیب و طبقات TWI پس از انجام ANOVA، از خطای معیار (SE) میانگین‌ها استفاده شد تا تفاوت‌های آماری با دقت بیشتری بررسی شوند.

به‌منظور بررسی شدت و جهت رابطه‌های خطی بین متغیرهای کمی و تأیید نتایج مشاهده‌شده در تغییرات درصدی ویژگی‌های خاک، از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. این تحلیل برای بررسی روابط بین TWI و ویژگی‌های خاک (مانند ماده آلی، تخلخل، و پایداری خاکدانه) و همچنین روابط بین خود ویژگی‌های خاک (مانند رابطه بین ماده آلی و پایداری خاکدانه یا جرم مخصوص ظاهری) انجام شد. علاوه بر این، اثرات متقابل بین عوامل (مانند اثر متقابل حوزه آبخیز و جهت شیب یا TWI و جهت شیب) نیز در تحلیل واریانس بررسی

et al., (2024) گزارش کردند که اقدامات حفاظت خاک، مانند کاشت علف، طی ۲۰-۱۰ سال فرسایش را تا ۷۹-۶۶ درصد کاهش می‌دهد، که با کاهش خاک لخت (از ۳۵ درصد به ۱۵ درصد) در زیرحوضه احیاشده هم‌راستا است.

کاهش جرم مخصوص ظاهری نیز می‌تواند ناشی از افزایش ماده آلی خاک باشد که خود نتیجه افزایش پوشش گیاهی و کاهش فرسایش ناشی از اقدامات احیایی است. این موضوع با مطالعاتی که نشان می‌دهند اقدامات مدیریتی مانند قرق و کاشت گیاهان بومی باعث افزایش ماده آلی خاک می‌شوند، مطابقت دارد (Wang et al., 2021; Pavand Dorou et al., 2015). افزایش تخلخل به بهبود تهویه و نفوذ آب در خاک کمک می‌کند و افزایش پایداری خاکدانه نشان‌دهنده مقاومت بیشتر خاک در برابر فرسایش است (Mohajeri et al., 2016; Xiong et al., 2015; Nahidian et al., 2015).

مقدار EC در زیرحوضه نمونه (۷۵۶ میکروزیمنس بر متر یا ۰/۷۵۶ دسی زیمنس بر متر) نسبت به زیرحوضه شاهد (۴۹۸/۳۳ میکروزیمنس یا ۰/۴۹۸ دسی زیمنس بر متر) بیشتر بود و این تفاوت از نظر آماری معنی‌دار است ( $P < 0.05$ ). هر دو مقدار کمتر از آستانه دو دسی زیمنس بر متر هستند که نشان‌دهنده خاک غیرشور است. این افزایش در زیرحوضه احیاشده به تجمع یون‌ها به دلیل کاهش رواناب سطحی و شستشوی خاک ناشی از پوشش گیاهی متراکم‌تر نسبت داده می‌شود.

Xu et al., (2024) نیز نشان دادند که پوشش گیاهی متراکم‌تر در حوضه‌های احیاشده رواناب را کاهش داده و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد. در مقابل، pH در هر دو زیرحوضه (۷/۷۸ در نمونه و ۷/۸۸ در شاهد) در محدوده خنثی تا کمی قلیایی قرار دارد و تفاوت معنی‌داری نشان نداد ( $P > 0.05$ ), که با استانداردهای خاک‌های کشاورزی (۶/۵-۸/۵) سازگار است (USDA, 2014). اقدامات زیستی و مدیریتی انجام‌شده از سال ۱۳۸۳ (حدود ۲۰ سال) زمان کافی برای تأثیرگذاری بر ویژگی‌های خاک فراهم کرده است. این اقدامات، به‌ویژه بذرکاری و کپه‌کاری گونه‌های مقاوم به خشکی و قرق طولانی‌مدت، منجر به افزایش

مخصوص ظاهری (۱/۱۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب) نسبت به شاهد (۱/۳۱) کمتر است و به محدوده مطلوب (۱-۱/۲) نزدیک‌تر شده که نشان‌دهنده کاهش فشردگی و بهبود ساختمان است (Arshad et al., 1996). تخلخل (۵۱/۱۳ درصد در مقابل ۴۱/۶۶ درصد) به مقدار بهینه (۶۰-۵۰ درصد) برای خاک‌های لومی رسیده که بیانگر ظرفیت بهتر نگهداری آب و تهویه است (Reynolds and Elrick, 2002).

پایداری خاکدانه (۱/۹۶ میلی‌متر در مقابل ۱/۵۲) به مقادیر مطلوب (۲-۳ میلی‌متر) نزدیک‌تر شده و مقاومت در برابر فرسایش را افزایش داده، که مقاومت خاک در برابر فرسایش را بهبود بخشید، هرچند هنوز به حد ایده‌آل (۲-۳ میلی‌متر) نرسیده است. این بهبود با یافته‌های (Ding et al., 2025) مطابقت دارد، که نشان دادند کاشت پوشش گیاهی در دشت‌های سیلابی ماده آلی و ساختمان خاک را بهبود می‌بخشد. ماده آلی (۲/۱۵ درصد در مقابل ۱/۳۰ درصد) افزایش یافته، اما همچنان کمتر از مقدار بهینه (۳-۵ درصد) برای خاک‌های کشاورزی مولد است، که نشان‌دهنده نیاز به تداوم اقدامات است (Lal, 2016).

Ding et al., (2025) گزارش کردند که بذرکاری و کاشت پوشش گیاهی در بازه ۲۰-۱۰ ساله ماده آلی را تا ۰/۶ تا ۱ درصد افزایش می‌دهد، که با افزایش ۰/۶۵ درصد در این مطالعه همخوانی دارد. این بهبود به دلیل بذرکاری و کپه‌کاری گونه‌های مقاوم به خشکی (*Bromus tomentellus* و *Astragalus gossypinus*) در زیرحوضه نمونه است، که با قرق طولانی‌مدت تقویت شد. این اقدامات ورودی بقایای گیاهی را افزایش داده و فرسایش را کاهش دادند، که به نوبه خود به بهبود ماده آلی و پایداری خاکدانه کمک کرد.

با این حال، بررسی بافت خاک نشان داد که تفاوت درصد رس، سیلت و شن بین این دو زیرحوضه از نظر آماری معنی‌دار نیست ( $P > 0.05$ ), که احتمالاً به دلیل زمان‌بر بودن تغییرات بافت خاک در بازه ۲۰ ساله است. با این حال، تغییرات ملایم مشاهده‌شده در زیرحوضه نمونه می‌تواند به کاهش فرسایش در اثر اقدامات احیایی نسبت داده شود که به حفظ ذرات ریز کمک کرده است، در حالی که در زیرحوضه شاهد، فرسایش بیشتر منجر به از دست رفتن بخشی از این ذرات شده است. Zhang

بررسی طبقات مختلف TWI نیز نشان داد که طبقه TWI3 بالاترین مقادیر ماده آلی و پایداری خاکدانه را دارا است. در بافت خاک نیز، با افزایش TWI، درصد رس و سیلت افزایش و درصد شن کاهش یافت و این اختلاف معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ )، که نشان‌دهنده رسوبگذاری ذرات ریز در نقاط با TWI بالاتر (پایین دامنه) است. این روند در هر دو زیرحوضه مشاهده شد، اما در زیرحوضه شاهد به دلیل فرسایش بیشتر، پررنگ‌تر بود. با این حال، پایداری خاکدانه و ماده آلی بین طبقات TWI تفاوت معنی‌داری نداشتند ( $P > 0.05$ )، که ممکن است به دلیل تغییرپذیری محلی یا تأثیر غالب اقدامات زیستی باشد.

این یافته‌ها با نتایج Zumara et al., (2024) مطابقت دارد، که TWI را به‌عنوان یک عامل کلیدی در توزیع رطوبت و کاهش فرسایش خاک در حوضه‌های کوهستانی شناسایی کردند. مناطق با TWI بالاتر، به دلیل تجمع رطوبت، شرایط مناسب‌تری برای رشد پوشش گیاهی و فعالیت زیستی خاک فراهم می‌کنند که در زیرحوضه احیاشده با بذرکاری و کپه‌کاری تقویت شده است.

همچنین، در طبقات بالاتر TWI، میزان نفوذپذیری اولیه و نهایی نیز افزایش یافته است که بیانگر توانایی بالای این مناطق در مدیریت رواناب و کاهش فرسایش است. این یافته‌ها با مطالعاتی که نشان می‌دهند TWI تأثیر قابل توجهی بر توزیع رطوبت و ویژگی‌های خاک دارد، مطابقت دارد (Xiong et al., Luo et al., 2024). تجمع رطوبت بیشتر در مناطق با TWI بالاتر می‌تواند باعث افزایش فعالیت زیستی خاک، تجزیه مواد آلی و بهبود ساختمان خاک شود. افزایش نفوذپذیری نیز به کاهش رواناب سطحی و فرسایش کمک می‌کند.

ماده آلی و بهبود پایداری خاکدانه شده است ( $P < 0.05$ ). این مدت زمان به پوشش گیاهی اجازه داد تا تثبیت شده و با افزایش ورودی بقایای گیاهی و کاهش فرسایش، به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی و طبقات TWI بالا، کمک کند.

#### ارتباط بین عوامل توپوگرافی و ویژگی‌های خاک:

جهت دامنه نیز ارتباط معنی‌داری بین برخی از ویژگی‌های خاک داشت. دامنه‌های رو به شمال در مقایسه با دامنه‌های رو به جنوب، پایداری خاکدانه بیشتر، ماده آلی بالاتر و تاج پوشش گیاهی متراکم‌تری داشتند. همچنین، بافت خاک در دامنه‌های شمالی درصد رس و سیلت بالاتر و درصد شن کمتری نشان داد، که این اختلاف از نظر آماری معنی‌دار بود ( $P < 0.05$ ).

این نتایج بیانگر ارتباط جهت دامنه بر حفظ رطوبت، رشد گیاهان و جلوگیری از فرسایش خاک است که به حفظ ذرات ریز و کاهش انتقال شن کمک می‌کند. دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت کمتر تابش مستقیم خورشید، معمولاً شرایط رطوبتی بهتری دارند. این موضوع با مطالعات مشابه در مناطق دیگر همخوانی دارد (Karimi et al., 2023; Saeidian et al., 2014). رطوبت بیشتر در دامنه‌های شمالی می‌تواند به افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها، تجزیه مواد آلی و در نتیجه افزایش پایداری خاکدانه و ماده آلی کمک کند.

Xu et al., (2024) نیز گزارش کردند که پوشش گیاهی متراکم‌تر در دامنه‌های با رطوبت بالاتر رواناب سطحی را کاهش داده و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد، که با افزایش پوشش گیاهی و کاهش خاک لخت (از ۳۵ به ۱۵ درصد) در دامنه‌های شمالی هم‌راستا است.

جدول ۲- آنالیز واریانس طرح آشیانه‌ای، شاخص رطوبت توپوگرافی در جهت شیب در حوزه آبخیز بر روی ویژگی‌های خاک مورد مطالعه

Table 2. Analysis of variance of nested design, TWI in Slope aspect in watershed on studied soil properties

S.O.V	d f	Mean square					
		MWD	Porosity	Bulk Density	Sand	Silt	Clay
Watershed	1	1.5583	807.03**	0.1533*	211.22 <sup>ns</sup>	1215.68 <sup>ns</sup>	2440.36 <sup>ns</sup>
Slope aspect (Watershed)	2	2.6177**	192.27**	0.0312*	888.889**	224.70**	656.324**
TWI (Slope aspect*Watershed)	8	0.1191 <sup>ns</sup>	21.538**	0.0055*	154.99**	30.018**	99.293 <sup>ns</sup>
Error	24	0.0018	0.0123	0.0001	2.098	4.036	2.218
CV (%)	-	2.07	0.24	0.81	3.68	7.91	4.22

ادامه جدول ۲

Table 2. Continued

Mean square								
S.O.V	d f	Bare Soil cover	Rock Fragment Cover	Litter Cover	Vegetation Cover	Organic Mater	pH	EC
Watershed	1	3402.8**	600.44*	380.25* *	3173.4**	16.5035*	0.0390 <sup>ns</sup>	597523.8*
Slope aspect (Watershed)	2	570.28**	112.22**	62.14**	672.44**	3.1408**	0.0166 <sup>ns</sup>	163071.4**
TWI (Slope aspect*Watershed)	8	7.1944 <sup>ns</sup>	20.000*	16.472*	28.944*	0.2499*	0.0077 <sup>ns</sup>	12756.3**
Error	24	7.3056	7.8889	3.722	8.222	0.0001	0.0021	0.0030
CV (%)	-	11.87	19.01	23.54	5.28	0.55	0.59	0.01
Mean square								
S.O.V	d f	Plant Available Water	Permanent wilting point	Field Capacity	Saturation Moisture Content	Time to steady-state	Steady-state infiltration rate	Initial infiltration rate
Watershed	1	0.01810**	0.03160**	0.0169* *	0.0633*	8002.78**	13136.0**	167600.0**
Slope aspect (Watershed)	2	0.00643 <sup>ns</sup>	0.00219 <sup>ns</sup>	0.0047 <sup>ns</sup>	0.0146**	1313.89**	480.89**	52200.0*
TWI (Slope aspect*Watershed)	8	0.00996**	0.00030 <sup>ns</sup>	0.0020 <sup>ns</sup>	0.0028 <sup>ns</sup>	204.17**	35.556**	10600.00**
Error	24	0.00031	0.00002	0.0036	0.0031	43.056	3.556	1300.00
CV (%)	-	14.95	13.21	20.99	12.74	10.99	9.87	20.03

ns, \*, and \*\* indicate non-significance and significance at the five and one percent probability levels, respectively, TWI: Topographic Wetness Index, MWD: Mean Weighted Diameter

جدول ۳- مقایسه مقادیر میانگین ویژگی‌های مورد بررسی خاک در (a) زیرحوضه‌های نمونه و شاهد، (b) شیب‌های رو به شمال و جنوب و

(c) طبقه‌های مختلف TWI

Table 3. Comparison of average values of investigated soil properties in (a) treated and controlled areas, (b) north and south facing slopes and (c) different TWI classes

Variables/Parameters	MWD (mm)	Porosity (g/cm <sup>3</sup> )	Bulk Density (%)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
Treated Watershed	1.96±0.52	51.13±0.73	1.18±0.01	25.07±6.19	30.26±3.06	44.68±3.19
Control Watershed	1.52±0.39	41.66±1.14	1.31±0.02	26.21±6.06	29.74±2.90	44.06±3.22
North Facing Slopes	2.14±0.33	49.55±2.06	1.21±0.25	20.44±2.93	32.47±1.47	47.10±1.58
South Facing Slopes	1.35±0.29	43.23±2.53	1.29±0.3	30.84±2.87	27.53±1.42	41.64±1.55
TWI1	1.57±0.54	44.16±2.59	1.29±0.31	28.82±5.53	28.43±2.76	42.75±3.12c
TWI2	1.70±0.49	46.03±2.52	1.25±0.28	25.87±5.64	29.91±2.71	44.23±2.93
TWI3	1.96±0.52	48.99±2.25c	1.21±0.27c	22.22±5.68	31.66±2.78	46.12±3.05

Variables/Parameters	Bare Soil cover (%)	Rock Fragment Cover (%)	Litter Cover (%)	Vegetation Cover (%)	Organic Mater (%)	pH	EC (μS/m)
Treated Watershed	13.06±1.38	11.89±0.97	11.44±0.76	63.67±1.55	2.15±0.62	7.78±0.02	756±36.14
Control Watershed	32.5±1.61	17.67±0.96	4.94±0.53	44.89±1.77	1.5±0.38	7.88±0.01	498.33±9.65
North Facing Slopes	17.17±3.15	12.67±2.25	9.78±2.17	60.39±3.18	2.13±0.64	7.8±0.29	708.67±13.86
South Facing Slopes	28.39±3.28	16.89±2.01	6.61±1.79	48.17±3.2	1.32±0.38	7.86±0.26	545.67±9.84
TWI1	23.67±3.51	15.75±2.03	7.67±2.05	52.92±3.48	1.99±0.80	7.88±0.24	581.5±12.14c
TWI2	23.42±3.41	16.42±2.31	7.25±2.04	53±3.55	1.73±0.61	7.82±0.29	612.75±12.4
TWI3	21.25±3.45	12.17±2.18	9.67±2.12	56.92±3.35	1.45±0.61	7.79±0.28	687.25±14.27

ادامه جدول ۳

Table 3. Continued

Variables/Parameters	Plant Available Water (%)	Permanent wilting point (%)	Field Capacity (%)	Saturation Moisture Content (%)	Time to steady-state (min)	Steady-state infiltration rate (mm/h)	Initial infiltration rate (mm/h)
Treated Watershed	21.38±1.8	9.22±1.3	30.61±2.2	48.22±1.3	55±1.46	28.44±1.92	223.33±23.16
Control Watershed	18.38±2.4	7.89±1.1	26.27±1.4	39.83±2.1	64.44±2.46	19.78±0.82	136.67±13.55
North Facing Slopes	21.78±2.5	8.28±2.2	30.05±2.3	46.56±2.6	55.56±3.01	28.78±3.51	230±9.85
South Facing Slopes	18±2.4	8.83±1.8	26.83±2.6	41.5±2.7	63.89±2.94	18.44±2.84	130±6.87
TWI1	18.25±2.6	7.75±2.3	26±2.5	41.58±2.7	62.5±3.18	19±3.26c	135±7.96
TWI2	19.67±2.5	8.58±1.9	28.25±2.5	43.25±2.5	62.5±3.18	22±3.3	165±8.26
TWI3	21.75±2.5	9.33±2.1	31.08±2.1	47.25±2.8	54.17±2.59	25.33±3.52	240±10.27

TWI: Topographic Wetness Index, MWD: Mean Weighted Diameter

(2024) نیز گزارش کردند که پوشش گیاهی مترکمتر در دامنه‌های با رطوبت بالاتر رواناب سطحی را کاهش داده و کیفیت خاک را بهبود می‌بخشد، که با کاهش خاک لخت (از ۳۵ به ۱۵ درصد) در دامنه‌های شمالی این پژوهش هم‌راستا است.

علاوه بر جهت دامنه، شاخص TWI نیز تأثیر قابل توجهی بر کارآمدی اقدامات احیایی دارد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، نقاط نمونه‌برداری با TWI بالاتر (NF-T3 و SF-T3) در مقایسه با نقاط با TWI پایین‌تر (NF-T1 و SF-T1) بهبود بیشتری در ویژگی‌هایی مانند بافت خاک نشان می‌دهند، اما در ماده آلی و پایداری خاکدانه تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. این موضوع با یافته‌های مطالعات دیگر در مورد تأثیر TWI بر توزیع رطوبت و ویژگی‌های خاک مطابقت دارد (Xiong et al., 2015؛ Luo et al., 2024).

تجمع رطوبت بیشتر در مناطق با TWI بالا، ناشی از تجمع رواناب سطحی و آب زیرزمینی، شرایط مطلوب‌تری را برای فعالیت زیستی و بهبود ساختمان خاک فراهم می‌آورد. (Ding et al., 2025) نشان دادند که رطوبت بالاتر در چنین مناطقی فعالیت میکروارگانیسم‌ها و تجزیه بقایای گیاهی را افزایش می‌دهد، که با افزایش ماده آلی (۰/۶۵ درصد در NF-T3 نسبت به NF-T1) در این مطالعه همخوانی دارد. این شرایط در زیرحوضه نمونه، به دلیل بذركاری و قرق طولانی‌مدت، تقویت شده و به بهبود تهویه خاک، دسترسی گیاهان به آب و مواد غذایی و کاهش تنش خشکی در مناطق نیمه‌خشک کمک کرده است.

### تحلیل مکانی تفاوت‌ها در نقاط نمونه‌برداری

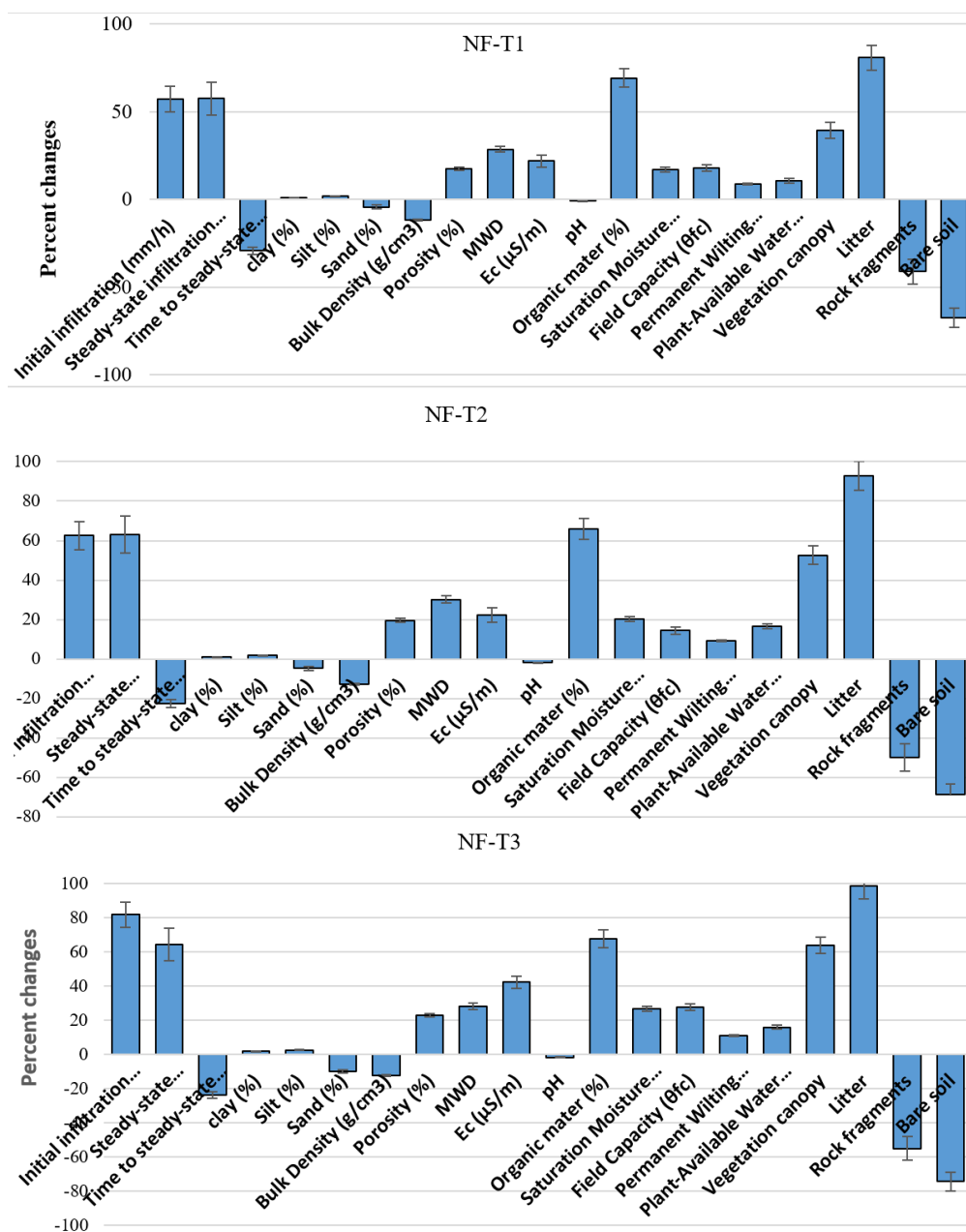
**مختلف:** مقایسه زیرحوضه نمونه با شاهد نشان داد که اقدامات مدیریتی به‌طور کلی منجر به بهبود کیفیت خاک شده است. با این حال، میزان تأثیر اقدامات احیایی در نقاط نمونه‌برداری مختلف، متفاوت است. شکل ۶ درصد تغییرات ویژگی‌های خاک را در نقاط نمونه‌برداری مختلف (SF-T1، NF-T1، NF-T2، NF-T3، SF-T2، SF-T3) پس از گذشت ۲۰ سال از انجام اقدامات احیایی نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، نقاط نمونه‌برداری در دامنه‌های شمالی (NF-T1، NF-T2 و NF-T3) نسبت به نقاط نمونه‌برداری در دامنه‌های جنوبی (SF-T1، SF-T2 و SF-T3) بهبود بیشتری در برخی از ویژگی‌ها نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، درصد افزایش ماده آلی در نقاط NF-T3 با بالاترین TWI در دامنه‌های شمالی به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر نقاط بود. این موضوع با یافته‌های مطالعات دیگر در مورد تأثیر جهت دامنه بر ویژگی‌های خاک همخوانی دارد (Jafarian and Shabanzadeh, 2017).

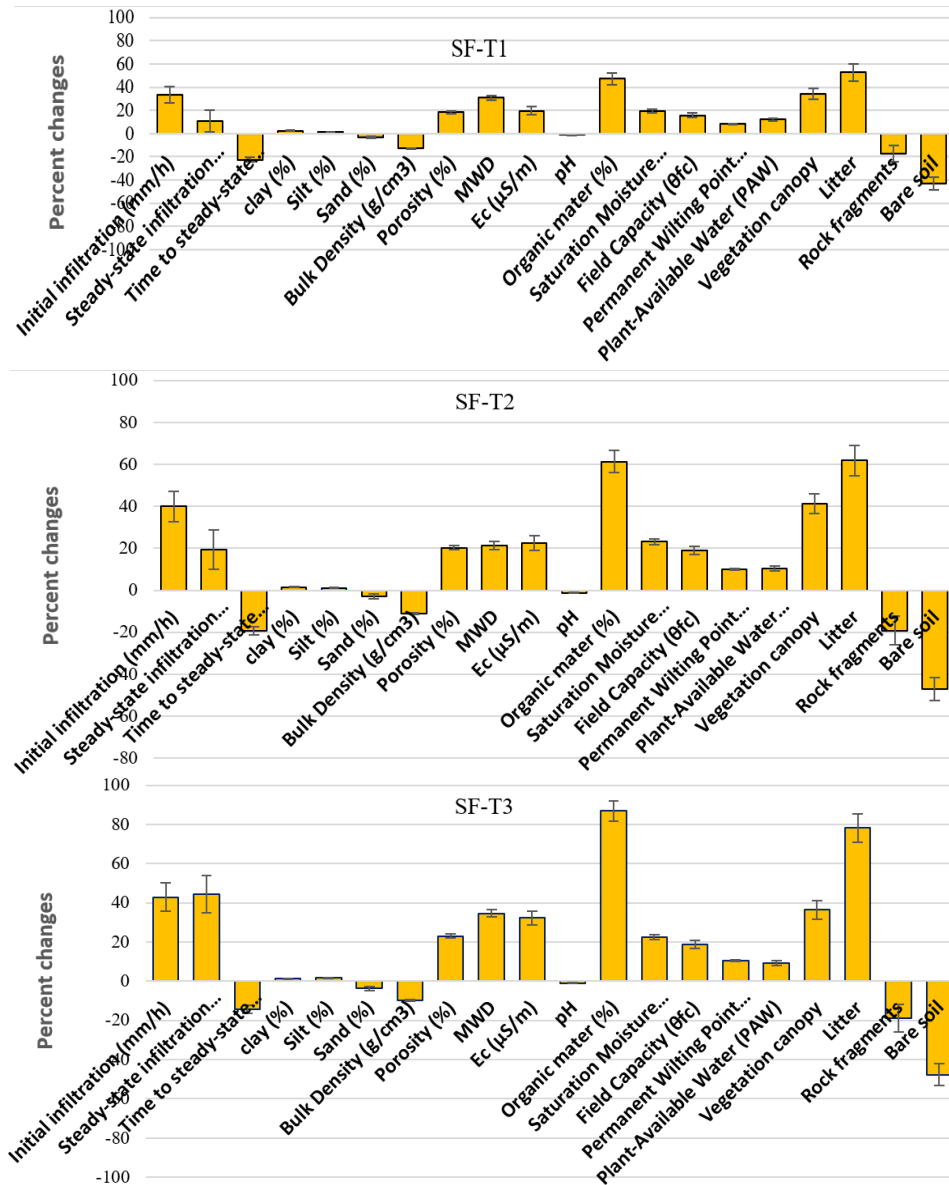
دامنه‌های شمالی به دلیل دریافت کمتر تابش مستقیم خورشید، معمولاً شرایط رطوبتی بهتری دارند که می‌تواند به افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها، تجزیه مواد آلی و در نتیجه بهبود ویژگی‌های خاک کمک کند. این شرایط رطوبتی بهتر، ناشی از کاهش تبخیر و تعرق، دمای پایین‌تر خاک، و پوشش گیاهی مترکمتر در اثر بذركاری و کپه‌کاری در زیرحوضه نمونه، به افزایش ماده آلی و پایداری خاکدانه کمک کرده است. (Xu et al.,

بررسی دقیق‌تر بافت و کانی‌شناسی خاک در مطالعات آینده، با استفاده از روش‌های پیشنهادی مانند تحلیل GIS در (Zumara et al., 2024) می‌تواند این فرایندها را روشن‌تر کند. در مجموع این نتایج نشان می‌دهد که تعامل جهت دامنه و TWI با اقدامات زیستی، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی و مناطق با TWI بالا، کارایی احیای خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده است.

کاهش درصد شن، خاک لخت (از ۳۵ به ۱۵ درصد)، و سنگریزه در نقاط با TWI بالا و دامنه‌های شمالی به افزایش پوشش گیاهی (از ۴۰ به ۶۵ درصد) و بهبود ساختمان خاک در اثر اقدامات زیستی نسبت داده می‌شود. رطوبت بیشتر در مناطق با TWI بالا همچنین ممکن است انحلال مواد معدنی و انتقال آنها به لایه‌های پایین‌تر را تسهیل کرده و به افزایش رس و سیلت در سطح خاک کمک کند (Zhang et al., 2024).



شکل ۶- درصد تغییر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در نقاط نمونه‌برداری مختلف تحت تأثیر اقدامات احیایی و ویژگی‌های توپوگرافی  
 Fig. 6. Changes in soil physical and chemical properties at different sampling points under the influence of restoration measures and topographic features



ادامه شکل ۶

Fig. 6. Continued

علامات اختصاری به شرح ذیل است:

NF-T1: دامنه روبه شمال و  $2 < TWI \leq 7$ , NF-T2: دامنه رو به شمال و  $7 < TWI \leq 12$ , NF-T3: دامنه رو به شمال و  $12 < TWI \leq 17$   
 SF-T1: دامنه روبه جنوب و  $2 < TWI \leq 7$ , SF-T2: دامنه رو به جنوب و  $7 < TWI \leq 12$ , SF-T3: دامنه رو به جنوب و  $12 < TWI \leq 17$

نمودار دوعبدي حاصل (شکل ۷) نشان می‌دهد که دو مؤلفه اصلی Dim1 (82.9%) و Dim2 (7.1%) در مجموع ۹۰ درصد واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهند. این سهم بالا بیانگر آن است که الگوی اصلی تغییرات ویژگی‌های خاک به‌خوبی توسط این دو مؤلفه تبیین شده و دقت تحلیل بسیار مطلوب است. بررسی بار عاملی متغیرها نشان داد که مؤلفه نخست (Dim1) بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌هایی چون ماده آلی (OM)، تاج پوشش گیاهی (VC)، لاشبرگ

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) بین ویژگی‌های خاک و نقاط نمونه‌برداری: تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) یکی از روش‌های قدرتمند چندمتغیره برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای پنهان میان متغیرهاست. در این پژوهش، از PCA برای بررسی همبستگی میان ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک در حوضه زوجی گنبد همدان (نمونه و شاهد)، دامنه‌های شمالی و جنوبی و طبقه‌های مختلف شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI) استفاده شد.

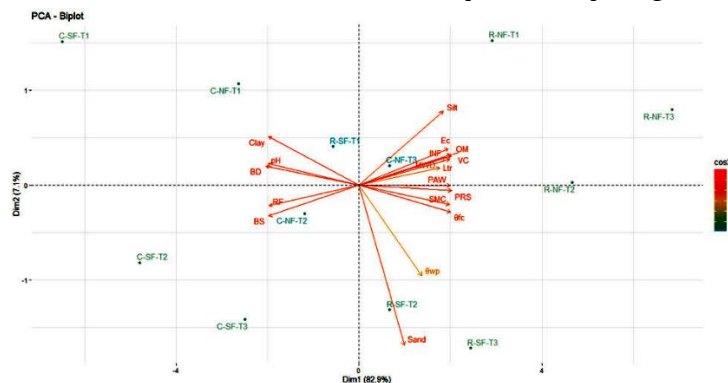
شیمیایی و بخشی از بافت خاک را برجسته می‌کند. در این مؤلفه، سیلت و هدایت الکتریکی بار عاملی مثبت داشتند، در حالی که رس و pH در سمت مخالف قرار گرفتند. این تقابل نشان می‌دهد که تغییرات شیمیایی خاک می‌تواند در کنار ترکیب بافتی، الگوهای متفاوتی از ذخیره و انتقال رطوبت ایجاد کند. افزایش EC در یک راستا با OM و VC قرار گرفت که بیانگر نقش پوشش گیاهی در کاهش شستشوی نمک‌ها و حفظ یون‌ها در پروفیل خاک است، همان‌طور که (Chartier et al., 2011) نیز به آن اشاره کرده‌اند.

از نظر توزیع گروه‌های نمونه‌برداری، نقاط واقع در حوضه احیاشده و دامنه‌های شمالی با TWI بالا (R-NF-T3) در فاصله بیشتری از مبدأ و در راستای مثبت Dim1 قرار گرفتند، که بیانگر تأثیر مثبت اقدامات احیایی بر بهبود ویژگی‌های خاک در این مناطق است. به‌طور مشخص، این نقاط با مقادیر بالای OM، پوشش گیاهی و نفوذپذیری بیشتر مشخص می‌شوند. در مقابل، گروه‌هایی مانند C-SF-T1 (حوضه شاهد، دامنه جنوبی و TWI1) به مبدأ نزدیک‌تر بوده و با ویژگی‌های نامطلوب‌تر خاک مانند درصد بالای خاک لخت و پوشش گیاهی ضعیف شناخته می‌شوند. این تفاوت‌ها به‌خوبی نشان‌دهنده نقش هم‌زمان مدیریت اکولوژیکی (احیای پوشش گیاهی) و شرایط توپوگرافی در بهبود عملکرد هیدرولوژیکی خاک است. موضوعی که با نتایج (Van Schaik (2009) درباره اهمیت پوشش گیاهی و توپوگرافی بر نفوذپذیری هم‌راستا است.

(LC)، رطوبت اشباع (SMC)، ظرفیت زراعی ( $\theta_{fc}$ )، آب قابل استفاده گیاه (PAW)، تخلخل (PRS) پایداری خاکدانه در برابر آب (WSA) و نفوذپذیری خاک (INF) قرار دارد. هم‌راستایی و طول بردارهای این متغیرها نشان‌دهنده همبستگی مثبت قوی و نقش کلیدی آنها در بهبود شرایط هیدرولوژیکی خاک است.

این یافته با نتایج مطالعات هیدرولوژیکی که در همین حوضه انجام شده است همخوانی دارد (Sajadi Bami et al., 2021). برای نمونه، هم‌جهتی ماده آلی ( $\cos^2 \approx 0.92$ )، تاج پوشش گیاهی (VC)، ( $\cos^2 \approx 0.89$ ) و پایداری خاکدانه در برابر آب (MWD)، ( $\cos^2 \approx 0.87$ ) با نرخ نفوذ (INF) نشان می‌دهد که افزایش این متغیرها به‌طور مستقیم موجب بهبود نفوذپذیری و ارتقای عملکرد آبی خاک می‌شود. این همبستگی بیانگر آن است که پوشش گیاهی و ماده آلی نه تنها نفوذ آب را تسهیل می‌کنند، بلکه با تقویت پایداری خاکدانه‌ها اثرات تخریبی رواناب و قطرات باران را کاهش داده و شرایط بهتری برای ذخیره و دسترسی گیاهان به آب فراهم می‌سازند.

در مقابل، متغیرهایی نظیر جرم مخصوص ظاهری، خاک لخت و درصد شن در جهت مخالف Dim1 قرار گرفتند و اثر منفی آنها بر کارکرد هیدرولوژیکی خاک آشکار شد. همبستگی منفی BD و BS با INF و PAW به‌خوبی نشان می‌دهد که تراکم خاک و کاهش پوشش سطح زمین ظرفیت ذخیره و نفوذ آب را تضعیف می‌کند. مؤلفه دوم (Dim2) هرچند سهم کمتری در تبیین واریانس دارد، اما نقش تمایزدهنده متغیرهای



شکل ۷- نمودار دوبعدی تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) روابط بین ویژگی‌های خاک و نقاط نمونه‌برداری مختلف

Fig. 7. Two-dimensional Principal Component Analysis (PCA) plot of relationships between soil properties and different sampling points

Clay، رس، Silt، سیلت، Sand، شن، INF، نرخ نفوذ، BD، جرم مخصوص ظاهری، PRS، تخلخل، OM، ماده آلی، EC، هدایت الکتریکی، pH، اسیدیته، WSA، پایداری خاکدانه، SMC، رطوبت اشباع،  $\theta_{fc}$ ، ظرفیت زراعی،  $\theta_{wp}$ ، نقطه پژمردگی دائم، PAW، آب قابل استفاده گیاه، VC، تاج پوشش گیاهی، LC، لاشبرگ، RF، سنگ و سنگ‌ریزه، BS، خاک لخت

## نتیجه‌گیری

مخصوص ظاهری و خاک لخت با سایر شاخص‌های کیفیت خاک ( $r = -0.8 \text{ _ } 0.95$ ) نشان‌دهنده تأثیرات مثبت اقدامات احیایی است. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب ویژگی‌های توپوگرافی نقش مهمی در تعیین کارآمدی اقدامات احیایی دارد و دامنه‌های شمالی با TWI بالا، اولویت بالاتری برای اجرای این اقدامات دارند. در نهایت، پیشنهاد می‌شود، در برنامه‌ریزی اقدامات احیایی، به ویژگی‌های توپوگرافی توجه ویژه‌ای شود و مطالعات آینده بر شناسایی عوامل مؤثر بر کاهش برخی ویژگی‌ها و ارزیابی اثرات بلندمدت اقدامات احیایی تمرکز کنند.

## تشکر و قدردانی

از اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان همدان که با ارائه اطلاعات و نقشه‌های ضروری و فراهم کردن شرایط لازم، امکان نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌های میدانی را فراهم کردند، سپاسگزاریم.

## تعارض منافع

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

این پژوهش با هدف بررسی ارتباط بین ویژگی‌های توپوگرافی و کارآمدی اقدامات احیایی در بهبود ویژگی‌های خاک در حوضه زوجی گنبد همدان انجام شد. نتایج نشان داد که اقدامات احیایی به‌طور کلی منجر به بهبود کیفیت خاک شده و باعث کاهش جرم مخصوص ظاهری و افزایش تخلخل، پایداری خاکدانه، ماده آلی، رطوبت اشباع، سرعت نفوذ آب و تاج پوشش گیاهی شده است. با این حال، میزان این بهبود به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های توپوگرافی قرار دارد.

دامنه‌های شمالی و نقاط با TWI بالا، بیشترین بهبود را در ویژگی‌های مختلف خاک، به‌ویژه ماده آلی و پایداری خاکدانه، نشان دادند. این یافته‌ها با مطالعات پیشین در مورد تأثیر جهت دامنه و TWI بر ویژگی‌های خاک همخوانی دارد و نشان می‌دهد که شرایط رطوبتی مناسب‌تر در این مناطق، باعث افزایش فعالیت میکروارگانیسم‌ها و بهبود ساختار خاک می‌شود. ماتریس همبستگی بین ویژگی‌های مختلف خاک، یافته‌های مربوط به تأثیر اقدامات احیایی و ویژگی‌های توپوگرافی را نشان داد. همبستگی مثبت بین ماده آلی و پایداری خاکدانه ( $r=0.66$ )، تخلخل و سرعت نفوذ آب ( $r=0.93$ )، و همچنین همبستگی منفی قوی بین جرم

## منابع مورد استفاده

- Armin, M., Roohipour, H., Ahmadi, H., Salajegheh, A., Mahdian, M.H., Ghorbania Khaibari, V., 2016. Relationships between soil aggregate stability and some soil properties in the soils of Taleghan watershed. *J. Range. Water. Manage.* 69(2), 275-295 (in Persian).
- Arshad, M.A., Lowery, B., Grossman, B., 1997. Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for Assess. Soil Qual.* 49, 123-141.
- Azizi, Y., Akhavan, R., Kiadaliri, H., Soleimani, R., 2022. The effect of management practices and slope direction on the biometrics variables of trees, soil and biodiversity of tree species in the Dinarkouh forests of Ilam. *Iran. J. Forest* 14(3), 275-290 (in Persian).
- Back, M.P., Jefferson, A.J., Ruhm, C.T., Blackwood, C.B., 2024. Effects of reclamation and deep ripping on soil bulk density and hydraulic conductivity at legacy surface mines in northeast Ohio, USA. *Geoderma* 442, 116788.
- Bayati, M., 2010. The role of changes in the physical and chemical properties of soils along the slopes in the susceptibility to erosion of mountain soils (with emphasis on gully erosion): the north-western slopes of Sabalan (from Azar to Meshkin Shahr). *J. Space Plann. Manage.* 14(1), 33-56 (in Persian).
- Blake, G.R., 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*, 9, 374-390.
- Cifuentes-Croquevielle, C., Stanton, D.E., Armesto, J.J., 2020. Soil invertebrate diversity loss and functional changes in temperate forest soils replaced by exotic pine plantations. *Sci. Reports.* 10(1), 7762.
- Ding, Y., Zhao, Q., Ding, S., Lu, X., Wei, X., 2025. Effects of land reclamation on the stability of soil organic carbon pool in floodplains. *Land Degrad. Develop.* 36(11), 3844-3857.

- Hamedani, K.S., Tavili, A., Javadi, S. A., Jafari, M., Tahmoures, M., 2022. Effect of environmental and managerial factors on range condition in semi-arid mountainous area of Chahar Bagh in northeastern Iran. *J. Rangeland Sci.* 12(4), 418-433.
- Jafarian, Z., Shabanzadeh, S., 2017. The effect of slope direction on the spatial variability of physical and chemical properties of soil in the Kiasar region of Mazandaran. *Soil Water Knowledge* 27(4), 225-235 (in Persian).
- Kalahroudi, Z.H., Zadeh, M.M., Mahini, A.S., Kiani, F., Najafinejad, A., 2023. Impacts of tourist trampling and topography on soil quality characteristics in recreational trails. *Soil Environ.* 42(1), 77-93.
- Karimi, M., Abbaspour, A., Safari, Y., Dorostkar, V., 2023. The effect of slope direction and position on important soil properties in the Kalpoush region of Shahroud. *J. Environ. Erosion Res.* 13(1), 175-189 (in Persian).
- Kemper, W.D., Rosenau, R.C. 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods*, 5, 425-442.
- Kölbl, A., Steffens, M., Wiesmeier, M., Hoffmann, C., Funk, R., Krümmelbein, J., Kögel-Knabner, I., 2011. Grazing changes topography-controlled topsoil properties and their interaction on different spatial scales in a semi-arid grassland of Inner Mongolia, PR China. *Plant Soil* 340, 35-58.
- Ladanyi, Z., Blanka, V., Deak, A. J., Rakonczai, J., Mezösi, G., 2016. Assessment of soil and vegetation changes due to hydrologically driven desalinization process in an alkaline wetland, Hungary. *Ecol. Complex.* 25, 1-10.
- Lal, R., 2016. Soil health and carbon management. *Food Energy Secur.* 5(4), 212-222.
- López, I.F., Lambert, M.G., Mackay, A.D., Valentine, I., 2003. The influence of topography and pasture management on soil characteristics and herbage accumulation in hill pasture in the North Island of New Zealand. *Plant Soil* 255, 421-434.
- Lucà, F., Conforti, M., Robustelli, G., 2011. Comparison of GIS-based gully susceptibility mapping using bivariate and multivariate statistics: Northern Calabria, South Italy. *Geomorphol.* 134(3-4), 297-308.
- Luo, B., Li, J., Tang, J., Wei, C., Zhong, S., 2024. Microtopography effects on pedogenesis in the mudstone-derived soils of the hilly mountainous regions. *Sci. Report.* 14(1), 11998.
- Maleki, S., Khoramali, F., Kiani, F., Karimi, A., 2013. Effect of slope aspect and position on some physical and chemical properties of soil in sloping loess lands, Toshan region, Golestan province. *Soil Water Conserv. Res.* 20(3), 93-112. (in Persian).
- Mhalla, B., Ahmed, N., Datta, S.P., Singh, M., Shrivastava, M., Mahapatra, S.K., Moursy, A.R., 2019. Effect of topography on characteristics, fertility status and classification of the soils of almora district in Uttarakhand. *J. Indian Soci. Soil Sci.* 67(3), 309-320.
- Moazeni-Noghondar, S., Golkarian, A., Azari, M., Asgari Lajayer, B., 2021. Study on soil water retention and infiltration rate: a case study in eastern Iran. *Environ. Earth Sci.* 80(14), 474.
- Moeieni, A., Jafari, M., Salajegheh, A., Feiznia, S., Sarmadian, F., 2016. Investigating the possibility of using the geomorphology method for soil science studies in natural resources. *Iran. J. Nat. Resour.* 59(3), 569-577 (in Persian).
- Mohajeri, P., Alamdari, P., Golchin, A., 2016. The effect of slope positions on the physical and chemical properties of soils located on the hill and valley series in the Deylaman region of Guilan Province. *Water Soil* 30(1), 162-171 (in Persian).
- Mohammadkhan, Sh., Ahmadi, H., Jafari, M., Feiznia, S., Salajegheh, A., Azarnivand, H., 2016. Construction of a quantitative geomorphology model using the Analytical Hierarchy Process (AHP) method, case study: Latian Watershed. *Water. Res.* 28(108), 92-110 (in Persian).
- Nahidian, S., Nourbakhsh, F., Mosaddeghi, M.R., 2015. The effect of slope position on the aggregate distribution of organic carbon, L-glutaminase enzyme activity and soil structure stability. *J. Soil Manage. Sustain. Produc.* 5(1), 129-143. (in Persian).
- Nelson, D.W., Sommers, L.E., 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. *Methods of soil analysis: Part 3 Chemical methods*, 5, 961-1010.
- Pavand Dorou, A., Salehi, A., Pourbabaei, H., Alavi, S.J., 2015. The relationship between the establishment and distribution of the *Acer velutinum* Boiss species with the physical and chemical properties of the soil and topographic factors in the northern forests, case study: Nav Asalem/Guilan Province. *J. Plant Res. (Iran. J. Biol.)*, 27(4), 520-533. (in Persian).
- Porhemmat, J., Nazari-pooya, H., 2015. An investigation and evaluation of infiltration models in rangeland soil cover, case study: Gonbad basin in Hamedan Province. *Water. Engin. Manage.* 7(4), 458-468 (in Persian).
- Rahimi Ashjardi, M., Ayoubi, Sh., 2013. The effect of slope position and land use change on some soil properties and magnetic susceptibility in Fereydunshahr. *Water Soil* 27(5), 882-895 (in Persian).

- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., 2002. Soil porosity. In J. H. Dane and G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods* (pp. 811-828). Soil Science Society of America.
- Richards, L.A. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.
- Saeidian, H., Moradi, H.R., Feiznia, S., Bahramifar, N., 2014. The role of main slope directions on some physical and chemical properties of soil, case study: Gachsaran and Aghajari formations of Kuh Gach and Murgha Watershed in Izeh city. *Water. Manage. Res. J.* 5(9), 64-77 (in Persian).
- Sajadi bami, Y., Porhemmat, J., Sedghi, H., Jalalkamali, N., 2021. Comparison of MIKE NAM and AWBM models performance in simulation of daily runoff in mountainous regions. *J. Water Soil Conserv.* 10(3), 1-14. (in Persian).
- Sajadi Bami, Y., Porhemmat, J., Sedghi, H., Jalalkamali, N., 2020. Performance evaluation of Mike Nam Rainfall-Runoff (RR) model in daily flow simulation, case study: Gonbad Catchment in Hamedan. *J. Applied Engin. Sci.* 10(1), 1-15.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil structure and soil organic matter II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. *Soil Sci. Soci. America J.* 64(3), 1042-1049.
- Stanila, A.L., Simota, C.C., Dumitru, M., Dumitru, S.I., Ignat, P., 2019. Research on soil resources of the northwest part of the cracau-bistrita depression for sustainable agriculture. *Revista De Chimie*, 70(4), 1178-1186.
- United States. Division of Soil Survey., 1993. *Soil survey manual* (No. 18). US Department of Agriculture.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1), 29-38.
- Xu, Y., Li, P., Ma, F., Liu, X., Zhang, N., Pan, J., Meng, Y., 2024. Watershed landscape characteristics and connectivity drive river water quality under seasonal dynamics. *J. Cleaner Produc.* 473, 143533.
- Zhang, X., She, D., Hou, X., Zheng, X., 2024. Precipitation, topography, and soil conservation measures determine the spatiotemporal pattern of sediment yield at the regional scale. *Catena* 240, 107990.
- Zhang, X.S., Zhou, C.N., Lu, J., 2022. Influence of topography, soil properties and plant community on the biomass of *Abies georgei* var. *smithii* seedlings in Southeast Tibet. *J. Mountain Sci.* 19(9), 2664-2677.
- Zhao, C., Zhou, Y., Jiang, J., Xiao, P., Wu, H., 2021. Spatial characteristics of cultivated land quality accounting for ecological environmental condition: A case study in hilly area of northern Hubei Province, China. *Sci. Total Environ.* 774, 145765.
- Zumara, R., Nasher, N.R., 2024. Soil erodibility mapping of hilly watershed using analytical hierarchy process and geographical information system: A case of Chittagong hill tract, Bangladesh. *Heliyon* 10(5), 26728.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37(1), 29-38.
- Wang, B., Liu, D., Yang, J., Zhu, Z., Darboux, F., Jiao, J., An, S., 2021. Effects of forest floor characteristics on soil labile carbon as varied by topography and vegetation type in the Chinese Loess Plateau. *Catena* 196, 104825.
- Xiong, Z., Li, S., Yao, L., Liu, G., Zhang, Q., Liu, W., 2015. Topography and land use effects on spatial variability of soil denitrification and related soil properties in riparian wetlands. *Ecolo. Engin.* 83, 437-443.